ICID•CIID

EAU, AGRICULTURE ET TERRITOIRES

26th INTERNATIONAL CONGRESS ON IRRIGATION AND DRAINAGE

12-17 October 2026, Marseille, France

TRANSACTIONS: QUESTION 66, 67, & 68



Water and Agricultural Resilience in the Face of Climate Change

Eau et Résilience de L'agriculture Face au défi Climatique

INTERNATIONAL COMMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE

COMMISSION INTERNATIONALE DES IRRIGATIONS ET DU DRAINAGE

ICID•CIID

The International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), established in 1950 is the leading scientific, technical and not-for-profit Non-Governmental Organization (NGO). The Commission through its network of professionals spread across more than a hundred countries, has facilitated sharing of experiences and transfer of water management technology for over six decades. ICID supports capacity development, stimulates research and innovation and strives to promote policies and programs to enhance sustainable development of irrigated agriculture through a comprehensive water management framework.



VISION

Water secure World, free of poverty and hunger achieved through sustainable rural development.

MISSION



To work together towards sustainable agriculture water management through inter-disciplinary approaches to economically viable, socially acceptable and environmentally sound irrigation, drainage and flood management.

Organizational Goals to realise the ICID Vision 2030

- **A** Enable Higher Crop Productivity with Less Water and Energy
- **B** Be a Catalyst for a Change in Policies and Practices
- **C** Facilitate Exchange of Information, Knowledge and Technology
- **D** Enable Cross-Disciplinary and Inter-Sectoral Engagement
- **E** Encourage Research and Support Development of Tools to Extend Innovation into Field Practices
- **F** Facilitate Capacity Development

For more information on ICID Vision 2030, pleas e access document on 'A Road Map to ICID Vision 2030' available on ICID website - http://www.icid.org/icid_vision2030.pdf

26th ICID International Congress on Irrigation and Drainage

26e Congrès International des Irrigations et du Drainage de la CIID

12-17 October 2026, Marseille, France

***Theme** / Thème*

Water and Agricultural Resilience in the Face of Climate Change

Eau Et Résilience De L'agriculture Face Au Défi Climatique

QUESTION 66: **In the Face of Climate Change, How Can Irrigation and Drainage Contribute to the Agro-Ecological Transition?**
Face au défi climatique, comment l'irrigation et le drainage peuvent contribuer à la transition agroécologique ?

QUESTION 67: **Innovative Technology and Practices for Increasing Water Use Efficiency: Irrigation Management and Services, Remote Sensing, Irrigation Equipment,…Where Do We Stand?**
Technologies et pratiques innovantes pour accroître l'efficacité de l'utilisation de l'eau : Gestion et services d'irrigation, télé-détection, matériel d'irrigation,... Où en sommes-nous ?

QUESTION 68: **Non-Conventional Water (REUSE, Desalination): Can We Really Loosen the Grip on the Resource and for What Uses?**
Eaux non conventionnelles (REUSE, dessalement) : peut-on réellement desserrer l'étau de la ressource et pour quels usages ?

ICID•CIID

INTERNATIONAL COMMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE (ICID)

COMMISSION INTERNATIONALE DES IRRIGATIONS ET DU DRAINAGE (CIID)

48 Nyaya Marg, Chanakyapuri, New Delhi 110021, India
Tel: +91-11-41510420; E-mail: icid@icid.org; Website: http://www.icid.org

ICID accepts no responsibility for the statements made, opinions expressed, maps included and accuracy of URLs for external or third-party Internet Web sites in these transactions

La CIID se degage de toute responsabilité pour les déclarations faites, les opinions formulées, les cartes reproduites et l'exactitude de l'URL des sites web externes ou tiers dans ces Actes

ICID Transaction No. 36

© International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), 2026

ISBN: 978-81-89610-55-5

Please use the following reference to the transaction:

ICID, 2026: Water and Agricultural Resilience in the Face of Climate Change
Transactions of the 26th ICID International Congress on Irrigation and Drainage, 12-17 October 2026, Marseille, France – Abstract Volume: Question 66, 67, and 68, 662 pp.

CONTENTS
TABLE DES MATIERES

Page No.

Foreword / Avant-Propos **5**

Preface / Préface **9**

Congress Theme / Théme du Congrès **13**

QUESTION 66: In the Face of Climate Change, How Can Irrigation and Drainage Contribute to the Agro-Ecological Transition? **19**
Face au défi climatique, comment l'irrigation et le drainage peuvent contribuer à la transition agroécologique?
— General Report / Rapport Général

Q.66.1: At the plot, landscape, and watershed scales, what processes are involved in the interaction between irrigation/drainage and agroecology, and how might we model them? / **61**
À l'échelle de la parcelle, du paysage et du bassin versant, quels sont les processus impliqués dans l'interaction entre l'irrigation/le drainage et l'agroécologie, et comment pouvons-nous les modéliser?

Q.66.2: At the farm, territorial, sectoral, and food system levels, what are the characteristics of irrigated/drained agroecological systems and the methods for supporting the agroecological transition of irrigated/drained systems? **123**
Aux niveaux de l'exploitation agricole, du territoire, du secteur et du système alimentaire, quelles sont les caractéristiques des systèmes agroécologiques irrigués/drainés ainsi que les méthodes pour soutenir la transition agroécologique des systèmes irrigués/drainés?

QUESTION 67: Innovative Technology and Practices for Increasing Water Use Efficiency: Irrigation Management and Services, Remote Sensing, Irrigation Equipment,…Where Do We Stand? **183**
Technologies et pratiques innovantes pour accroître l'efficacité de l'utilisation de l'eau : Gestion et services d'irrigation, télédétection, matériel d'irrigation,... Où en sommes-nous ?
— General Report / Rapport Général

Q.67.1: Irrigation practices and technologies at the plot and farm levels reflect individual skills, objectives, decisions, and philosophies. How can these be evaluated and improved? **213**
Les pratiques et technologies d'irrigation à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation agricole reflètent les compétences individuelles, les objectifs, les décisions et les philosophies. Comment peut-on les évaluer et les améliorer?

Q.67.2: **At the territorial scale, irrigation water management is jointly influenced by agricultural, economic, environmental, and regulatory drivers. How can the decision-making process be explained and improved?** 383
À l'échelle territoriale, la gestion de l'eau d'irrigation est influencée conjointement par des facteurs agricoles, économiques, environnementaux et réglementaires. Comment est-ce que le processus de prise de décision peut expliquer et améliorer?

Question 68: **Non-Conventional Water (REUSE, Desalination): Can We Really Loosen the Grip on the Resource and for What Uses?** 499
Eaux non conventionnelles (REUSE, dessalement) : peut-on réellement desserrer l'étau de la ressource et pour quels usages?
— General Report / Rapport Général

Q.681: **In the context of water reuse (REUSE), how can integrated, interdisciplinary, and territorial approaches contribute to overcoming sociological, economic, and regulatory obstacles?** 561
Dans le contexte de la réutilisation de l'eau (REUSE), comment est-ce que des approches intégrées, interdisciplinaires et territoriales peuvent contribuer à surmonter les obstacles sociologiques, économiques et réglementaires?

Q.68.2: **How can a desalination strategy be designed and developed to specifically meet agricultural needs, both in quantitative and qualitative terms?** 615
Comment est-ce qu'une stratégie de dessalement peut être conçue et développée pour répondre spécifiquement aux besoins agricoles, tant sur le plan quantitatif que qualitatif?

General Reporter and Panel of Experts / Rapporteur Général et Groupe d'experts 635

— General Reporter Question 66 Question 67, and Question 68 / Rapporteur Général Question 66, Question 67 et Question 68 653

Author Index / Index des auteurs

FOREWORD



Dear Colleagues,

Greetings From ICID!

Agriculture stands at the confluence of two defining pressures of our time: the growing demand for food, fibre and water, and a climate that is becoming less predictable, more extreme and increasingly affecting livelihoods. Irrigation and drainage remain indispensable instruments of agricultural resilience. They are not relics of an earlier development model; they are living systems that must now be redesigned in order to protect soils, biodiversity and communities while securing production.

It is therefore both timely and fitting that the 26th International Congress on Irrigation and Drainage and the 77th Meeting of the International Executive Council convene in Marseille from 12 to 17 October 2026 under the theme “Water and agricultural resilience in the face of climate change.” We are honoured that this Congress is hosted by the French National Committee of ICID, Eau, Agriculture et Territoires (EAT), in a Mediterranean city whose history, landscapes and water challenges speak directly to the questions before us.

The scientific programme is organised around three Questions that will structure our debate within the Congress. Question 66 refers to how irrigation and drainage can contribute to the agro-ecological transition in a changing climate, that is how water control can support diversified cropping, soil health, landscape connectivity and reduced chemical dependence, rather than work against them. Question 67 takes on stock of innovative technologies and practices for water-use efficiency: irrigation management and services, remote sensing, equipment and digital tools, and the gap that still separates what is possible from what is widely applied in the field. Question 68 examines non-conventional water, reuse and desalination, and whether these sources can genuinely ease pressure on fresh water resources, for which uses, under which safeguards, and at what social and environmental cost.

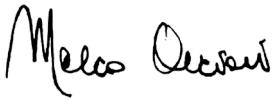
ICID’s Congresses have, since 1951, provided a preciously rare meeting ground for engineers, scientists, planners, farmers, young professionals and policymakers.

Marseille will continue that tradition. Alongside the technical sessions, the 77th IEC will conduct the governance of our Commission; workshops, side events and exchanges with international partners will extend the conversation beyond the three Questions to the institutions, financial actors and stakeholders that determine whether knowledge becomes practice.

This publication is offered as a companion to those discussions. It brings together the abstracts of accepted papers and posters and the background material that frames each Question, so that participants may arrive prepared to listen, to contest and to build common ground. I trust it will enrich your engagement throughout the week.

On behalf of ICID, I want to thank EAT, the organising and scientific committees, the authors and reviewers, and all partners who have made this Congress possible. I wish every delegate a productive and memorable 26th Congress in Marseille.

With best regards



Dr. Marco Arcieri
President
International Commission on Irrigation and Drainage (ICID)

AVANT-PROPOS



Chers collègues,

Salutations de la Commission internationale des irrigations et du drainage!

L'agriculture se trouve à la confluence de deux pressions déterminantes de notre époque : la demande croissante en nourriture, en fibres et en eau d'une part, et un climat qui devient moins prévisible et plus extrême, affectant de plus en plus les moyens de subsistance d'autre part. L'irrigation et le drainage demeurent des instruments indispensables à la résilience agricole. Loin d'être des vestiges d'un modèle de développement révolu, ce sont des systèmes vivants qu'il convient désormais de remodeler pour protéger les sols, la biodiversité et les communautés, tout en sécurisant la production.

Il est donc tout à fait opportun et approprié que le 26e Congrès international des irrigations et du drainage et la 77ème réunion du Conseil exécutif international se tiennent à Marseille, du 12 au 17 octobre 2026, portant sur le thème : «L'eau et la résilience de l'agriculture face au défi climatique». Nous sommes honorés que ce congrès soit accueilli par le Comité national français de la CIID, « Eau, Agriculture et Territoires » (EAT), dans une ville méditerranéenne dont l'histoire, les paysages et les défis liés à l'eau répondent directement aux questions qui nous occupent.

Le programme scientifique s'organise autour de trois questions qui structureront notre débat au cours du Congrès. La Question 66 se réfère à la façon dont l'irrigation et le drainage peuvent contribuer à la transition agro-écologique dans un contexte de changement climatique, c'est-à-dire la manière dont le contrôle de l'eau peut soutenir la diversification des cultures, la santé des sols, la connectivité du paysage et la réduction de la dépendance aux produits chimiques, plutôt que de travailler contre eux. La Question 67 fait le point sur les technologies et pratiques innovantes en matière d'efficacité de l'utilisation de l'eau — gestion et services d'irrigation, télédétection, équipements et outils numériques — ainsi que sur l'écart persistant qui existe entre les possibilités techniques et les pratiques réellement déployées sur le terrain. La question 68 examine les ressources en eau non conventionnelles, la réutilisation et le dessalement, et se demande si ces sources peuvent réellement

réduire la pression sur les ressources en eau douce, et pour quels usages, sous quelles garanties, et à quel coût social et environnemental.

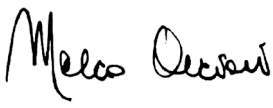
Depuis 1951, les congrès de la CIID offrent un lieu de rencontre privilégié et rare aux ingénieurs, aux scientifiques, aux planificateurs, aux agriculteurs, aux jeunes professionnels et aux décideurs politiques. Marseille continuera cette tradition. Parallèlement aux sessions techniques, la 77ème réunion du Conseil exécutif international dirigera la gouvernance de notre Commission; des ateliers, des événements parallèles et des échanges avec des partenaires internationaux élargiront la réflexion au-delà des trois thématiques principales pour inclure les institutions, les acteurs financiers et les parties prenantes qui déterminent la transformation des connaissances en pratiques concrètes.

Cette publication est proposée comme un complément à ces discussions. Elle recueille les résumés des communications et les affiches retenus ainsi que le document de référence qui encadre chaque question, afin que les participants puissent arriver prêts à écouter, à discuter et à construire un terrain d'entente. J'espère qu'elle enrichira votre participation tout au long de la semaine.

Au nom de la CIID, je tiens à remercier EAT, les comités d'organisation et scientifique, les auteurs et les critiques, ainsi que tous les partenaires qui ont rendu ce Congrès possible. Je souhaite à chaque délégué un 26e Congrès fructueux et mémorable à Marseille.

Avec mes meilleures salutations,

Le Président
Commission Internationale des Irrigations et du Drainage (CIID),



Dr. Marco Arcieri

PREFACE



Dear Colleagues,

Greetings from ICID, Central Office!

Ensuring a sufficient and nutritious food supply in a rapidly changing climate requires irrigation and drainage systems that are more efficient, more equitable and more compatible with agro-ecological principles. Population growth continues to raise demand for food, fibre and rural livelihoods, while water, arable land and energy remain finite. Climate change compounds these constraints through shifting rainfall, more frequent extremes and rising evaporative demand. At the same time, it creates an opening to redesign water management so that it safeguards soils and aquifers, supports diversified farming systems, and balances competing uses across basins and territories.

The 26th International Congress on Irrigation and Drainage, held in conjunction with the 77th International Executive Council (IEC) Meeting, takes place from 12 to 17 October 2026 in Marseille, France. Organised with the French National Committee of ICID, Eau, Agriculture et Territoires (EAT), the Congress offers a structured setting in which experts, practitioners, farmers, young professionals and policymakers can examine shared challenges of water scarcity and climate risk. The theme of the Congress is “Water and agricultural resilience in the face of climate change.” It is explored through three Congress Questions: Question 66, on how irrigation and drainage can contribute to the agro-ecological transition; Question 67, on innovative technologies and practices for increasing water-use efficiency, including management and services, remote sensing and equipment; and Question 68, on non-conventional water—reuse and desalination—and whether these sources can loosen pressure on conventional resources, for which uses and under which safeguards.

I wish to thank the international partners who have enriched the technical framing of this Congress, including FAO, the World Bank, ADB, IWMI, IFAD and other members of the International Technical Advisory Committee. Their background contributions and guidance have helped to give each Question a clear analytical foundation. Authors

from many countries responded to the call for papers. Following a meticulous review, 222 abstracts have been approved for inclusion in the Congress proceedings.

Numerous specialists gave their time, at the request of the ICID Central Office and the host Scientific Committee, to serve as international reviewers. I express my sincere gratitude to every member of the review process for the care with which abstracts and papers were assessed. My thanks also go to the host organisers at EAT—in particular Mr. Bruno Grawitz, Dr. Sami Bouarfa, Ms. Céline Papin and their colleagues—for the substantial work of convening the Congress in Marseille.

Last but not least, I record my appreciation to the ICID Central Office team, including Mr. Rishi Srivastava, Mr. Hari Prakash Chaurasia, Mr Prakash Varadarajan, Mr Mukesh Barthwal, Mr Anurag Mamgain, and Mr. Keshav Dev Tanwar, and to other Central Office staff, for their dedication in bringing this publication out in time for the Forum of debate that the Congress is meant to be.

With Best Regards,



Dr. R.K. Gupta
Secretary General
International Commission on Irrigation and Drainage (ICID)

PREFACE



Chers collègues,

Salutations du Bureau central de la Commission internationale des irrigations et du drainage!

Assurer un approvisionnement alimentaire suffisant et nutritif dans un climat en évolution rapide nécessite des systèmes d'irrigation et de drainage plus efficaces, plus équitables et plus compatibles avec les principes agro-écologiques. La croissance démographique continue d'accroître la demande en nourriture, en fibres et en moyens de subsistance ruraux, tandis que les ressources en eau, les terres arables et l'énergie restent limitées. Le changement climatique aggrave ces contraintes en raison de l'évolution des régimes de précipitations, de la fréquence accrue des phénomènes extrêmes et de l'augmentation de la demande d'évaporation. En même temps, il offre l'opportunité de remodeler la gestion de l'eau afin de protéger les sols et les aquifères, soutient les systèmes agricoles diversifiés et équilibre les usages concurrents à l'échelle des bassins et des territoires.

Le 26e Congrès international des irrigations et du drainage, organisé conjointement avec la 77ème réunion du Conseil exécutif international (CEI), se tiendra du 12 au 17 octobre 2026 à Marseille, en France. Organisé par le Comité national français de la CIID, Eau, Agriculture et Territoires (EAT), le Congrès offre un cadre structuré dans lequel les experts, les praticiens, les agriculteurs, les jeunes professionnels et les décideurs peuvent étudier les défis communs liés à la pénurie d'eau et aux risques climatiques. Le congrès portera sur le thème « L'eau et la résilience de l'agriculture face au défi climatique». Il est abordé à travers trois questions : Question 66, sur la façon dont l'irrigation et le drainage peuvent contribuer à la transition agro-écologique; Question 67, sur les technologies et pratiques innovantes pour accroître l'efficacité de l'utilisation de l'eau, y compris la gestion et les services d'irrigation, la télédétection et le matériel d'irrigation; et la question 68, sur l'eau non conventionnelle—réutilisation et dessalement — et la capacité de ces sources à réduire la pression sur les ressources conventionnelles, ainsi que sur les usages et les garanties associés.

Je tiens à remercier les partenaires internationaux qui ont enrichi la structure technique de ce Congrès, y compris la FAO, la Banque mondiale, la BAD, l'IWMI, le FIDA et d'autres membres du Comité consultatif technique international. Leurs contributions préparatoires et leurs orientations ont permis d'asseoir chaque question sur une base analytique claire. Des auteurs de nombreux pays ont répondu à l'appel à communications. À l'issue d'un examen minutieux, 222 résumés ont été retenus pour inclusion dans les actes du Congrès.

De nombreux spécialistes ont consacré du temps, à la demande du Bureau central CIID et du Comité scientifique hôte, pour agir en tant que critiques internationaux. J'exprime ma sincère gratitude à tous les membres impliqués dans le processus d'évaluation pour le soin avec lequel les résumés et les articles ont été évalués. Je tiens également à remercier les organisateurs hôtes EAT — en particulier M. Bruno Grawitz, le Dr Sami Bouarfa, Mme Céline Papin et leurs collègues — pour le travail considérable accompli afin de réunir le Congrès à Marseille.

Enfin et surtout, je tiens à exprimer ma reconnaissance à l'équipe du Bureau central CIID, y compris M. Rishi Srivastava, M. Hari Prakash Chaurasia, M. Prakash Varadarajan, M. Mukesh Barthwal, M. Anurag Mamgain et M. Keshav Dev Tanwar, ainsi qu'aux autres membres du personnel du Bureau central, pour leur dévouement à faire paraître cette publication à temps pour le Forum de débat que le Congrès est censé être bien.

Avec mes meilleures salutations,

Le Secrétaire général
Commission Internationale des Irrigations et du Drainage (CIID),



Dr. R.K. Gupta

CONGRESS THEME:

WATER AND AGRICULTURAL RESILIENCE IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE

Under this theme, the congress will bring together stakeholders from across the globe – researchers, engineers, institutions, public decision-makers, NGOs, and civil society representatives – to share knowledge, innovations, and experiences on the core challenges of irrigation and drainage.

These topics have never been more relevant. Irrigated agriculture, which covers only 20% of cultivated land, produces nearly 40% of the world's food while accounting for 70% of global water consumption. In a world facing population growth, resource scarcity, soil degradation, and extreme climate events, managing water effectively has become a key condition for agricultural resilience.

This congress is resolutely action-oriented. It will offer a moment to assess and discuss available levers: technological innovations (such as smart irrigation systems, remote sensing, high-efficiency equipment), agroecological practices, public policies, wastewater reuse, and new forms of international cooperation — all essential tools to support the transition towards efficient and sustainable agricultural systems.

The choice of Marseille as host city is a meaningful one. As a Mediterranean city at the crossroads of cultures and climate issues, it embodies both the tensions and opportunities of water management in constrained environments. With its dynamic research ecosystem and strong commitment to sustainability, Marseille also provides fertile ground for dialogue and innovation.

QUESTION 66: IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE, HOW CAN IRRIGATION AND DRAINAGE CONTRIBUTE TO THE AGRO-ECOLOGICAL TRANSITION?

Agroecology is now widely recognized as the design and implementation of sustainable agriculture based on ecological principles. It embraces a holistic, multi-scale, and multi-actor approach to reshape food systems in response to environmental, economic, and social challenges.

Traditionally, irrigation and drainage—both surface and sub-surface—have been used to manage water availability, by bringing water in the absence of rain and removing excess water when rainfall is too abundant. These tools are often associated with input-intensive and environmentally harmful agro-industrial systems, seemingly distant from agroecological principles.

However, in the face of climate change, both irrigation and drainage should be reconsidered not merely as tools for intensification, but as key components of climate-resilient and ecologically grounded systems. As such, they can be reframed as nature-based solutions that stabilize yields, improve soil health, reduce environmental impacts, and support diversified production.

Emerging research—although still limited—suggests that these water management practices can actively contribute to agroecological transitions, especially when combined with traditional knowledge and practices adapted to local contexts. Policy and economic instruments will also play a crucial role in encouraging this shift, by aligning incentives with long-term sustainability goals.

Despite their potential, the links between agroecology and irrigation remain underexplored: as of April 2023, only 38 scientific articles explicitly connect the two. Often, irrigation is mentioned superficially, without in-depth analysis of its transformative role.

This congress seeks to address that gap. It invites researchers, practitioners, and policymakers to explore how irrigation, surface and sub-surface drainage, and nature-based water solutions—when guided by agroecological principles—can help build sustainable, inclusive, and resilient food systems for the future.

SUB-QUESTIONS

Q.66.1: At the plot, landscape, and watershed scales, what processes are involved in the interaction between irrigation/drainage and agroecology, and how might we model them?

Q.66.2: At the farm, territorial, sectoral, and food system levels, what are the characteristics of irrigated/drained agroecological systems and the methods for supporting the agroecological transition of irrigated/drained systems?

QUESTION 67: INNOVATIVE TECHNOLOGY AND PRACTICES FOR INCREASING WATER USE EFFICIENCY: IRRIGATION MANAGEMENT AND SERVICES, REMOTE SENSING, IRRIGATION EQUIPMENT,... WHERE DO WE STAND?

In a context of increasing water scarcity and climate uncertainty, improving water use efficiency in agriculture has become both a necessity and an opportunity. Technological innovations—ranging from irrigation scheduling tools to smart equipment and remote sensing—offer promising pathways to optimize irrigation and reduce water consumption.

Today, a wide array of irrigation practices and scheduling strategies are available to help farmers apply the right amount of water, at the right time, and in the right place. These include precision irrigation, deficit irrigation, and smart irrigation systems that integrate soil, crop, and weather data to guide decisions.

Remote sensing technologies—using satellite, optical, thermal, and radar imagery—are increasingly accessible and can support real-time irrigation management at the field or territorial scale. When combined with in situ sensors and crop models, they help monitor plant stress, soil moisture, and evapotranspiration dynamics with greater accuracy.

Modelling also plays a key role in designing irrigation strategies, projecting water demand under different scenarios, and assessing the trade-offs between robustness and performance. These tools are essential for improving forecasting, decision support, and risk management in water-limited conditions.

Yet, beyond technology, the uptake of these innovations depends on effective governance frameworks. Water pricing and policy instruments must align with sustainability goals to encourage the adoption of efficient irrigation systems and discourage wasteful practices.

SUB-QUESTIONS

Q. 67.1: Irrigation practices and technologies at the plot and farm levels reflect individual skills, objectives, decisions, and philosophies. How can these be evaluated and improved?

Q. 67.2: At the territorial scale, irrigation water management is jointly influenced by agricultural, economic, environmental, and regulatory drivers. How can the decision-making process be explained and improved?

QUESTION 68: NON-CONVENTIONAL WATER (REUSE, DESALINATION): CAN WE REALLY LOOSEN THE GRIP ON THE RESOURCE AND FOR WHAT USES?

Water scarcity constitutes one of the most pressing challenges of the 21st century. Intensifying pressures on freshwater resources—driven by climate change, demographic expansion, and rising food demand—underscore the necessity of exploring non-conventional water sources, including wastewater reuse and desalination, as central components of water management strategies, particularly in arid and semi-arid regions such as the Mediterranean.

Globally, agriculture remains the dominant water-consuming sector, with an estimated annual withdrawal of 11,200 billion m^3. This demand encompasses approximately 2,000 billion m^3 of blue water (surface and groundwater), 8,400 billion m^3 of green water (rainwater), and 800 billion m^3 of grey water (polluted return flows from agricultural activities). In regions characterized by acute water stress, notably the Mediterranean basin, enhancing water-use efficiency and diversifying water supply sources, with non conventional resources, represent critical measures to ensure long-term sustainability. Within these issues, human, social and economic considerations continue to represent a critical determinant.

The reuse of a treated wastewater represents a viable strategy to reduce pressure on conventional freshwater resources while fostering the principles of a circular economy. Such reclaimed water can be applied in agricultural irrigation, aquifer recharge, as well as in industrial and urban applications. Similarly, desalination constitutes an important non-conventional water supply option, particularly in coastal regions; however, its deployment requires careful evaluation due to its significant energy requirements and potential environmental and public health impacts.

SUB-QUESTIONS

Q. 68.1: In the context of water reuse (REUSE), how can integrated, interdisciplinary, and territorial approaches contribute to overcoming sociological, economic, and regulatory obstacles?

Q. 68.2: How can a desalination strategy be designed and developed to specifically meet agricultural needs, both in quantitative and qualitative terms?

THEME DU CONGRES :

EAU ET RÉSILIENCE DE L'AGRICULTURE FACE AU DÉFI CLIMATIQUE

Dans le cadre de ce thème, le Congrès réunira des parties prenantes du monde – chercheurs, ingénieurs, institutions, décideurs publics, ONG et représentants de la société civile – pour partager leurs connaissances, innovations et expériences sur les défis fondamentaux à relever concernant l'irrigation et le drainage.

Ces sujets n'ont jamais été aussi pertinents. L'agriculture irriguée, qui ne couvre que 20% de la superficie cultivées, produit près de 40% de l'alimentation mondiale tout en constituant 70% de la consommation mondiale de l'eau. Dans un monde confronté à la croissance démographique, à la rareté des ressources, à la dégradation des sols et aux événements climatiques extrêmes, la gestion efficace de l'eau est devenue une condition clé de la résilience agricole.

Ce congrès est résolument orienté vers l'action. Il offrira l'occasion de faire le point et de discuter des leviers disponibles : innovations technologiques (comme les systèmes d'irrigation intelligents, la télédétection, les équipements à haute efficacité), pratiques agroécologiques, politiques publiques, réutilisation des eaux usées, et nouvelles formes de coopération internationale — tous les outils essentiels pour soutenir la transition vers des systèmes agricoles efficaces et durables.

Le choix de Marseille en tant que ville hôte est significatif. Ville méditerranéenne située au carrefour des cultures et des enjeux climatiques, elle incarne à la fois les tensions et les occasions liées à la gestion de l'eau en milieu contraint. Grâce à son écosystème de recherche dynamique et à son engagement fort en faveur du développement durable, Marseille offre également un terrain propice au dialogue et à l'innovation.

QUESTION 66: FACE AU DÉFI CLIMATIQUE, COMMENT L'IRRIGATION ET LE DRAINAGE PEUVENT CONTRIBUER À LA TRANSITION AGROÉCOLOGIQUE?

L'agroécologie est maintenant largement reconnue comme la conception et la mise en œuvre d'une agriculture durable basée sur des principes écologiques. Elle adopte une approche holistique, multi-échelle et multi-acteurs pour refaçonner les systèmes alimentaires afin de répondre aux défis environnementaux, économiques et sociaux.

Traditionnellement, l'irrigation et le drainage — à la fois de surface et souterrains — ont été utilisés pour gérer la disponibilité de l'eau, en apportant de l'eau dans l'absence de précipitations et en évacuant l'eau excédentaire lorsque les précipitations sont trop abondantes. Ces outils sont souvent associés à des systèmes agro-industriels intensifs en intrants et nuisibles à l'environnement, apparemment éloignés des principes agroécologiques.

Cependant, face au changement climatique, l'irrigation et le drainage doivent être tenu en compte non seulement comme des outils d'intensification, mais aussi comme des composantes clés de systèmes résistantes au climat et fondés sur l'écologie. À ce titre, ils peuvent être reformulés comme des solutions fondées sur la nature, capables de stabiliser les rendements, d'améliorer la santé des sols, de réduire les impacts environnementaux et de soutenir une production diversifiée.

Des recherches émergentes — bien qu'elles soient encore limitées — indiquent que ces pratiques de gestion de l'eau peuvent contribuer activement aux transitions agroécologiques, en particulier lorsqu'elles sont associées à des connaissances et pratiques traditionnelles adaptées aux contextes locaux. Les instruments politiques et économiques joueront également un rôle important dans ce changement, en alignant les incitations sur les objectifs de durabilité à long terme.

Malgré leur potentiel, les liens entre l'agroécologie et l'irrigation restent peu explorés : en avril 2023, seuls 38 articles scientifiques ont explicitement établi un lien entre les deux. Souvent, l'irrigation est mentionnée de manière superficielle, sans aucune analyse approfondie de son rôle transformateur.

Ce congrès cherche à combler cette lacune. Il invite les chercheurs, les praticiens et les décideurs politiques à explorer la manière dont l'irrigation, le drainage de surface et souterrain, ainsi que les solutions d'eau fondées sur la nature — lorsqu'ils sont guidés par des principes agroécologiques — peuvent aider à construire des systèmes alimentaires durables, inclusifs et résistants pour l'avenir.

SOUS-QUESTIONS

Q.66.1: À l'échelle de la parcelle, du paysage et du bassin versant, quels sont les processus impliqués dans l'interaction entre l'irrigation/le drainage et l'agroécologie, et comment pouvons-nous les modéliser?

Q.66.2: Aux niveaux de l'exploitation agricole, du territoire, du secteur et du système alimentaire, quelles sont les caractéristiques des systèmes agroécologiques irrigués/drainés ainsi que les méthodes pour soutenir la transition agroécologique des systèmes irrigués/drainés?

QUESTION 67: TECHNOLOGIES ET PRATIQUES INNOVANTES POUR ACCROÎTRE L'EFFICACITÉ DE L'UTILISATION DE L'EAU : GESTION ET SERVICES D'IRRIGATION, TÉLÉDÉTECTION, MATÉRIEL D'IRRIGATION,... OÙ EN SOMMES-NOUS ?

Dans un contexte de la croissance de la pénurie d'eau et d'incertitude climatique, l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans l'agriculture est devenue à la fois une nécessité et une occasion. Les innovations technologiques — allant des outils de planification de l'irrigation aux équipements intelligents et à la télédétection — offrent des voies prometteuses pour optimiser l'irrigation et réduire la consommation d'eau.

Aujourd'hui, il existe un large éventail de pratiques d'irrigation et de stratégies de planification permettant aux agriculteurs d'appliquer la bonne quantité d'eau, au bon moment et au bon endroit. Il s'agit notamment de l'irrigation de précision, de l'irrigation déficitaire et des systèmes d'irrigation intelligents qui intègrent les données relatives au sols, aux cultures et aux conditions météorologiques pour guider la prise de décisions.

Les technologies de télédétection — utilisant l'imagerie satellitaire, optique, thermique et radar — sont de plus en plus accessibles et peuvent soutenir la gestion de l'irrigation en temps réel à l'échelle de la parcelle ou du territoire. Lorsqu'elles sont combinées avec des capteurs in situ et des modèles de culture, elles facilitent la surveillance du stress hydrique des plantes, de l'humidité du sol et de la dynamique de l'évapotranspiration avec une plus grande précision.

La modélisation joue également un rôle important dans la conception des stratégies d'irrigation, la projection de la demande en eau selon différents scénarios et l'évaluation des compromis entre vigueur et performance. Ces outils sont essentiels pour améliorer les prévisions, l'aide à la décision et la gestion des risques dans des conditions de disponibilité limitée en eau.

Pourtant, au-delà de la technologie, l'adoption de ces innovations dépend de cadres de gouvernance efficaces. La tarification de l'eau et les instruments politiques doivent s'aligner sur les objectifs de durabilité afin d'encourager l'adoption de systèmes d'irrigation efficaces et de décourager les pratiques de gaspillage.

SOUS-QUESTIONS

Q. 67.1 : Les pratiques et technologies d'irrigation à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation agricole reflètent les compétences individuelles, les objectifs, les décisions et les philosophies. Comment peut-on les évaluer et les améliorer?

Q. 67.2 : À l'échelle territoriale, la gestion de l'eau d'irrigation est influencée conjointement par des facteurs agricoles, économiques, environnementaux et réglementaires. Comment est-ce que le processus de prise de décision peut expliquer et améliorer?

QUESTION 68: EAUX NON CONVENTIONNELLES (REUSE, DESSALEMENT): PEUT-ON RÉELLEMENT DESSERRER L'ÉTAU DE LA RESSOURCE ET POUR QUELS USAGES?

La pénurie d'eau constitue l'un des défis les plus pressants du XXIe siècle. L'intensification des pressions sur les ressources en eau douce — en raison du changement climatique, de l'expansion démographique et de la croissance de demande alimentaire — met l'accent sur la nécessité d'explorer les sources d'eau non conventionnelles, y compris la réutilisation des eaux usées et le dessalement, en tant qu'éléments centraux des stratégies de gestion de l'eau, en particulier dans les régions arides et semi-arides telles que la Méditerranée.

À l'échelle mondiale, l'agriculture reste le principal secteur consommateur d'eau, avec un prélèvement annuel estimé à 11 200 milliards de m³ d'eau. Cette demande englobe environ 2 000 milliards de m³ d'eau bleue (eaux de surface et souterraines), 8 400 milliards de m³ d'eau verte (eaux pluviales) et 800 milliards de m³ d'eaux grises (débits recyclés pollués provenant des activités agricoles).

Dans les régions caractérisées par un stress hydrique grave, notamment le bassin méditerranéen, l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et la diversification des sources d'approvisionnement en eau, avec l'aide des ressources non conventionnelles, représentent des mesures essentielles pour garantir la durabilité à long terme. Au sein de ces questions, les considérations humaines, sociales et économiques continuent de représenter un déterminant essentiel.

La réutilisation des eaux usées traitées constitue une stratégie viable pour qu'elle réduise la pression sur les ressources en eau douce conventionnelles tout en favorisant les principes de l'économie circulaire. Ces eaux recyclées peuvent être utilisées pour l'irrigation agricole, la réalimentation des aquifères ainsi que pour des applications industrielles et urbaines. De même, le dessalement représente une option importante d'approvisionnement en eau non conventionnelle, en particulier dans les régions côtières; toutefois, sa mise en œuvre exige une évaluation approfondie en raison de ses besoins énergétiques élevés et de ses impacts potentiels sur l'environnement et la santé publique.

SOUS-QUESTIONS

Q.681 : Dans le contexte de la réutilisation de l'eau (REUSE), comment est-ce que des approches intégrées, interdisciplinaires et territoriales peuvent contribuer à surmonter les obstacles sociologiques, économiques et réglementaires?

Q.68.2: Comment est-ce qu'une stratégie de dessalement peut être conçue et développée pour répondre spécifiquement aux besoins agricoles, tant sur le plan quantitatif que qualitatif?

QUESTION 66:

IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE, HOW CAN IRRIGATION ANDDRAINAGE CONTRIBUTE TO THE AGRO-ECOLOGICAL TRANSITION?

FACE AU DÉFI CLIMATIQUE, COMMENT L'IRRIGATION ET LE DRAINAGE PEUVENT CONTRIBUER À LA TRANSITION AGROÉCOLOGIQUE?

GENERAL REPORTER / RAPPORTEUR GÉNÉRAL

Dr. Vinay Nangia (ICARDA)

PANEL OF EXPERTS / GROUPE D'EXPERTS

Delphine Leenhardt (France)

Suat Irmak (USA)

Tian Fuqiang (China)

Giulio Castelli (Italy)

Istvan Szamosvari (Hungary)

Vasudha Sharma (USA)

Vaishali Sharda (USA)

Keigo Noda (Japan)

Meetpal Kukal (USA)

Rafat Nael (Iraq)

QUESTION 66:

IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE, HOW CAN IRRIGATION AND DRAINAGE CONTRIBUTE TO AGRO-ECOLOGICAL TRANSITION?

GENERAL REPORT

Dr. Vinay Nangia (ICARDA)*
General Reporter

ABSTRACT

Agroecology is widely recognized as a framework for designing sustainable food systems based on ecological principles, yet irrigation and drainage—the water management infrastructures upon which 40% of global food production depends on—remain largely absent from the agroecological discourse. A systematic review of scientific literature identified only 38 articles explicitly linking irrigation and agroecology as of April 2023, with most treating irrigation superficially rather than as a transformative component of agroecological systems (Leauthaud et al., 2025). This position paper synthesizes the current state of knowledge on the intersection of irrigation, drainage, and agroecology, argues that the disciplinary divide between these fields is no longer tenable under climate change, and proposes that irrigation and drainage be evaluated as multiservice interventions within coupled human–water systems, distinguishing conventional infrastructure from hybrid grey–green and ecosystem-based measures. We draw on emerging evidence from precision and variable-rate irrigation, deficit irrigation, conservation agriculture–irrigation interactions, controlled drainage, water harvesting, and diversified irrigated cropping systems across diverse geographic and institutional contexts—from the Indo-Gangetic Plains and the Tarim Basin to the Mediterranean, sub-Saharan Africa, and the American Midwest. Drawing on the collective expertise of the Question 66 co-lead team, we propose six research priorities that emerge from gaps identified in the literature and from practical challenges faced by irrigation and drainage professionals worldwide. We conclude that the 26th ICID Congress provides a critical platform to bridge this knowledge gap and to reposition irrigation and drainage as integral components of climate-resilient, ecologically grounded food systems.

Keywords: agroecology, irrigation, drainage, multiservice irrigation, nature-based solutions, climate change, ecological transition, water productivity, ecosystem services, precision irrigation, water harvesting

Introduction: A Knowledge Divide that Climate Change Can No Longer Tolerate

Agroecology has emerged as a scientifically grounded framework for redesigning food systems based on ecological principles, encompassing agronomic, ecological, socioeconomic, political, and cultural dimensions (Wezel et al., 2020; FAO, 2018; HLPE, 2019; Murgia et al., 2026). Its premise is to produce sustainable food while working in harmony with natural principles. It embraces a holistic, multi-scale, and multi-actor approach to reshaping food systems in response to environmental, economic, and social challenges in dryland and irrigated agricultural systems. Thus, agroecological as well as supporting functions such as agricultural production practices (soil and water conservation; irrigation management;

* Research Team Leader - Soils, Waters and Agronomy, International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA), Rabat, Morocco. E-mail: v.nangia@cgiar.org

fertilizer, weed and pest management, crop management; and other agricultural management practices should work together in harmony to achieve greater positive impact on global food security while protecting and sustaining agroecological functions and environmental services. While irrigated agriculture accounts for approximately 20% of global cultivated land, it produces 40% of the world's food (FAO, 1996; Grafton et al., 2018). Globally, about 70% of freshwater withdrawals are for irrigated agriculture. Both agroecology and irrigation are promoted as climate change adaptation measures (IPCC, 2023; Pörtner et al., 2022), and both aim to enhance the sustainability of food systems to meet the rapidly growing world population's food and fiber demand. Thus, irrigated agriculture will continue to play a crucial role in meeting this demand, and its importance to societies and all humankind is only getting more critical over time, considering the negative implications of climate change on agricultural productivity (Irmak, 2023). Irmak et al. (2025) stated that with the projected need of 60% more food production to achieve food security by 2050, the challenge is how to achieve this goal with the same or even reduced water resources without sacrificing water's other ecological services and functions. They further suggested that the challenge is even greater when other stressors to this resource, such as climate change, pollution, poor management and policy, and landscape alterations, are taken into consideration.

Yet, in practice, these two spheres of knowledge and practice remain strikingly disconnected. Leauthaud et al. (2025), in the first systematic literature review at the interface of irrigation and agroecology, identified 38 scientific articles in the Clarivate Web of Science through April 2023. Of these, fewer than ten adopted an analytical and critical approach to the relationship, and irrigation was most often mentioned only superficially—as a farm feature rather than as a potential agroecological asset (Leauthaud et al., 2025) and a vital method for sustainable food production. The terms "irrigation" and "agroecology" were found to be statistically disconnected within the papers themselves, appearing in different sections and with weak interactions, suggesting that even when both concepts appear in the same study, they are rarely integrated (Leauthaud et al., 2025). This could potentially be due to the fact that the scientific community has not been explicitly making the case to collectively study these two spheres of practical concepts and evaluate their collective impact on natural resources, agricultural practices and agricultural productivity, which may be considered as a missed opportunity until now.

This disciplinary divide has deep structural roots. Irrigation and agroecology differ in their narratives (mainstream versus alternative agriculture), goals (efficiency and productivity versus health and livelihoods), approaches (technological versus holistic), scales of analysis and implementations (plot and irrigation system versus farm and local, regional or global food systems), and stakeholders (distinct associations, government ministries, and research laboratories) (Leauthaud et al., 2025; Fischer et al., 2025). These differences have led to missed opportunities to design irrigation systems that enhance ecosystem functions and services (Leauthaud & Leenhardt, 2025).

As climate change accelerates, this disconnect is no longer tenable. The IPCC (2023) has emphasized that climate change is already impacting water availability, agricultural productivity, and food security across regions, with the most severe effects concentrated in arid and semi-arid areas where irrigation is often the difference between crop failure and viable harvests. Zhao et al. (2026) demonstrated that climate change and irrigation expansion are already reshaping water pressure and upstream–downstream interactions in the Lancang–Mekong River Basin, with local water-saving gains increasingly offset by expanded irrigation at the basin scale—a finding with global implications for irrigated agroecosystems under climate stress. The question is no longer whether irrigation and drainage should be part of the agroecological transition, but how they can be redesigned and repositioned to contribute to it.

IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE, HOW CAN IRRIGATION AND DRAINAGE CONTRIBUTE TO AGRO-ECOLOGICAL TRANSITION?

Agroecology is recognized as the design and implementation of sustainable agriculture based on ecological principles and services. It embraces a holistic, multi-scale, and multi-actor approach to reshape food systems in response to environmental (including climate), economic, and social challenges.

Traditionally, irrigation and drainage—both surface and sub-surface—have been used to manage water availability, allocation and management by bringing water in the absence of rain and removing excess water when rainfall is too abundant to improve agricultural productivity. These tools are often associated with input-intensive and use of environmentally harmful agro-industrial systems, seemingly distant from agroecological principles.

However, in the face of climate change, both irrigation and drainage, together with water harvesting, should be reconsidered not merely as tools for intensification, but as key components of climate-resilient, ecologically sensitive and grounded systems. As such, they can be considered for their integration in nature-based solutions that stabilize or improve yields, improve soil health, reduce negative environmental impacts, and support diversified production.

Emerging research—although still limited—suggests that these water management practices can actively contribute to agroecological transitions, especially when combined with indigenous knowledge and traditional practices adapted to local contexts. Policy and economic instruments will also play a crucial role in encouraging this shift, by aligning incentives with long-term sustainability goals.

Despite their potential, the links between agroecology and irrigation and drainage remain underexplored: as of April 2023, only 38 scientific articles explicitly connect these management tools. Often, irrigation is mentioned superficially, without in-depth analysis of its transformative role and without connection to agroecological services considerations.

This congress seeks to address that gap. It invites researchers, practitioners, and policymakers to explore how irrigation, surface and sub-surface drainage, rainwater harvesting, and nature-based water solutions—when guided by agroecological principles—can help build sustainable, inclusive, and resilient food systems for the future.

The Current State of Knowledge: Irrigation as the "Invisible Sidekick" of Agroecology

A fragmented evidence base

The systematic review by Leauthaud et al. (2025) revealed that the scientific literature at the intersection of irrigation and agroecology is not only scarce but fragmented. Most of the 38 identified papers were confined to water budget analyses of cropping systems or to experimental manipulations testing individual agroecological practices under irrigated conditions on small (field) scales. Only a small number acknowledged the co-existence of irrigation and agroecology as compatible system components, and fewer still argued that irrigation offered an opportunity for agroecological systems (Mdee et al., 2019; Leauthaud et al., 2022a, 2022b; Romero et al., 2022; Altieri, 1992).

Several papers, conversely, explicitly opposed irrigation and agroecology, associating irrigation with intensive input use and agricultural industrialization (Perez Neira, 2016; Gross and Jaubert, 2019; Basche and Edelson, 2017). This opposition reflects a broader narrative in which irrigation is framed as a tool of the Green Revolution and agro-industrial systems, seemingly distant from agroecological principles (Leauthaud et al., 2025).

Emerging evidence at the field scale

Despite the overall scarcity, a number of recent studies have begun to demonstrate that irrigation and agroecological practices can be mutually reinforced when jointly designed:

Deficit irrigation and agroecological viticulture. Romero et al. (2022) provided the most comprehensive review to date of combining deficit irrigation strategies and agroecological practices in Mediterranean vineyards, arguing that irrigation and agroecology should be associated with jointly improving water use efficiency, productivity, and sustainability. Xue et al. (2025) demonstrated that delayed irrigation reduced total water consumption by 54.8% while improving economic benefits and reducing crop disease, suggesting that strategic water stress can serve both productivity and ecological functions.

Conservation agriculture under irrigated conditions. Kienzler et al. (2012) showed that conservation agriculture practices under irrigation altered water use patterns in Central Asia, while Mohammad et al. (2018) showed that direct-seeded rice under conservation agriculture in the Indo-Gangetic Plains reduced water consumption compared to transplanted puddled rice. Through well-planned, coordinated and executed research, demonstration, and education programs network (Agricultural Water Management Network, AWMN), Irmak (2023) showed a large-scale technology implementation in partnership with almost 1,000 growers (representing 1.20 million ha irrigated cropland), can result in water withdrawal reduction of 144 mm/ha per growing season due to the adoption of technologies and management strategies demonstrated and taught in the AWMN. Between 2005 and 2020, the AWMN is estimated to have reduced irrigation water withdrawal by over 5 billion m3 (5 km3; 4.1 million acre-ft), and this conserved water was made available for other agroecological uses. The AWMN has become the largest and most impactful research-based water management program in the United States, achieving substantial adoption of technology and information/knowledge transfer in agriculture through the strong, dedicated partnership of universities, private industry, state and federal agencies, producers, irrigation districts, and crop consultants. This indicates that, working in partnership with all professionals and practitioners involved in agriculture, water management, and agroecology settings, significant reductions can be achieved in irrigated agriculture that can be made available for protecting/sustaining the agroecological and environmental services. Kukal and Irmak (2021) reviewed conservation agriculture effects on soil water holding capacity and water-saving across diverse agroecological conditions, finding that CA effects on water-saving varied with management practices and agroecological context—a critical nuance for the irrigation–agroecology interface. Alletto et al (2022) showed that soil physical properties are strongly influenced by cropping systems, that the soil bulk density is generally higher under conservation agriculture, soil hydraulic conductivity is generally higher and more stable over time under conservation agriculture, and soil water retention is equivalent or slightly higher under conservation agriculture than in conventionally tilled soils. More recently, Devkota et al. (2025) showed that context-specific agronomic solutions integrating conservation agriculture with optimized irrigation achieved agronomic gains with reduced environmental footprints in irrigated drylands of Egypt.

Precision and variable-rate irrigation. Sharma and Irmak (2020) conducted economic comparisons of variable rate irrigation and fertigation with fixed (uniform) rate irrigation, demonstrating that site-specific water and nutrient management can improve both water productivity and economic returns while reducing input intensity—an outcome consistent with agroecological principles of input reduction and resource efficiency. Sharma and Irmak

(2021a) further demonstrated that the effectiveness of variable rate irrigation depends strongly on spatial variability of soil type, topography, and soil-water dynamics. Across three years and three soil types, they found that crop evapotranspiration and available soil water respond differently to irrigation and nitrogen management across landscape positions, demonstrating that uniform irrigation strategies may not adequately account for spatially heterogeneous crop water requirement. Sharda et al. (2022) advanced the spatial resolution of irrigation management by evaluating sub-field level crop water stress for variable rate irrigation, providing the technical foundation for irrigation scheduling that accounts for within-field heterogeneity—a prerequisite for managing diversified, agroecologically oriented cropping systems where water demand varies spatially and temporally. Irmak et al. (2025) and Irmak and Hinn (2025) showed how variable rate irrigation in different soil types can be effectively managed to enhance crop productivity and improve input use efficiency. Irmak et al. (2023) and Irmak and Mohammed (2023) investigated how different irrigation methods/ systems (subsurface drip irrigation, center pivot irrigation and gravity (furrow) irrigation) can be most efficiently and effectively managed for irrigation and nitrogen management to improve economic of maize production, increasing nitrogen use efficiency and crop water productivity to converse these critical resources and aid in protecting the agroecological services through reduction or minimizing the chemical contamination of ground and surface water resources and making more water available to agroecology platforms through advanced conservation and management practices.

Drip irrigation and organic fertigation. Several studies identified drip irrigation as a practice compatible with agroecological objectives, particularly when combined with organic fertigation strategies (Guzman and Alonso, 2008; Leauthaud et al., 2022b; Akakpo et al., 2021). Other research projects demonstrated effective irrigation and fertigation management strategies for subsurface drip irrigation under different soil, crop and irrigation methods and management practices (tillage, plant population density, etc.) in different climates to enhance crop water and nutrient use efficiency and improve yield under full, deficit and limited irrigation settings (Payero et al., 2008; Irmak et al., 2015; Irmak and Djaman, 2016; Yonts et al., 2018; Mohammed and Irmak, 2022; Irmak et al., 2022; Irmak et al., 2023; Irmak, 2024). Drip irrigation enables the use of concentrated organic fertilizers requiring less energy, and can be combined with cover crops and mulch to reduce evaporation (Wezel et al., 2014). However, the classification of drip irrigation as an agroecological practice has been questioned because of plastic consumption and rebound effects at larger spatial scales (Leauthaud et al., 2025; Grafton et al., 2018). Irmak et al. (2024) and Irmak et al. (2025) stated that in addition to traditional inputs (water, nutrients, chemicals) applied to soil and consumed by crops, the utilization/application of other inputs such as synthetic plastic in agriculture for a variety of applications has been increasing globally, causing environmental contamination and other challenges. Synthetic plastic mulching is particularly preferred for weed control in certain crops where few herbicides are available. Mulches made from synthetic polymers such as polyethylene are commonly used in agriculture. However, these petroleum-based polymers are stable/non-degradable, and their widespread use in agricultural fields can create serious environmental problems.

Cover crops and irrigation interactions. Rouge et al. (2022) demonstrated that irrigation can favor cover crop establishment and support their development to deliver desired ecosystem services, highlighting the interactive effects between water management and agroecological practices. Basche and Edelson (2017) described how practices promoting continuous living cover improve water management by changing the water balance and increasing soil hydrological functions. Irmak et al. (2018) stated that, in addition to supplying nitrogen and other beneficial nutrients and micronutrients to a subsequent cash crop, cover crops can also provide additional organic matter to the soil, which may improve soil organic matter, soil physical properties, and infiltration characteristics. Cover crops also have potential to improve the soil's capacity to carry machines and improve field accessibility (primarily in humid

areas with substantial precipitation) and remove excess water and maintain soil structural components.

Irrigation and crop diversification. Altieri (1992) saw irrigation as an opportunity for crop diversification and a way to improve system resilience, while Leauthaud et al. (2022a) described irrigation as an important factor in the development of agroforestry in olive groves in Tunisia. Mdee et al. (2019) showed in Tanzania that farms offered better livelihoods when agroecological production systems were implemented with joint access to irrigation.

Evidence at farm, territorial, and food system scales

Research at scales beyond the field plot remains particularly scarce. Moraine et al. (2016) showed that introducing lower-water-requirement cropping systems in water-stressed areas could affect water resources at the territorial scale, with less-irrigated crops such as alfalfa balancing irrigation water consumption at the watershed level while facilitating integrated crop-livestock systems. Galeana-Pizana et al. (2021) highlighted linkages between irrigation and food system characteristics, showing that small-scale irrigation could substantially increase smallholder crop yields in drier ecoregions where agroecological produce is sold in local markets.

Gross and Jaubert (2019), from a social science perspective, explored stories of failed implementation of both irrigation development projects and agroecological development projects in Burkina Faso, finding numerous similarities between the two and providing constructive critiques of how both are promoted without adequately accounting for smallholder farmers' diverse situations and strategies. The hydrological consequences of irrigation at the basin scale have been documented by Zhang et al. (2014), who showed that water-saving irrigation in the Tarim River basin oasis had complex implications for groundwater dynamics and sustainable water management, and by Zhao et al. (2026), who demonstrated that climate change and irrigation expansion are reshaping water pressure across the Lancang–Mekong basin—evidence that the agroecological transition of irrigated systems must be evaluated within its broader hydrological and sociohydrological context (Liu et al., 2014, 2015; Han et al., 2017)..

Climate Change as a Catalyst for Reconciliation

Climate change is intensifying the urgency of bridging the irrigation–agroecology divide. The IPCC Sixth Assessment Report (2023) documents increasing frequency and severity of droughts, altered precipitation patterns, and rising temperatures that disproportionately affect agricultural systems in water-scarce regions. Pörtner et al. (2022) emphasized that climate change impacts on food systems are mediated through water, making water management a central lever for climate adaptation.

In this context, irrigation and drainage should be reconsidered not merely as tools for intensification, but as key components of climate-resilient and ecologically grounded systems. They can contribute to nature-based or hybrid grey–green solutions when their design protects or restores ecosystem functions and delivers measurable biodiversity and human well-being benefits (Tarolli et al., 2026).. Supplemental irrigation—the application of small amounts of water at critical crop growth stages in predominantly rainfed systems—has been shown to more than double grain yield per drop in dryland farming systems across China, India, Iraq, Morocco, and Uzbekistan (Nangia et al., 2018; Devkota et al., 2023), demonstrating that the strategic use of irrigation can stabilize rainfed production under increasing climatic variability without transitioning to fully irrigated, input-intensive systems. Water harvesting can provide an ecosystem-based option at the rainfed–irrigated interface. Tarolli et al. (2026) co-authored a comprehensive review of nature-based solutions for soil and water conservation in an era of climate extremes, highlighting the role of rainwater management in rainfed systems.

Piemontese et al. (2020), in a global analysis of water harvesting potential, estimated the worldwide applicability of water harvesting from successful case studies, showing that these approaches can bridge the gap between rainfed vulnerability and irrigated stability without the environmental costs of conventional large-scale irrigation infrastructure. Villani and Castelli (2025) used a participatory modeling approach to explore storage strategies that combine large dams and small reservoirs in the context of climate change to study their complementarity providing the spatial planning tools needed to integrate water harvesting into agroecological landscape design.

Conversely, agroecological practices can reduce irrigation water demand through multiple mechanisms, including improved soil water retention, increased organic matter, diversified cropping systems with lower water requirements, and enhanced soil structure (Mdee et al., 2019; Basche and Edelson, 2017; Çakmakçı, 2025). This bidirectional relationship—irrigation supporting agroecological practices, and agroecological practices reducing irrigation dependency—represents a virtuous cycle that has been insufficiently studied or exploited.

Towards Multiservice Irrigation: A Conceptual Framework for Reconciliation

Leauthaud and Leenhardt (2025) proposed multiservice irrigation as a paradigm to reconcile water management with agroecological goals. In this framework, irrigation is planned and applied not merely to support yield and biomass production, but to enhance ecosystem functions essential for sustainable food production. Multiservice irrigation is based on the interaction between the operational aspects of the irrigation system—including its configuration, control, and irrigation amount—and agroecological practices, to enhance the ecological functions of soil and plants and generate a range of ecosystem services (Leauthaud and Leenhardt, 2025). This concept provides a valuable foundation for the agenda advanced here. Sociohydrology extends it by treating irrigation and drainage as interventions in coupled human–water systems, where policy, technology, farmer responses, allocation, and ecosystem change co-evolve (Liu et al., 2014, 2015; Han et al., 2017; Tian et al., 2026).

The multiservice irrigation framework identifies seven principles shared between agroecology and irrigation science: recycling/circularity, input reduction/efficiency, land and natural resource governance, participation, innovation, and knowledge sharing (Leauthaud & Leenhardt, 2025; Wezel et al., 2020; ICID, 2017; Tardieu, 2005; Ostrom, 1993). By embedding the remaining agroecological principles—soil health, biodiversity, synergy, economic diversification, social values and diets, fairness, and connectivity—into irrigation system planning, the framework envisions irrigation as a means of providing a plurality of ecosystem services.

This conceptual framework has parallels in the broader literature on multifunctional agriculture and ecological intensification. Rasmussen et al. (2024) demonstrated in *Science* that diversified agriculture delivers joint environmental and social benefits, while Nika et al. (2020) argued for integrating circular economy principles into water systems. Okiria et al. (2021), in a review published in *Sustainability*, examined the potential for payment for ecosystem services (PES) from the operation of agricultural water control structures, arguing that irrigation and drainage infrastructure can be managed to deliver bundles of ecosystem services beyond agricultural production—including flood regulation, biodiversity habitat, and cultural services—if appropriate economic instruments are deployed.

Furthermore, these multiservice functions are not passive benefits of physical infrastructure but require active, labor-intensive management by local institutions. In the Kotsu irrigation project in Aichi Prefecture, Japan, Otsuka et al. (2025) used the number of gate operations as a quantitative indicator of management effort. They found that while irrigation-related operations remained stable despite mosaic-like agricultural land loss, total gate operations

surged from 3,358 to 4,974 times between past and present periods due to increased flood-control operations. This demonstrates that multi-purpose water management is an active, human-sustained ecosystem service.

Drainage as an agroecological tool

While the irrigation–agroecology interface has begun to receive attention, the role of drainage in agroecological transitions remains even more underexplored. Controlled drainage, managing the depth and timing of subsurface drainage water,—has been shown to reduce nitrate losses to receiving waters by 30–50% while maintaining or improving crop yields (reviewed in Skaggs et al., 2012; and more recently in ecosystem service assessments by Mitchell et al., 2023). Denitrification bioreactors and saturated buffers installed at the edge of tile-drained fields can remove 25–98% of nitrate from drainage water before it reaches surface waters (Christianson et al., 2017), representing a nature-based solution that aligns drainage infrastructure with water quality and ecosystem service objectives.

Controlled drainage also offers potential for climate change mitigation. By maintaining higher water tables during fallow periods, controlled drainage can reduce organic matter decomposition and preserve soil carbon in drained organic soils (D'Acunha, B., et al., 2026). The reuse of drainage water for supplemental irrigation—a practice documented in arid and semi-arid regions—represents a form of agricultural water circularity that aligns with both irrigation efficiency and agroecological principles (Nika et al., 2020). These drainage innovations have rarely been evaluated within an explicit agroecological framework. A credible agenda must also track waterlogging, salinity, leaching requirements, salt disposal, energy use, and downstream water quality (Zhang et al., 2014).

The Irrigation Efficiency Paradox and Its Agroecological Implications

Any discussion of irrigation within agroecological transitions must contend with the irrigation efficiency paradox documented by Grafton et al. (2018) in *Science*. Increases in irrigation efficiency at the farm scale frequently lead to increased water consumption at the basin scale, as farmers expand irrigated area or switch to higher-value, more water-intensive crops—a rebound effect that undermines water conservation objectives. Zhang et al. (2014) documented this phenomenon in the Tarim River basin, where field-scale water-saving irrigation had complex effects on oasis groundwater and salinity.. Zhao et al. (2026) extended this analysis to the Lancang–Mekong basin, showing that climate change and irrigation expansion interact to reshape water pressure in ways that local efficiency gains alone cannot resolve.

This rebound framing, however, is not without a challenge. A more direct mechanistic view holds that improved irrigation efficiency reduces the volume of water withdrawn from surface and groundwater sources per unit of crop produced, and that this reduction in withdrawal is the more fundamental and measurable effect of efficiency gains. Under this view, basin scale increases in consumption observed in some studies may reflect confounding factors like policy incentives, market-driven cropping shifts, or expanding irrigated area for reasons independent of efficiency improvements rather than a direct causal rebound triggered by efficiency itself. Reconciling these perspectives requires distinguishing between water withdrawal (which efficiency gains tend to reduce) and water consumption or depletion at the basin scale (which can rise for reasons only partially linked to on-farm efficiency), a distinction that is not always made explicit in the rebound-effect literature.

This paradox has profound implications for the agroecological transition: *if improved irrigation efficiency simply enables more intensive production, it may run counter to agroecological goals of input reduction and resource stewardship*. Addressing it requires basin-scale limits on consumptive use and irrigated-area expansion, accounting for return flows, and coordinated water–land policy rather than efficiency targets alone (Liu et al., 2014, 2015; Leauthaud and Leenhardt, 2025).

Furthermore, the single-dimensional indicator ignores local hydrological cycles where water is recycled, alongside a vast network of positive externalities, such as flood mitigation, groundwater recharge, or ecosystem conservation, valued at 48.6 billion USD annually in the Japan case (Science Council of Japan, 2001). To reconcile this paradox, global monitoring frameworks must transition toward a comprehensive water valuation that formally incorporates these positive externalities.

Policy and Economic Instruments: Enabling the Transition

Current policy frameworks often compartmentalize irrigation and agroecology, treating them as separate issues managed by different government departments, supported by different donor mechanisms, and evaluated against different performance indicators (Leauthaud et al., 2025; Leauthaud & Leenhardt, 2025). This compartmentalization is a structural barrier to the integrated approach needed.

Recent policy literature offers pathways forward. Das et al. (2025) highlighted the role of policy, technology, and innovation pathways in achieving resource resilience in water management. The World Bank's 2025 Policy Compendium on repurposing agricultural support recommended reorienting subsidies from input subsidies to conditional incentives that reduce water use per unit of output and improve environmental outcomes (World Bank, 2025). Okiria et al. (2021) argued that payment for ecosystem services from agricultural water control structures could create economic incentives for managing irrigation and drainage infrastructure to deliver multiple ecosystem services, though they noted that PES schemes in agricultural water remain rare and geographically limited. Timpanaro et al. (2026) examined policy frameworks supporting agroecology in the Mediterranean. Sociohydrological evidence further shows that societal values and governance structures co-evolve and can enable or constrain sustainability transitions (Wei et al., 2023).

A critical research priority is analyzing and designing public policies that simultaneously advance sustainable irrigation and agroecological transitions. This includes scrutinizing existing policy instruments to determine whether they inadvertently favor conventional, high-input agricultural models, and how they could be reformed. Policies that link water access to agroecological practice adoption, spatial planning of irrigation systems to reflect both resource availability and local needs, and multi-scalar instruments reconciling private and public interests represent promising directions. The ICID community, with its established connections to water ministries, irrigation agencies, private industry partners and professional networks across more than 90 countries, is uniquely positioned to advance this policy agenda.

Research Priorities for Irrigation, Drainage, and the Agroecological Transition

Based on the gaps identified in the literature review and the collective expertise of the Question 66 authorship team, we propose six research priorities that complement the frontier themes outlined by Leauthaud and Leenhardt (2025).. Hungary is trying to find creative ways to utilize irrigation a drainage system for water retention and/or water resupply, by setting up new schedule of operation. Benefiit of the new schedule is storing water in the ground, and raising the groundwater level hopefully will reduce the water demand of irrigation. (Szamosvari, 2026) While their themes addressed the multiservice irrigation concept from a primarily conceptual and Mediterranean-irrigation perspective, our priorities emerge from the practical, technological, hydrological, and institutional challenges faced by irrigation and drainage professionals across diverse geographic and developmental contexts—from precision-irrigated systems in the American Midwest to water-harvesting landscapes in sub-Saharan Africa, from oasis agriculture in Central Asia to rice-based systems in South and Southeast Asia.

Priority 1: Precision and variable-rate irrigation as enablers of agroecological diversification

Variable-rate irrigation (VRI) and site-specific fertigation technologies, developed primarily for conventional monoculture systems, have not been systematically evaluated for their potential to enable agroecological diversification at the sub-field scale. Furthermore, in what field variability threshold justifies VRI technology implementation to improve crop water productivity and conserve water resources and other inputs needs additional research. Sharma and Irmak (2020; 2021a, b) demonstrated the economic viability of VRI and fertigation as compared with uniform-rate management, while showing that soil-specific VRI and variable-rate fertigation can reduce irrigation and fertilizer inputs while maintaining crop productivity. Sharda et al. (2022) further demonstrated that crop water stress can be mapped at the sub-field scale, providing a basis for spatially targeted irrigation management. However, these capabilities have been deployed almost exclusively within input-intensive cropping systems. A critical research need is to adapt and evaluate precision irrigation technologies for diversified, multi-species cropping systems—including intercropping, agroforestry, and relay cropping—where water demand varies not only spatially but also temporally by crop species and growth stage within the same field. This would require new sensor configurations, decision-support algorithms, and irrigation scheduling protocols that account for the complexity of polycultures rather than the uniformity of monocultures. Irmak (2015) and Irmak (2024) have advanced the understanding of maize response to different subsurface drip and sprinkler irrigation management strategies, providing the kind of crop-specific ET and yield response data needed for each component species in diversified systems.

Priority 2: Hydrological consequences of agroecological transitions in irrigated landscapes at the basin scale

The irrigation efficiency paradox (Grafton et al., 2018) demonstrates that field-scale water savings, in some cases. may not necessarily translate to basin-scale water conservation. Zhang et al. (2014) showed that water-saving irrigation in the Tarim oasis had complex effects on groundwater dynamics, and Zhao et al. (2026) documented how climate change and irrigation expansion are reshaping basin-scale water pressure. Yet no comparable studies exist for the hydrological consequences of agroecological transitions in irrigated landscapes. If a conventionally irrigated watershed transitions to agroecological management—incorporating cover crops, diversified rotations, conservation (reduced) or no-tillage, and organic matter amendments—what are the cumulative effects on evapotranspiration, groundwater recharge, return flows, and downstream water availability? This requires coupled sociohydrological–agronomic models that represent hydrology, crop decisions, policy, technology adoption, land expansion, and feedbacks across scales (Liu et al., 2014, 2015; Han et al., 2017). Evaluation should report consumptive use, return flows, groundwater, salinity, equity, and downstream effects against explicit counterfactuals.

Priority 3: Water harvesting and small-scale storage as nature-based solutions for rainfed-to-irrigated transitions

In many dryland regions, the agroecological transition involves moving from fully rainfed to partially irrigated systems through supplemental irrigation fed by water harvesting rather than conventional irrigation infrastructure. Villani et al. (2025) and Tarolli et al. (2025) have advanced understanding of nature-based solutions for soil and water conservation (restoring wetlands and riparian buffer (cited by Tarolli et al. (2025) for water regulation) in the context of climate extremes, while Piemontese et al. (2020) estimated the global potential of water harvesting based on successful case studies. Typical examples of rainwater harvesting practices are dugout ponds, used to collect and store rainwater within the farmland for supplementary irrigation during dry periods (Liniger and Mekdaschi Studer, 2019). Other widespread practices are terraces, built on steep terrains to slow down runoff and increase infiltration and traditionally

used in the Latin American, African and Asian highlands (Denevan, 2003, Mekdaschi Studer and Liniger, 2018, Saiz et al., 2016, Stroosnijder, 2009). Using participatory modeling approach, Castelli and Villani et al. (2025) demonstrated how large dams and small reservoirs can be co-modelled as complementary storage strategies under climate change. However, the role of water harvesting in enabling agroecological transitions—particularly the design of small-scale storage systems that support diversified cropping, livestock integration, and landscape-scale ecosystem service provision—remains underexplored. Research is needed to: (i) quantify the water-harvesting potential for supplemental irrigation of diversified cropping systems across agroecological zones; (ii) evaluate the ecosystem service co-benefits of small reservoirs and water-harvesting structures (biodiversity, carbon sequestration, sediment retention); and (iii) develop participatory planning tools that integrate water harvesting into agroecological landscape design.

Priority 4: Economic instruments and institutional innovation for irrigation–agroecology integration

The institutional and economic dimensions of integrating irrigation and agroecology have received far less attention than the biophysical dimensions. Okiria et al. (2021) reviewed the potential for payment for ecosystem services (PES) from agricultural water control structures, finding that while the concept is promising, PES schemes in agricultural water remain rare and geographically concentrated. Kawasaki's research on agricultural water infrastructure management in Japan (Kawasaki et al., 2024) and on the ecosystem service bundles provided by irrigation canal networks offers a framework for rethinking how irrigation and drainage infrastructure is valued, financed, and governed. Research is needed to: (i) develop and test economic instruments that reward irrigation and drainage operators for ecosystem service provision alongside water delivery; (ii) design water governance arrangements that bridge the institutional divide between irrigation agencies and agroecology promotion bodies; and (iii) evaluate the role of multi-stakeholder platforms in fostering the joint management of irrigation and agroecological systems, building on the participatory approaches documented by Pahl-Wostl et al. (2008) and Ameur and Leauthaud (2024).

Priority 5: Soil-water dynamics and water productivity under conservation agriculture–irrigation interactions

The interaction between conservation agriculture (CA) practices—zero-till, cover cropping, residue retention—and irrigation management is biophysically complex and context-dependent. Recognition and understanding of impacts of any crop and (or) soil management practice on crop water use is equally crucial as its intended impacts. One such practice that has gained adoption among producers in U.S. maize growing regions is conservation tillage, which aims to maintain about 30–40%, or more, of residual vegetative cover on the soil surface after planting. The presence of numerous interacting factors suggests that the success of this practice depends on local conditions, requiring scientific/research-based data (Irmak et al., 2019). Through extensive field research. Irmak et al. (2019) quantified crop evapotranspiration (ETc), microclimate, yield, water productivity (WP) and other variables for irrigated maize (*Zea mays* L.) under disk-till (DT) (conventional) and no-till (NT) (conservation) tillage systems in 2011, 2012 and 2013 in two carefully managed and monitored producers' fields, which have been under these tillage management practices for over 17 years. Over the three-year total, DT maize ETc (2091 mm) was 92 mm higher than NT maize ETc (1,999 mm). A seasonal and monthly pattern existed in the difference between DT and NT ETc. NT maize had less pre-anthesis water use than DT maize and greater post-anthesis water use than DT maize in all three growing seasons. Maize yield was higher for DT maize than NT maize in all three years, by 7% (0.8 t/ha), 6% (0.8 t/ha), and 10% (1.2 t/ha) in 2011, 2012, and 2013, respectively. While the research was not designed agroecological services in mind explicitly, it implicitly demonstrated an important conservation practice that can lead

to additional water resources conservation that can contribute to the agroecological services for other vegetation services and habitats. Kukal and Irmak (2021) reviewed CA effects on soil water holding capacity and water savings, finding that effects varied with management practices and agroecological conditions. Kienzler et al. (2012) demonstrated that CA under irrigation in Central Asia altered water use patterns, while Mohammad et al. (2018) found reduced water consumption under direct-seeded rice with CA in the Indo-Gangetic Plains. However, these studies were not designed within an explicit agroecological framework, and the interactive effects between specific irrigation and drainage strategies (e.g., deficit irrigation, supplemental irrigation, controlled drainage) and specific CA practices (e.g., cover crop species, residue management, tillage intensity) remain poorly quantified across diverse soil types, climates, and cropping systems. Systematic field experimentation and modelling are needed to: (i) determine how CA practices alter soil-water dynamics in ways that require irrigation scheduling adjustments; (ii) quantify the water productivity gains (or losses) from combining CA with precision irrigation; and (iii) identify the conditions under which CA can reduce irrigation water demand without compromising yield stability under climate variability.

Priority 6: Modernizing irrigation and drainage infrastructure for multifunctionality and ecosystem service delivery

Much of the world's irrigation and drainage infrastructure was designed for a single purpose: *delivering water to crops or removing excess water from fields*. The concept of multifunctional infrastructure—designing and managing irrigation and drainage systems to deliver water for agriculture while simultaneously providing ecosystem services, supporting biodiversity, regulating floods, and sequestering carbon—is still in its infancy. The ICID Vision 2030 roadmap (ICID, 2017) recognized principles of integrated water management, innovation, and governance that align with agroecological principles, but operationalizing these principles in infrastructure design and management remains a frontier. The evidence base should connect hydraulic performance with ecological, social, and governance outcomes.. Research is needed to: (i) develop design criteria and performance indicators for multifunctional irrigation and drainage infrastructure; (ii) evaluate the costs and benefits of retrofitting existing infrastructure for ecosystem service provision; and (iii) assess the governance and financing arrangements needed to support infrastructure modernization that serves both agricultural production and agroecological goals.

Why the ICID Congress Must Address This Gap

The 26th ICID Irrigation and Drainage Congress in Marseille provides a unique and timely platform to address the knowledge gap between irrigation/drainage and agroecology for several reasons:

- First, ICID is the historically leading, reputable international professional organization for irrigation, drainage, and flood management, with a membership spanning over 90 countries. Its convening power can bring together the irrigation and agroecology communities in a way that few other platforms can.
- Second, the Congress theme explicitly invites researchers, practitioners, and policymakers to explore how irrigation, drainage, and nature-based water solutions—when guided by agroecological principles—can help build sustainable, inclusive, and resilient food systems to feed the world's rapidly increasing population. When the two critical and interconnected disciplines (irrigation/drainage and agroecology) are considered together, they can enable developing practical management solutions to minimize the negative impact(s) of climate change on agroecological productivity to sustain food and fiber production. This framing already bridges the disciplinary divide, which is more needed than ever before.

- Third, the ICID Vision 2030 roadmap recognizes principles of integrated water management, innovation, knowledge sharing, equity, and governance that are shared with the 13 principles of agroecology (ICID, 2017; Wezel et al., 2020). The alignment is structural, not merely thematic.
- Fourth, the Congress convenes at a moment when climate change is reshaping, in challenging ways, the context for irrigation and drainage worldwide. The IPCC's Sixth Assessment Report (2023) has made clear that incremental adaptation is insufficient; transformative change in food systems is required. Irrigation and drainage, repositioned within an agroecological framework, can be, and should be, part of that transformation.
- Finally, the Congress can catalyze the research agenda. The six research priorities identified above require coordinated, multi-disciplinary, multi-scale research that the ICID network is uniquely positioned to mobilize—linking irrigation engineers, agronomists, hydrologists, ecologists, social scientists, and policymakers across countries and contexts. The Question 66 team is well positioned to support such integration across engineering, agronomy, hydrology, ecology, social science, and policy.

Conclusion

The links between agroecology and irrigation and drainage remain profoundly underexplored: as of April 2023, only 38 scientific articles explicitly connect them, and most do so superficially (Leauthaud et al., 2025) and without full understanding of their interconnectivity for the sustainability of agricultural productivity, food security as well as agroecological services. This scarcity represents both a gap and an opportunity. The gap is that farmers, policymakers, and researchers lack the evidence base needed to design irrigation and drainage systems that actively contribute to agroecological transitions. The opportunity is that the field is wide open for innovative, integrative research that can redefine the role of water management in sustainable food systems.

Climate change has made this reconciliation urgent. Irrigation and drainage should be assessed along a continuum from conventional grey infrastructure to hybrid and ecosystem-based measures; only the latter two qualify as nature-based solutions when ecological and social outcomes are demonstrated.. The multiservice irrigation concept (Leauthaud and Leenhardt, 2025) provides a valuable conceptual framework for this repositioning, while the six research priorities we propose in this paper translate that concept into a practical agenda grounded in the technological, hydrological, institutional, and ecological challenges that the global irrigation and drainage community confronts daily.

The 26th ICID Congress in Marseille is positioned to be a turning point on this agenda. By bringing together the irrigation and agroecology communities, the Congress can catalyze the research, policy, and practice innovations needed to ensure that agricultural water management, agricultural production and related management practices become an integral, transformative component of the agroecological transition—building food systems that are not only productive and water-efficient, but also ecologically grounded, socially equitable, and climate-resilient.

References

Akakpo, K., S. Bouarfa, M. Benoit, and C. Leauthaud. 2021. Challenging agroecology through the characterization of farming practices' diversity in Mediterranean irrigated areas. *European Journal of Agronomy* 128: 126284. doi: 10.1016/j.eja.2021.126284.

Alletto, L., Cueff, S., Bréchemier, J., Lachaussée, M., Derrouch, D., Page, A., ... & Bustillo, V. (2022). Physical properties of soils under conservation agriculture: A multi-site experiment on five soil types in south-western France. *Geoderma*, *428*, 116228.

Altieri, M.A. 1992. Agroecological foundations of alternative agriculture in California. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 39(1–2): 23–53. doi: 10.1016/0167-8809(92)90203-N.

Ameur, F., and C. Leauthaud. 2024. Assessing the integration of agroecological principles in smallholder farming systems in North African irrigated plains. *Agroecology and Sustainable Food Systems*. doi: 10.1080/21683565.2024.2417266.

Basche, A.D., and O.F. Edelson. 2017. Improving water resilience with more perennially based agriculture. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 41(7): 799–824. doi: 10.1080/21683565.2017.1330795.

Çakmakçı, R., S. Çakmakçı, and M.F. Çakmakçı. 2025. Principles of environmentally sustainable agriculture for building resilient and resource-efficient food systems. *Turkish Journal of Biology* 49(5): 550–584. doi: 10.55730/1300-0152.2764.Christianson, L., A. Brij, A. Carvalho, and J. Helmers. 2017. Reducing nitrogen contamination from agricultural subsurface drainage with denitrification bioreactors and controlled drainage. *Biosystems Engineering* 153: 1–10.

Das, A., and S. Mishra. 2025. Smart and sustainable water management: policy, technology, and innovation pathways for resource resilience. *Green Technology, Resilience and Sustainability* 5 (2025). https://doi.org/10.1007/s44173-025-00022-8Devkota, M., K.P. Devkota, M. Karrou, and V. Nangia. 2023. Genotype and agronomic management interaction to enhance wheat yield and water use efficiency in the Mediterranean rainfed environment of Morocco: I. Field data analysis. *European Journal of Agronomy* 151: 126972. doi: 10.1016/j.eja.2023.126972.

D'Acunha, B., et al. 2026. Drained agricultural peatlands as persistent carbon sources. (PMC12970578) — a review of drained organic soils as carbon sources.

W.M. Denevan. 2003. Cultivated Landscapes of Native Amazonia and the Andes Oxford University Press.

Devkota, K.P., M. Devkota, M. Mabhaudhi, V. Nangia, S. Attaher, R.J. Boroto, J. Timsina, and K.H. Siddique. 2025. A blueprint for building resilience and food security in MENA and SSA drylands: Diversifying agriculture with neglected and underutilized species. *Food and Energy Security* 14(1): e70046. doi.org/10.1002/fes3.70046.

FAO. 2018. *The 10 Elements of Agroecology: Guiding the Transition to Sustainable Food and Agricultural Systems*. FAO. Rome, Italy.

FAO. 1996. Food production: the critical role of water. *Technical Background Document*. FAO. Rome, Italy.

Fischer, K., G. Vico, H. Röcklinsberg, H. Liljenström, and R. Bommarco. 2025. Progress towards sustainable agriculture hampered by siloed scientific discourses. *Nature Sustainability* 8: 66–74.

Galeana-Pizana, J.M., S. Couturier, D. Figueroa, and A.D. Jimenez. 2021. Is rural food security primarily associated with smallholder agriculture or with commercial agriculture? *Agricultural Systems* 190: 103091. doi: 10.1016/j.agsy.2021.103091.

Grafton, R.Q., J. Williams, C.J. Perry, F. Müller, C. Ringler, A. Steduto, B. Udall, S.A. Wheeler, Y. Wang, D. Garrick, and S.M. Allen. 2018. The paradox of irrigation efficiency. *Science* 361(6404): 748–750. doi: 10.1126/science.aat9314.

Gross, B., and R. Jaubert. 2019. Vegetable gardening in Burkina Faso: drip irrigation, agroecological farming and the diversity of smallholders. *Water Alternatives* 12(1): 46–67.

Guzman, G.I., and A.M. Alonso. 2008. A comparison of energy use in conventional and organic olive oil production in Spain. *Agricultural Systems* 98(3): 167–176. doi: 10.1016/j.agsy.2008.06.004.

Han, S., F. Tian, Y. Liu, and X. Duan. 2017. Socio-hydrological perspectives of the co-evolution of humans and groundwater in Cangzhou, North China Plain. *Hydrology and Earth System Sciences* 21: 3619–3633. doi: 10.5194/hess-21-3619-2017.

HLPE. 2019. *Agroecological and Other Innovative Approaches for Sustainable Agriculture and Food Systems That Enhance Food Security and Nutrition*. HLPE Report #14. Rome: Committee on World Food Security.

ICID. 2017. *A Water Secure World Free of Poverty and Hunger: A Roadmap to ICID Vision 2030*. New Delhi: ICID.

Irmak, S., S. Irmak and J. Kaur. 2025. Sprayable bio-based polymer conserved soil-water, enhanced soybean growth, moderated soil temperature, increased soil organic matter content and reduced giant foxtail [*Setaria faberi hermm*.] density and biomass. *Applied Engineering in Agriculture*. 41(6):695-706. https://doi.org/10.13031/aea.16439.

Irmak, S., J. Aguilar, V. Adamchuk, H. Huang, S. O'shaughnessy, M. Kukal, I. Kisekka, D. Porter, M. Andrade-Rodriguez, A. Yari, C. Madramootoo. 2025. Precision Irrigation Management. *The Council for Agricultural Science and Technology (CAST) Paper*. pp. 1-21. https://doi.org/10.62300/6b9hf011.

Irmak, S., T.A. Hinn, M.S. Kukal and A.T. Mohammed. 2025. Concurrent response of soybean to fixed (full and limited) and variable rate irrigation management in three soil types: I. Soil water dynamics. *Irrigation and Drainage*. 74:1853–1873. https://doi.org/10.1002/ird.3124.

Irmak, S., and T.A. Hinn. 2025. Concurrent response of soybean to fixed (full and limited) and variable rate irrigation management in three soil types: II. Growth, yield, evapotranspiration and water productivity. *Irrigation and Drainage*. 74:1874–1888. https://doi.org/10.1002/ird.3121.

Irmak, S. 2024. Maize response to different subsurface drip irrigation management strategies: Yield, production functions, basal and crop evapotranspiration. *Agricultural Water Management* 300 (2024) 108927. doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108927.

Irmak, S., S. Irmak and J. Kaur. 2024. Effect of sprayable biobased polymers on soybean growth and yield, weed suppression, soil temperature, soil-water, evapotranspiration and soil quality variables. *Journal of Natural Resources and Agricultural Ecosystems*. 2(4):227-242. https://doi.org/10.13031/jnrae.16177.

Irmak, S. 2023. Agriculture and agricultural water management: Historical perspectives and integration of research and extension/outreach for large-scale technology adoption in production fields. *Journal of ASABE*. 66(1):167-192. https://doi.org/10.13031/ja.15272.

Irmak, S., A.T. Mohammed and M. Drudik. 2023. Maize nitrogen (N) uptake, grain N concentration and root-zone residual nitrate N (NO_3-N) response under center pivot, subsurface drip and surface (furrow) irrigation. *Agricultural Water Management* 287(2023)108421. doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108421.

Irmak, S., and A.T. Mohammed. 2023. Maize nitrogen uptake and use efficiency, partial factor productivity of nitrogen, and yield response to different nitrogen and water applications under three irrigation methods. *Irrigation and Drainage*. 73:64-88. https://doi.org/10.1002/ird.2868.

Irmak, S., A.T. Mohammed and M.S. Kukal. 2022. Maize response to coupled irrigation and nitrogen fertilization under center pivot, subsurface drip and surface or gravity (furrow) irrigation: Growth, development and productivity. *Agricultural Water Management*. 263(2022):107457. doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107457.

Irmak, S., M.S. Kukal, A.T. Mohammed and K. Djaman. 2019. Disk-till vs. no-till maize evapotranspiration, microclimate, grain yield, production functions and water productivity. *Agricultural Water Management*. 26(5):177-195. doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.006.

Irmak, S., V. Sharma, A.T. Mohammed and K. Djaman. 2018. Impacts of cover crops on soil physical properties: Field capacity, permanent wilting point, soil-water holding capacity, bulk density, hydraulic conductivity and infiltration. *Transactions of the ASABE*. 61(4):1307-1321. doi.org/10.13031/trans.12700.

Irmak, S., and K. Djaman. 2016. Effects of planting date and density on plant growth, yield, evapotranspiration, and irrigation- and evapotranspiration-yield production functions of maize (*Zea mays* L.) under subsurface drip irrigation and rainfed conditions. *Transactions of the ASABE*. 59(5):1235-1256. doi:10.13031/trans.59.11169.

Irmak, S., J.E. Specht, L. Odhiambo, J.M. Rees and K.G. Cassman 2015. Soybean yield, water productivity, evapotranspiration and soil-water extraction response to subsurface drip irrigation. *Transactions of the ASABE*. 57(3):729-748. doi:10.13031/trans.57.10085.

Irmak, S. 2015. Inter-annual variation in long-term center pivot-irrigated maize evapotranspiration (ET) and various water productivity response indices: Part I. Grain yield, actual and basal ET, irrigation-yield production functions, ET-yield production functions, and yield response factors. *J. Irrigation and Drainage Engineering*. 141(5):1-17. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000825.

IPCC. 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Geneva: IPCC. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

Kawasaki, K., Ide, K., Yamamuro, N., Oda, T., Matsumura, A., Noda, K., Hanasaki, N., Hirabayashi, Y. 2024. Considering the irrigation canal network in Japan: an attempt to model inter-basin water conveyance. *Japanese Journal of JSCE* 80(16): 1-7. doi:10.2208/jscejj.23-16095.

Kienzler, K.M., J.P.A. Lamers, A. McDonald, A. Mirzabaev, N. Ibragimov, O. Egamberdiev, E. Ruzibaev, and A. Akramkhanov. 2012. Conservation agriculture in Central Asia—What do we know and where do we go from here? *Field Crops Research* 132: 95–105. doi: 10.1016/j.fcr.2011.12.008.

Kröger, R. et al. 2023. A review of ecosystem services from edge-of-field practices in tile-drained agricultural landscapes. *Journal of Environmental Management* 348: 119220. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119220.

Kukal, M.S., and S. Irmak. 2021. Conservation agriculture effects on soil water holding capacity and water-saving varied with management practices and agroecological conditions: A review. *Agriculture* 11(9): 1681. doi: 10.3390/agriculture11091681.

Leauthaud, C., F. Ameur, and D. Leenhardt. 2025. Irrigation and agroecology: a scientific mismatch? A literature review. *Agroecology and Sustainable Food Systems*. 49(9), 1415–144. doi: 10.1080/21683565.2025.2481405.

Leauthaud, C., and D. Leenhardt. 2025. Towards multiservice irrigation for an agroecological future. *npj Sustainable Agriculture* 3: 55. doi: 10.1038/s44264-025-00094-w.

Leauthaud, C., F. Ameur, A. Richa, J. Ben Yahmed, N. Tadjer, S. Bakouchi, K. Akakpo, M. Djezzar, and H. Amichi. 2022a. Production and use of homemade dry manure-based tea in fertigation systems in North Africa. *Renewable Agriculture and Food Systems* 37(3): 248–256. doi: 10.1017/S174217052100051X.

Leauthaud, C., J. Ben Yahmed, M. Husseini, F. Rezgui, and F. Ameur. 2022b. Adoption factors and structural characteristics of irrigated olive grove agroforestry systems in Central Tunisia. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 46(7): 1025–1046. doi: 10.1080/21683565.2022.2085230.

Liniger, H., Mekdaschi Studer, R., 2019. Sustainable Rangeland Management in Sub-Saharan Africa: Guidelines to Good Practice (No. 138574), HP and Mekdaschi Studer, R. The World Bank.

Liu, D., F. Tian, M. Lin, and M. Sivapalan. 2015. A conceptual socio-hydrological model of the co-evolution of humans and water: Case study of the Tarim River basin, western China. *Hydrology and Earth System Sciences* 19: 1035–1054. doi: 10.5194/hess-19-1035-2015.

Liu, Y., F. Tian, H. Hu, and M. Sivapalan. 2014. Socio-hydrologic perspectives of the co-evolution of humans and water in the Tarim River basin, Western China: The Taiji–Tire model. *Hydrology and Earth System Sciences* 18: 1289–1303. doi: 10.5194/hess-18-1289-2014.

Lu, Y., F. Tian, L. Guo, et al. 2021. Socio-hydrologic modeling of the dynamics of cooperation in the transboundary Lancang–Mekong River. *Hydrology and Earth System Sciences* 25: 1883–1903. doi: 10.5194/hess-25-1883-2021.

Mdee, A., A. Wostry, A. Coulson, and J. Maro. 2019. A pathway to inclusive sustainable intensification in agriculture? Assessing evidence on the application of agroecology in Tanzania. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 43(2): 201–227. doi: 10.1080/21683565.2018.1485126.

Mekdaschi, R. and Liniger, H.P., 2013. Water harvesting: guidelines to good practice.

Mitchell, M. E., Newcomer-Johnson, T., Christensen, J., Crumpton, W., Dyson, B., Canfield, T. J., ... & Forshay, K. J. (2023). A review of ecosystem services from edge-of-field practices in tile-drained agricultural systems in the United States Corn Belt Region. *Journal of environmental management*, *348*, 119220.

Mohammad, A., S. Sudhishri, T.K. Das, M. Singh, R. Bhattacharyya, A. Dass, M. Khanna, V.K. Sharma, N. Dwivedi, and M. Kumar. 2018. Water balance in direct-seeded rice under conservation agriculture in north-western Indo-Gangetic Plains of India. *Irrigation Science* 36(6): 381–393. doi: 10.1007/s00271-018-0590-z.

Mohammed, A.T., and S. Irmak. 2022. Maize response to irrigation and nitrogen under center pivot, subsurface drip and furrow irrigation: Water productivity, production functions, basal evapotranspiration and yield response factors. Agricultural Water Management. 271(2022), 107795. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107795.

Moraine, M., J. Grimaldi, C. Murgue, M. Duru, and O. Therond. 2016. Co-design and assessment of cropping systems for developing crop-livestock integration at the territory level. *Agricultural Systems* 147: 87–97. doi: 10.1016/j.agsy.2016.06.002.

Murgia, I., Beltrami, S., Villani, L., Vaglia, V., Alderotti, F., Angeloni, G., ... & Piemontese, L. (2026). The challenge of science for sustainable agriculture: an Italian early career researchers' perspective. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, *50*(7), 1595-1603.

Nangia, V., T. Oweis, F.H. Kemeze, and J. Schnetzer. 2018. *Supplemental Irrigation: A Promising Climate-Smart Practice for Dryland Agriculture*. Climate-Smart Agriculture Practice Brief. CGIAR CCAFS.

Nhamo, L., et al. 2025. Transforming agricultural water management through the Water–Energy–Food Nexus: Trends, opportunities, barriers and solutions. Irrigation and Drainage 2025; 0:1–1. https://doi.org/10.1002/ird.70032.

Nika, C.E., V. Vasilaki, A. Expósito, and E. Katsou. 2020. Water cycle and circular economy: developing a circularity assessment framework for complex water systems. *Water Research* 187: 116423. doi: 10.1016/j.watres.2020.116423.

Okiria, E., K. Noda, M.K. Zaki, and T. Okayasu. 2021. A review of payment for ecosystem services (PES) in agricultural water: Are PES from the operation of agricultural water control structures ubiquitous? *Sustainability* 13(22): 12624. doi: 10.3390/su132212624.

Ostrom, E. 1993. Design principles in long-enduring irrigation institutions. *Water Resources Research* 29(7): 1907–1912.

Otsuka, K., Nishimura, S., Senge, M., Noda, K. 2025. Urbanization impacts on operational efforts of agricultural water infrastructure. *Hydrological Research Letters*, 19: 283-288. doi: 10.3178/hrl.25-00030.

Pahl-Wostl, C., E. Mostert, and D. Tàbara. 2008. The growing importance of social learning in water resources management and sustainability science. *Ecology and Society* 13(1): 1-4. https://www.jstor.org/stable/26267907.

Payero, J.O., D.D. Tarkalson and S. Irmak, D. Davison, and J.L. Petersen. 2008. Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semi-arid climate. Agricultural Water Management. 95:895-908.

Perez Neira, D. 2016. Energy efficiency of cacao agroforestry under traditional and organic management. *Agronomy for Sustainable Development* 36(49). doi: 10.1007/s13593-016-0386-6.

Piemontese, L., G. Castelli, I. Fetzer, J. Barron, H. Liniger, N. Harari, E. Bresci, and G. Cecchi. 2020. Estimating the global potential of water harvesting from successful case studies. *Global Environmental Change* 63: 102121. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2020.102121.

Pörtner, H.-O. et al. 2022. Technical summary. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009325844.002.

Rasmussen, L.V. et al. 2024. Joint environmental and social benefits from diversified agriculture. *Science* 384(6691: 87–93. doi: 10.1126/science.adj19

Romero, P., J.M. Navarro, and P.B. Ordaz. 2022. Towards a sustainable viticulture: the combination of deficit irrigation strategies and agroecological practices in Mediterranean vineyards. A review and update. *Agricultural Water Management* 259: 107216. doi: 10.1016/j.agwat.2021.107216.

Rouge, A., G. Adeux, H. Busset, R. Hugard, J. Martin, A. Matejicek, D. Moreau, J.P. Guillemin, and S. Cordeau. 2022. Weed suppression in cover crop mixtures under contrasted levels of resource availability. *European Journal of Agronomy* 136: 126499. doi: 10.1016/j.eja.2022.126499.

Science Council of Japan. 2001. Report on the Evaluation of Multifunctional Roles of Agriculture and Forestry Contributed to Global Environment and Human Life (Response to the Ministerial Inquiry). Science Council of Japan, Tokyo, Japan. (in Japanese).

Sharda, V., R. Bajwa, G. Shekhar, and S. Irmak. 2022. Evaluating spatial and temporal variations in sub-field level crop water stress for variable rate irrigation. *Frontiers in Agronomy* 4: 983244. doi: 10.3389/fagro.2022.983244.

Sharma, V and S. Irmak. 2021a. Comparative analyses of variable and fixed rate irrigation and nitrogen management for maize in different soil types: Part I. Impact on soil-water dynamics and crop evapotranspiration. *Agric. Water Manage*., 245 (28) (2021), Article 106644, 10.1016/j.agwat.2020.106644

Sharma, V and S. Irmak. 2021b. Comparative analyses of variable and fixed rate irrigation and nitrogen management for maize in different soil types: Part II. Growth, grain yield, evapotranspiration, production functions and water productivity. *Agric. Water Manag*., 246 (2021), 10.1016/j.agwat.2020.106653

Sharma, V., and S. Irmak. 2020. Economic comparisons of variable rate irrigation and fertigation with fixed (uniform) rate irrigation and fertigation and pre-plant fertilizer management for maize. *Agricultural Water Management* 240: 106307. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106307.

Sietz, D., Frey, U., Roggero, M., Gong, Y., Magliocca, N., Tan, R., Janssen, P. and Václavík, T., 2019. Archetype analysis in sustainability research. *Ecology and Society*, *24*(3).

Skaggs, R.W., M.A. Youssef, and G.M. Chescheir. 2012. DRAINMOD: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 55(4): 1509–1522. doi: 10.13031/2013.42259.Tardieu, H. 2005. Irrigation and drainage services: some principles and issues towards sustainability. An ICID position paper. *Irrigation and Drainage* 54: 251–262.

Stroosnijder, L. (2009). Modifying land management in order to improve efficiency of rainwater use in the African highlands. *Soil and Tillage Research*, *103*(2), 247-256. Tarolli, P., Liu, G., Castelli, G., Bresci, E., Bailly, J.S., Rizzo, D., Loc, H.H., Sidle, R.C. and Bogaard, T., 2025. Nature-based solutions for soil and water conservation in an era of climate extremes: Limitations and future scenarios. *International Soil and Water Conservation Research*.

Tarolli, P., G. Castelli, et al. 2026. Nature-based solutions for soil and water conservation in an era of climate extremes: Limitations and future scenarios. *International Soil and Water Conservation Research* 14(2): 100604. doi: 10.1016/j.iswcr.2025.12.004.

Tian, F., J. Wei, M. Haeffner, and H. Kreibich, eds. 2026. *Coevolution and Prediction of Coupled Human-Water Systems: A Sociohydrologic Synthesis of Change in Hydrology and Society*. Elsevier. ISBN 978-0-443-41736-8.

Timpanaro, G. et al. 2026. Regulatory frameworks and policy innovations for agroecology in the Mediterranean basin. *Land Use Policy* 108001. doi: 10.1016/j.landusepol.2026.108001.Van der Laan, M., Virtanen, S., Matsuno, Y., Castelli, G., Fayrap, A., Cresswell, R., & Hsieh, M. K. (2024). Ecosystem services of irrigated and controlled drainage agricultural systems: A contemporary global perspective. *Irrigation and Drainage*, *73*(5), 1823-1837.

Villani, L., and G. Castelli. 2025. Large dams and small reservoirs: co-modeling water storage strategies in a Mediterranean catchment under a changing climate. *Frontiers in Water* 7: 1673203. doi: 10.3389/frwa.2025.1673203.

Villani, L., Castelli, G., Forzini, E., Piemontese, L., Lucca, E., Bouizrou, I., ... & Bresci, E. (2025). Large dams and small reservoirs: co-modeling water storage strategies in a Mediterranean catchment under a changing climate. *Frontiers in Water*, *7*, 1673203.

Wei, J., Y. Wei, F. Tian, Y. Xiong, and H. Hu. 2023. Transition in the societal value and governance of water resources in Australia and China. *Humanities and Social Sciences Communications* 10: 359. doi: 10.1057/s41599-023-01857-x.

Wezel, A., M. Casagrande, F. Celette, J.-F. Vian, A. Ferrer, and J. Peigne. 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture: A review. *Agronomy for Sustainable Development* 34(1): 1–20. doi: 10.1007/s13593-013-0180-7.

Wezel, A., B.G. Herren, R.B. Kerr, E. Barrios, A.L.R. Gonçalves, and F. Sinclair. 2020. Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems: A review. *Agronomy for Sustainable Development* 40(6): 40. doi: 10.1007/s13593-020-00646-z.

World Bank. 2025. *Repurposing Agricultural Support: 2025 Policy Compendium*. Washington, DC: World Bank.

Xue, R., Y. Jiang, H. Li, and B. Shi. 2025. Review of advancements and challenges in delayed irrigation: Enhancing crop water productivity and sustainable crop production. *Agricultural Water Management* 318: 109739. doi: 10.1016/j.agwat.2025.109739.

Yonts, C.D., A. Haghverdi, D.L. Reichert and S. Irmak. 2018. Deficit irrigation and surface residue cover effects on dry bean yield, in-season soil water content and irrigation water use efficiency in western Nebraska High Plains. *Agricultural Water Management*. 199:138-147. doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.024.

Zhang, Z., H. Hu, F. Tian, X. Yao, and M. Sivapalan. 2014. Groundwater dynamics under water-saving irrigation and implications for sustainable water management in an oasis: Tarim River basin of western China. *Hydrology and Earth System Sciences* 18: 3951–3967. doi: 10.5194/hess-18-3951-2014.

Zhao, H., F. Tian, et al. 2026. Climate change and irrigation expansion reshape the water pressure and upstream–downstream interactions in the Lancang–Mekong River Basin. *Hydrology and Earth System Sciences* 30: 2433–2453. doi: 10.5194/hess-30-2433-2026.Zwarteveen, M. et al. 2021. Transformations to groundwater sustainability: from individuals and pumps to communities and aquifers. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 49: 88–97.

QUESTION 66:

FACE AU DÉFI CLIMATIQUE, COMMENT L'IRRIGATION ET LE DRAINAGE PEUVENT CONTRIBUER À LA TRANSITION AGROÉCOLOGIQUE?

RAPPORT GENERAL

Dr. Vinay Nangia (ICARDA)*
Rapporteur Général

RESUME

L'agroécologie est unanimement considérée comme un cadre de la conception des systèmes alimentaires durables portant sur des principes écologiques, mais l'irrigation et le drainage — les infrastructures de gestion de l'eau dont dépendent 40% de la production alimentaire mondiale — restent largement absentes du discours agroécologique. Une revue systématique de la littérature scientifique n'a identifié que 38 articles liant de manière explicite l'irrigation et l'agroécologie en avril 2023, la plupart traitant l'irrigation de manière superficielle plutôt que comme une composante transformatrice des systèmes agroécologiques (Leauthaud et al., 2025). Ce document de principe synthétise l'état actuel des connaissances disponibles sur le croisement de l'irrigation, du drainage et de l'agroécologie, et soutient que les fossés disciplinaires entre ces domaines n'est plus défendable dans le contexte du changement climatique, et propose que l'irrigation et le drainage soient évalués en tant qu'interventions multiservices au sein de systèmes couplés « humains-eau », en distinguant les infrastructures conventionnelles des mesures hybrides grises-vertes et basées sur l'écosystème. Nous nous appuyons sur les preuves émergentes issues de l'irrigation de précision et à débit variable, de l'irrigation déficitaire, des interactions entre agriculture de conservation et irrigation, du drainage contrôlé, de la collecte de l'eau et des systèmes de culture irrigués diversifiés dans divers contextes géographiques et institutionnels — depuis des plaines indo-gangétiques et du bassin du Tarim jusqu'à la Méditerranée, l'Afrique subsaharienne et le Midwest américain. En nous appuyant sur l'expertise collective de l'équipe co-responsable de la Question 66, nous proposons six priorités de recherche qui émergent des lacunes identifiées dans la littérature et des défis pratiques auxquels sont confrontés les professionnels de l'irrigation et du drainage à travers le monde. Nous concluons que le 26e Congrès de la CIID fournit une plate-forme essentielle pour combler ces lacunes en matière de connaissances et pour repositionner l'irrigation et le drainage en tant que composantes intégrales de systèmes alimentaires fondés écologiquement et résistants au climat.

Mots-clés : Agroécologie; Irrigation; Drainage; Irrigation à service multiple; Solutions fondées sur la nature; Changement climatique; Transition écologique; Productivité de l'eau; Services écosystémiques; Irrigation de precision; Collecte des eaux.

Introduction : une lacune en matière de connaissance incompatible avec les impératifs du changement climatique

L'agroécologie est apparue comme un cadre scientifique pour remodeler les systèmes alimentaires sur la base de principes écologiques, englobant des dimensions agronomiques, écologiques, socio-économiques, politiques et culturelles (Wezel et al., 2020; FAO, 2018; HLPE, 2019; Murgia et al., 2026). Il porte sur le principe de produire des aliments durables

* Research Team Leader - Soils, Waters and Agronomy, International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA), Rabat, Morocco. E-mail: v.nangia@cgiar.org

tout en travaillant en harmonie avec les principes naturels. Il adopte une approche holistique, multi-échelles et multi-acteurs pour remodeler les systèmes alimentaires afin de répondre aux défis environnementaux, économiques et sociaux qui existent dans les systèmes agricoles des zones arides et irriguées. Ainsi, les fonctions agroécologiques et et les fonctions de soutien telles que les pratiques de production agricole (conservation des sols et de l'eau; gestion de l'irrigation; gestion des engrais, des mauvaises herbes et des incetes nuisibles; gestion des cultures; et d'autres pratiques de gestion agricole devraient travailler ensemble en harmonie pour réaliser un plus grand impact positif sur la sécurité alimentaire mondiale tout en protégeant et en soutenant les fonctions agroécologiques et les services environnementaux. Alors que l'agriculture irriguée représente environ 20% des terres cultivées dans le monde, elle fournit 40% de la production alimentaire mondiale (FAO, 1996 ; Grafton et al., 2018). À l'échelle mondiale, environ 70% des prélèvements d'eau douce sont destinés à l'agriculture irriguée. L'agroécologie et l'irrigation sont toutes deux promues en tant que mesures d'adaptation au changement climatique (GIEC, 2023 ; Pörtner et al., 2022), et toutes deux visent à améliorer la durabilité des systèmes alimentaires afin de répondre à la demande alimentaire et en fibres de la population mondiale en croissance rapide. Ainsi, l'agriculture irriguée continuera à jouer un rôle crucial face à cette demande, et son importance par rapport aux sociétés et à toute l'humanité ne cesse de croître au fil du temps, compte tenu des implications négatives du changement climatique sur la productivité agricole (Irmak, 2023). Irmak et al. (2025) ont constaté que, face à la nécessité projetée d'augmenter la production alimentaire de 60% pour atteindre la sécurité alimentaire d'ici 2050, le défi consiste à atteindre cet objectif avec des ressources en eau identiques ou même réduites sans sacrifier d'autres services et fonctions écologiques de l'eau.Ils ont en outre ajouté que le défi est d'autant plus complexe lorsque l'on prend en compte d'autres facteurs de pression pesant sur cette ressource, tels que le changement climatique, la pollution, la mauvaise gestion et les politiques, ainsi que les modifications du paysage.

Pourtant, dans la pratique, ces deux domaines de connaissance et de pratique restent remarquablement déconnectés. Dans la première revue de littérature systématique à l'interface de l'irrigation et de l'agroécologie, Leauthaud et al. (2025) ont identifié 38 articles scientifiques dans la base de données « Clarivate Web of Science » jusqu'en avril 2023. Parmi ceux-ci, moins de dix ont adopté une approche analytique et critique de la relation, et l'irrigation n'a été le plus souvent mentionnée que de manière superficielle — comme un élément agricole plutôt que comme un atout agroécologique potentiel (Leauthaud et al., 2025) et une méthode essentielle pour une production alimentaire durable. Il est apparu que les termes « irrigation » et « agroécologie » étaient statistiquement sans rapport au sein des articles eux-mêmes: ils figuraient dans des sections distinctes et avec de faibles interactions, ce qui indique que, même lorsqu'ils apparaissent dans la même étude, ils sont rarement intégrés (Leauthaud et al., 2025). Cela pourrait s'expliquer par le fait que la communauté scientifique n'a pas explicitement fait reconnaître une étude conjointe de ces deux domaines conceptuels et pratiques, ni pour une évaluation de leur impact collectif sur les ressources naturelles, les pratiques agricoles et la productivité agricole; une situation qui peut être considérée, jusqu'à présent, comme une occasion manquée.

Ce fossé disciplinaire trouve ses racines dans des structures profondes. L'irrigation et l'agroécologie diffèrent par leurs récits (agriculture conventionnelle contre agriculture alternative), leurs objectifs (efficacité et productivité par rapport à la santé et aux moyens de subsistance), leurs approches (technologique ou holistique), leurs échelles d'analyse et de mise en œuvre (parcelle et système d'irrigation par rapport à l'exploitation agricole et aux systèmes alimentaires locaux, régionaux ou mondiaux), ainsi que par leurs parties prenantes (associations, ministères gouvernementaux et laboratoires de recherche distincts) (Leauthaud et al., 2025 ; Fischer et al., 2025). Ces différences ont conduit à des occasions

manquées de concevoir des systèmes d'irrigation capables de renforcer les fonctions et services écosystémiques (Leauthaud & Leenhardt, 2025).

Face à l'accélération du changement climatique, cette coupure n'est plus défendable. Le GIEC (2023) a mis l'accent sur le fait que le changement climatique affecte déjà la disponibilité de l'eau, la productivité agricole et la sécurité alimentaire de diverses régions, les impacts les plus sévères se concentrant dans les zones arides et semi-arides où l'irrigation fait souvent la différence entre les mauvaises récoltes et les récoltes viables. Zhao et al. (2026) ont démontré que le changement climatique et l'expansion de l'irrigation remodèlent déjà la pression hydraulique et les interactions amont–aval dans le bassin versant du Lancang–Mékong, avec des gains locaux d'économie d'eau de plus en plus compensées par l'expansion de l'irrigation à l'échelle du bassin — une découverte ayant des implications mondiales pour les agroécosystèmes irrigués sous stress climatique. Il n'existe plus la question de savoir si l'irrigation et le drainage doivent faire partie de la transition agroécologique, mais de savoir la manière dont ils peuvent être remodelés et repositionnés pour y contribuer.

État actuel des connaissances : l'irrigation, «acolyte invisible» de l'agroécologie

Une base de preuves fragmentée

La revue systématique faite par Leauthaud et al. (2025) a révélé que la littérature scientifique au croisement de l'irrigation et de l'agroécologie est non seulement rare mais fragmentée. La plupart des 38 articles identifiés se sont limités à des analyses du bilan hydrique de systèmes de culture ou à des manipulations expérimentales essayant des pratiques agroécologiques individuelles dans des conditions irriguées, à l'échelle de la parcelle. Seulement un petit nombre d'études a reconnu la coexistence de l'irrigation et de l'agroécologie en tant que des composantes compatibles d'un système, et moins encore ont soutenu que l'irrigation offrait une opportunité aux systèmes agroécologiques (Mdee et al., 2019 ; Leauthaud et al., 2022a, 2022b ; Romero et al., 2022 ; Altieri, 1992).

Inversement, plusieurs articles ont opposé explicitement l'irrigation et l'agroécologie, associant l'irrigation à une utilisation intensive d'intrants et à l'industrialisation de l'agriculture (Perez Neira, 2016; Gross et Jaubert, 2019 ; Basche et Edelson, 2017). Cette opposition reflète un récit plus large présentant l'irrigation comme un outil de la Révolution verte et des systèmes agro-industriels, apparemment éloigné des principes agroécologiques (Leauthaud et al., 2025).

Nouvelles preuves à l'échelle de la parcelle

Malgré la pénurie générale, un certain nombre d'études récentes ont commencé à démontrer que l'irrigation et les pratiques agroécologiques peuvent se renforcer mutuellement lorsqu'elles sont conçues conjointement :

Irrigation déficitaire et viticulture agroécologique. Romero et al. (2022) ont fourni l'examen le plus complet à ce jour sur la combinaison des stratégies d'irrigation déficitaire et des pratiques agroécologiques dans les vignobles méditerranéens, affirmant que l'irrigation et l'agroécologie devraient être associées pour améliorer conjointement l'efficacité de l'utilisation de l'eau, la productivité et la durabilité. Xue et al. (2025) ont démontré que le report de l'irrigation réduisait la consommation totale d'eau de 54,8% tout en améliorant les avantages économiques et en réduisant les maladies des cultures, ce qui suggère qu'un stress hydrique stratégique peut servir à la fois des objectifs de productivité et des fonctions écologiques.

Agriculture de conservation en conditions irriguées. Kienzler et al. (2012) ont montré que les pratiques d'agriculture de conservation sous irrigation ont modifié les modèles

FACE AU DEFI CLIMATIQUE, COMMENT L'IRRIGATION ET LE DRAINAGE PEUVENT CONTRIBUER A LA TRANSITION AGROECOLOGIQUE?

L'agroécologie se définit comme la conception et la mise en œuvre d'une agriculture durable fondée sur des principes et des services écologiques. Elle adopte une approche holistique, multi-échelle et multi-acteurs visant à remodeler les systèmes alimentaires en réponse aux défis environnementaux (y compris climatiques), économiques et sociaux.

Traditionnellement, l'irrigation et le drainage — qu'ils soient de surface ou souterrains — sont utilisés pour gérer la disponibilité, l'allocation et la gestion de l'eau en apportant de l'eau en l'absence de précipitations et en retirant l'eau excédantaire en cas de précipitations excessives, afin d'améliorer la productivité agricole. Ces outils sont souvent associés à des systèmes agro-industriels intensifs en intrants et nuisibles à l'environnement, semblant ainsi éloignés des principes agroécologiques. Ces outils sont souvent associés à des systèmes agro-industriels à forte intensité d'intrants et à l'utilisation de produits nocifs pour l'environnement, apparemment éloignés des principes agroécologiques.

Cependant, face au changement climatique, l'irrigation et le drainage, ainsi que la collecte de l'eau, doivent être reconsidérés non seulement comme des outils d'intensification, mais aussi comme des éléments clés de systèmes résistants au climat, respectueux de l'environnement et ancrés dans leur territoire. À ce titre, ils peuvent être intégrés dans des solutions fondées sur la nature visant à stabiliser ou à accroître les rendements, à améliorer la santé des sols, à réduire les impacts environnementaux négatifs et à favoriser une production diversifiée.

Des recherches émergentes — bien qu'encore limitées — proposent que ces pratiques de gestion de l'eau peuvent contribuer activement aux transitions agroécologiques, en particulier lorsqu'elles sont combinées à des connaissances autochtones et à des pratiques traditionnelles adaptées aux contextes locaux. Les instruments politiques et économiques joueront également un rôle crucial pour encourager cette évolution, en alignant les incitations sur les objectifs de durabilité à long terme.

Malgré leur potentiel, les liens entre l'agroécologie et l'irrigation et le drainage restent peu explorés : en avril 2023, seuls 38 articles scientifiques on établi un lien explicite entre ces outils de gestion. Souvent, l'irrigation est mentionnée de manière superficielle, sans analyse approfondie de son rôle transformateur et sans lien avec les considérations relatives aux services agroécologiques.

Ce congrès vise à combler cette lacune. Il invite les chercheurs, les praticiens et les décideurs politiques à explorer la manière dont l'irrigation, le drainage de surface et souterrain, la collecte des eaux de pluie et les solutions d'eau fondées sur la nature — lorsqu'ils s'appuient sur des principes agroécologiques — peuvent contribuer à construire des systèmes alimentaires durables, inclusifs et résistants pour l'avenir.

d'utilisation de l'eau en Asie centrale, tandis que Mohammad et al. (2018) ont montré que le riz ensemencé directement dans l'agriculture de conservation dans les plaines indo-gangétiques a réduit la consommation d'eau par rapport au riz repiqué. Grâce à un réseau de programmes de recherche, de démonstration et d'éducation bien planifié, coordonné et exécuté (Réseau de gestion de l'eau agricole, AWMN), Irmak (2023) a montré qu'une mise

en œuvre technologique à grande échelle en partenariat avec près de 1 000 producteurs (représentant 1,20 million d'hectares de terres cultivées irriguées), peut entraîner une réduction des prélèvements d'eau de 144 mm/ha par saison de croissance en raison de l'adoption de technologies et de stratégies de gestion démontrées et enseignées dans l'AWMN. Entre la période 2005 et 2020, on estime que l'AWMN.a réduit les prélèvements d'eau d'irrigation de plus de 5 milliards de m3 (5 km3; 4,1 millions d'acre-pied), et cette eau conservée a été mise à disposition pour d'autres usages agroécologiques. Le AWMN est devenu le programme de gestion de l'eau basé sur la recherche le plus important et le plus percutant aux États-Unis, réalisant une adoption considérable de la technologie et du transfert d'informations/de connaissances dans l'agriculture grâce à un partenariat solide et dévoué entre les universités, l'industrie privée, les agences étatiques et fédérales, les producteurs, les périmètres irrigués et les consultants en culture. Cela indique qu'en travaillant en partenariat avec tous les professionnels et praticiens impliqués dans l'agriculture, la gestion de l'eau et l'agroécologie, des réductions significatives peuvent être réalisées dans l'agriculture irriguée qui peuvent être mises à disposition pour protéger/maintenir les services agroécologiques et environnementaux. Kukal et Irmak (2021) ont examiné les effets exercés par l'agriculture de conservation (CA) sur la capacité de rétention d'eau du sol et les économies d'eau dans diverses conditions agroécologiques, en constatant que les effets de l'agriculture de conservation (CA) sur les économies d'eau variaient en fonction des pratiques de gestion et du contexte agroécologique — une nuance critique pour l'interface irrigation–agroécologie. Alletto et al. (2022) ont montré que les propriétés physiques du sol sont fortement influencées par les systèmes de culture, que la densité apparente du sol est généralement plus élevée en agriculture de conservation, que la conductivité hydraulique du sol est généralement plus élevée et plus stable au fil du temps en agriculture de conservation, et que la rétention d'eau dans le sol est équivalente ou légèrement supérieure dans l'agriculture de conservation que dans les sols labourés de manière conventionnelle. Plus récemment, Devkota et al. (2025) ont montré que des solutions agronomiques spécifiques au contexte intégrant l'agriculture de conservation avec une irrigation optimisée obtenaient des gains agronomiques avec une empreinte environnementale réduite dans les zones arides irriguées en Égypte.

Irrigation de précision et à débit variable. Sharma et Irmak (2020) ont réalisé des comparaisons économiques entre l'irrigation à débit variable et la fertigation avec une irrigation à débit fixe (uniforme), démontrant qu'une gestion spécifique de l'eau et des nutriments peut améliorer à la fois la productivité de l'eau et les rendements économiques tout en réduisant l'intensité des intrants — un résultat conforme aux principes agroécologiques de réduction des intrants et d'efficacité des ressources. Sharma et Irmak (2021a) ont par ailleurs démontré que l'efficacité de l'irrigation à débit variable dépend fortement de la variabilité spatiale du type de sol, de la topographie et de la dynamique eau-sol. Sur une période de trois ans et pour trois types de sols, ils ont observé que l'évapotranspiration des cultures et la réserve en eau du sol réagissent différemment à la gestion de l'irrigation et de l'azote selon la position du paysage; cela prouve que les stratégies d'irrigation uniforme ne tiennent pas toujours compte de manière adéquate des besoins en eau des cultures, lesquels sont spatialement hétérogènes. Sharda et al. (2022) ont avancé la résolution spatiale de la gestion de l'irrigation en évaluant le stress hydrique des cultures au niveau d'une partie de parcelle dans le cadre de l'irrigation à débit variable, fournissant ainsi la base technique pour une planification de l'irrigation qui tienne compte de l'hétérogénéité de la parcelle — une condition préalable à la gestion de systèmes de culture diversifiés, orientés vers l'agroécologie, où la demande en eau varie dans l'espace et dans le temps. Irmak et al. (2025) ainsi qu'Irmak et Hinn (2025) ont montré la manière dont l'irrigation à débit variable dans différents types de sol peut être gérée efficacement pour augmenter la productivité des cultures et l'efficacité d'utilisation des intrants. Irmak et al. (2023) ainsi qu'Irmak et Mohammed (2023) ont étudié la manière dont différentes méthodes/systèmes d'irrigation (irrigation goutte-à-goutte souterraine, irrigation

par pivot central et irrigation gravitaire par sillons) peut être gérée efficacement pour l'irrigation et la gestion de l'azote. L'étude vise à améliorer la rentabilité de la production de maïs, à augmenter l'efficacité de l'utilisation de l'azote et la productivité de l'eau des cultures afin de conserver ces ressources critiques et d'aider à protéger les services agroécologiques en réduisant ou minimisant la contamination chimique des ressources en eaux souterraines et de surface, tout en mettant davantage d'eau à la disposition des sstèmes agroécologiques grâce à des pratiques avancées de conservation et de gestion.

Irrigation goutte à goutte et fertigation biologique. Plusieurs études ont identifié l'irrigation goutte-à-goutte comme une pratique compatible avec les objectifs agroécologiques, en particulier lorsqu'elle est associée à des stratégies de fertigation biologique (Guzman et Alonso, 2008 ; Leauthaud et al., 2022b; Akakpo et al., 2021). D'autres projets de recherche ont mis en évidence des stratégies efficaces de gestion de l'irrigation et de la fertigation pour l'irrigation goutte-à-goutte souterraine, en tenant compte de la diversité des sols, des cultures, des méthodes d'irrigation et des pratiques de gestion (travail du sol, densité des plantes, etc.) dans différents climats afin d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et des nutriments par les cultures et d'améliorer le rendement dans des conditions d'irrigation complète, déficitaire et limitée (Payero et al., 2008; Irmak et al., 2015; Irmak et Djaman, 2016; Yonts et al., 2018; Mohammed et Irmak, 2022; Irmak et al., 2023; Irmak, 2024). L'irrigation goutte-à-goutte permet d'utiliser des engrais organiques concentrés nécessitant moins d'énergie et peut être combinée avec des cultures de couverture et du paillis pour réduire l'évaporation (Wezel et al., 2014). Cependant, la classification de l'irrigation goutte-à-goutte en tant que pratique agroécologique a été remise en question en raison de la consommation de plastique et des effets de rebond à des échelles spatiales plus grandes (Leauthaud et al., 2025 ; Grafton et al., 2018). Irmak et al. (2024) et Irmak et al. (2025) ont souligné qu'outre les intrants traditionnels (eau, nutriments, produits chimiques) appliqués au sol et absorbés par les cultures, l'utilisation/l'application d'autres intrants en agriculture — tels que les plastiques synthétiques — connaît une augmentation d'application pour diverses applications agricoles, entraînant une contamination environnementale et d'autres défis. Le paillage en plastique synthétique est particulièrement retenu pour la lutte contre les mauvaises herbes dans certaines cultures où peu d'herbicides sont disponibles. Les paillis fabriqués à partir de polymères synthétiques tels que le polyéthylène sont couramment utilisés en agriculture. Cependant, ces polymères à base de pétrole sont stables/non dégradables et leur utilisation généralisée dans les parcelles agricoles peut créer de graves problèmes environnementaux.

Cultures de couverture et interactions d'irrigation. Rouge et al. (2022) ont démontré que l'irrigation peut favoriser l'établissement de cultures de couverture et soutenir leur développement pour fournir les services écosystémiques attendus, soulignant les effets d'interaction entre la gestion de l'eau et les pratiques agroécologiques. Basche et Edelson (2017) ont décrit comment les pratiques favorisant une couverture végétale continue améliorent la gestion de l'eau en modifiant le bilan hydrique et en augmentant les fonctions hydrologiques du sol. Irmak et al. (2018) ont déclaré que, en plus de fournir de l'azote et d'autres nutriments et micronutriments bénéfiques à une culture commerciale ultérieure, les cultures de couverture peuvent également enrichir le sol en matière organique, ce qui peut améliorer la matière organique du sol, les propriétés physiques du sol et les caractéristiques d'infiltration. Les cultures de couverture possède également le potentiel d'améliorer la capacité du sol à transporter des machines et d'améliorer l'accessibilité aux parcelles (principalement dans les zones humides à forte précipitation), ainsi que d'éliminer l'eau excédentaire et de maintenir les composants structurels du sol.

Irrigation et diversification des cultures. Altieri (1992) a vu l'irrigation comme une opportunité pour la diversification des cultures et un moyen d'améliorer la résistance du système, tandis que Leauthaud et al. (2022a) ont décrit l'irrigation comme un facteur important

dans le développement de l'agroforesterie dans les oliveraies en Tunisie. En Tanzanie, Mdee et al. (2019) ont montré que les exploitations agricoles offraient de meilleurs moyens de subsistance lorsque des systèmes de production agroécologiques étaient mis en œuvre avec un accès conjoint à l'irrigation.

Preuves à l'échelle de la ferme, du territoire et des systèmes alimentaires

Les recherches menées à des échelles dépassant celle de la parcelle restent particulièrement rares. Moraine et al. (2016) ont montré que l'introduction de systèmes de culture moins exigeants en eau dans des zones en stress hydrique pouvait influer sur les ressources en eau à l'échelle du territoire; des cultures nécessitant moins d'irrigation, comme la luzerne, permettaient en effet d'équilibrer la consommation d'eau d'irrigation à l'échelle du bassin versant tout en favorisant des systèmes intégrés associant cultures et élevage. Galeana-Pizana et al. (2021) ont mis en évidence les liens entre l'irrigation et les caractéristiques du système alimentaire, indiquant que l'irrigation à petite échelle pourrait considérablement augmenter les rendements des petits exploitants dans les écorégions plus sèches où les produits agroécologiques sont vendus dans les marchés locaux.

Selon la perspective de sciences sociales, Gross et Jaubert (2019) ont étudié des cas d'échec dans la mise en œuvre concernant aussi bien des projets de développement de l'irrigation que des projets de développement agroécologique au Burkina Faso. Ils ont relevé de nombreuses similitudes entre ces deux types de projets et ont formulé des critiques constructives sur la manière dont ils sont promus, sans prendre suffisamment en compte la diversité des situations et des stratégies des petits agriculteurs. Les conséquences hydrologiques de l'irrigation à l'échelle du bassin ont été documentées par Zhang et al. (2014), qui ont montré que l'irrigation économe en eau dans l'oasis du bassin versant deTarim avait exercé des impacts complexes sur la dynamique des eaux souterraines et sur la gestion durable de l'eau, ainsi que par Zhao et al. (2026), qui ont démontré que le changement climatique et l'expansion de l'irrigation a remodelé la pression hydrique dans le bassin du Lancang–Mékong — preuve que la transition agroécologique des systèmes irrigués doit être évaluée dans son contexte hydrologique et sociohydrologique plus large (Liu et al., 2014, 2015; Han et al., 2017).

Changement climatique comme catalyseur de réconciliation

Le changement climatique intensifie l'urgence de combler les lacunes entre l'irrigation et l'agroécologie. Le sixième rapport d'évaluation du GIEC (2023) documente l'augmentation de la fréquence et de la gravité des sécheresses, la modification des régimes de précipitations et la hausse des températures qui affectent de manière disproportionnée les systèmes agricoles des régions confrontées à la pénurie d'eau. Pörtner et al. (2022) ont souligné que les impacts du changement climatique sur les systèmes alimentaires sont médiatisés par l'eau, faisant de la gestion de l'eau un levier central pour l'adaptation au climat.

Dans ce contexte, l'irrigation et le drainage doivent être envisagés non seulement comme des outils d'intensification, mais aussi comme des composantes clés de systèmes résistant au climat et fondés sur des principes écologiques. Ils peuvent contribuer à des solutions fondées sur la nature ou à des solutions hybrides «gris-vert» lorsque leur conception préserve ou restaure les fonctions écosystémiques et offre des avantages mesurables pour la biodiversité et le bien-être humain (Tarolli et al., 2026). Il a été démontré que l'irrigation d'appoint — l'application de faibles quantités d'eau à des stades critiques du développement des cultures dans des systèmes principalement pluviaux — permet de plus que doubler le rendement en grains par goutte d'eau dans les systèmes agricoles situés dans les zones arides dans les pays tels que la Chine, l'Inde, l'Irak, le Maroc et l'Ouzbékistan (Nangia et al., 2018 ; Devkota et al., 2023). Cela prouve qu'une utilisation stratégique de l'irrigation peut stabiliser la production pluviale face à une variabilité climatique croissante, sans incliner à des systèmes entièrement irrigués et intensifs à haut niveau d'intrants. La collecte des eaux de pluie offre une option

fondée sur les écosystèmes à l'interface entre agriculture pluviale et irriguée. Tarolli et al. (2026) ont coécrit une synthèse approfondie sur les solutions fondées sur la nature pour la conservation des sols et de l'eau en période d'extrêmes climatiques, mettant en évidence le rôle joué par la gestion des eaux de pluie dans les systèmes pluviaux. Dans une analyse mondiale du potentiel de collecte des eaux de pluie, Piemontese et al. (2020) ont évalué la transmissibilité de ces pratiques à partir d'études de cas réussies; ils ont démontré que ces approches permettent de combler les lacunes entre la vulnérabilité de l'agriculture pluviale et la stabilité de l'agriculture irriguée, sans engendrer les coûts environnementaux associés aux infrastructures d'irrigation conventionnelles à grande échelle. Villani et Castelli (2025) a utilisé une approche de modélisation participative pour explorer les stratégies de stockage combinant grands barrages et petits réservoirs dans le contexte du changement climatique, afin d'étudier leur complémentarité en fournissant les outils de planification spatiale nécessaires pour intégrer la collecte des eaux de pluie dans la conception de paysages agroécologiques.

Inversement, les pratiques agroécologiques peuvent réduire la demande en eau d'irrigation grâce à divers mécanismes, notamment une meilleure rétention d'eau par le sol, une augmentation de la matière organique, la diversification des systèmes de culture nécessitant moins d'eau et une amélioration de la structure du sol (Mdee et al., 2019 ; Basche et Edelson, 2017 ; Çakmakçı, 2025). Cette relation bidirectionnelle — l'irrigation soutenant les pratiques agroécologiques et les pratiques agroécologiques réduisant la dépendance à l'irrigation — représente un cycle vertueux qui a été insuffisamment étudié ou exploité.

Vers l'irrigation multiservice : un cadre conceptuel de réconciliation

Leauthaud et Leenhardt (2025) ont proposé l'irrigation multiservice comme paradigme visant à concilier la gestion de l'eau et les objectifs agroécologiques. Dans ce cadre, l'irrigation n'est pas seulement planifiée et mise en œuvre pour soutenir les rendements et la production de biomasse, mais aussi pour renforcer les fonctions écosystémiques essentielles à une production alimentaire durable. L'irrigation multiservice repose sur l'interaction entre les aspects de fonctionnement du système d'irrigation — notamment sa configuration, son contrôle et les volumes d'eau apportés — et les pratiques agroécologiques, afin d'améliorer les fonctions écologiques des sols et des plantes et de générer un ensemble de services écosystémiques (Leauthaud et Leenhardt, 2025). Ce concept constitue une base précieuse pour la démarche présentée ici. La socio-hydrologie l'enrichit en considérant l'irrigation et le drainage comme des interventions au sein de systèmes couplés « humains-eau », où les politiques, les technologies, les réactions des agriculteurs, les modes d'allocation et les évolutions des écosystèmes co-évoluent (Liu et al., 2014, 2015 ; Han et al., 2017 ; Tian et al., 2026).

Le cadre de l'irrigation multiservice identifie sept principes partagés par l'agroécologie et la science de l'irrigation : le recyclage/la circularité, la réduction des intrants/l'efficacité, la gouvernance des terres et des ressources naturelles, la participation, l'innovation et le partage des connaissances. (Leauthaud & Leenhardt, 2025; Wezel et al., 2020; CIID, 2017; Tardieu, 2005; Ostrom, 1993). En intégrant d'autres principes agroécologiques — la santé des sols, la biodiversité, la synergie, la diversification économique, les valeurs sociales et les régimes alimentaires, l'équité et la connectivité — dans la planification des systèmes d'irrigation, ce cadre envisage l'irrigation comme un moyen de fournir une pluralité de services écosystémiques.

Ce cadre conceptuel a des parallèles dans la littérature plus large sur l'agriculture multifonctionnelle et l'intensification écologique. Rasmussen et al. (2024) ont démontré dans la Reve « Science » que la diversification de l'agriculture offre des avantages environnementaux et sociaux conjoints, tandis que Nika et al. (2020) ont plaidé pour l'intégration des principes de l'économie circulaire dans les systèmes d'eau. Okiria et al. (2021), dans une revue publiée

dans « Sustainability », ont examiné le potentiel de paiement pour les services écosystémiques (PES) provenant de l'exploitation des structures de contrôle de l'eau agricoles, faisant valoir que les infrastructures d'irrigation et de drainage peuvent être gérées pour fournir des ensembles de services écosystémiques au-delà de la production agricole — y compris la régulation des inondations, la préservation de la biodiversité et les services culturels — si des instruments économiques appropriés sont déployés.

En outre, ces fonctions multiservices ne constituent pas des avantages passifs de l'infrastructure physique mais nécessitent une gestion active et à forte intensité de main-d'œuvre par les institutions locales. Dans le cadre du projet d'irrigation de Kotsu dans la préfecture d'Aichi, au Japon, Otsuka et al. (2025) ont utilisé le nombre de fonctionnement de vannes comme indicateur quantitatif de l'effort de gestion. Ils ont constaté que, bien que les opérations liées à l'irrigation soient restées stables malgré la perte de terres agricoles en forme de mosaïque, le nombre total de fonctionnement de vannes est passé de 3358 à 4974 entre les périodes passées et présentes en raison de l'intensification des opérations de protection contre les crues. Cela démontre que la gestion de l'eau à usages multiples est un service écosystémique actif et soutenu par l'homme.

Drainage en tant qu'outil agroécologique

Bien que l'interface irrigation–agroécologie ait commencé à attirer l'attention, le rôle joué par le drainage dans les transitions agroécologiques reste encore moins exploré. Il a été démontré que le drainage contrôlé — qui comprend la gestion de la profondeur et le calendrier d'évacuation des eaux de drainage souterrain — réduit de 30 à 50% les pertes de nitrates vers les milieux récepteurs, tout en maintenant ou en améliorant les rendements des cultures (examiné dans Skaggs et al., 2012, ainsi que, plus récemment, les évaluations des services écosystémiques réalisées par Mitchell et al., 2023). Les bioréacteurs de dénitrification et les zones tampons saturées, installés au bord de parcelles équipées de tuyaux souterrains, peuvent éliminer des nitrates de l'ordre de 25 et 98% présents dans les eaux de drainage avant qu'il n'atteigne les eaux de surface (Christianson et al., 2017); il s'agit là d'une solution fondée sur la nature qui concilie les infrastructures de drainage avec les objectifs de qualité de l'eau et de préservation des services écosystémiques.

Le drainage contrôlé offre également des perspectives en matière d'atténuation du changement climatique. En maintenant des niveaux des nappes phréatiques plus élevés durant les périodes de jachère, cette technique peut ralentir la décomposition de la matière organique et préserver le carbone du sol dans les sols organiques drainés (D'Acunha et al., 2026). La réutilisation des eaux de drainage pour but d'irrigation d'appoint — une pratique documentée dans les régions arides et semi-arides — représente une forme de circularité de l'eau agricole qui s'aligne à la fois sur l'efficacité de l'irrigation et sur les principes agroécologiques (Nika et al., 2020). Ces innovations en matière de drainage ont rarement été évaluées dans un cadre agroécologique explicite. Une démarche crédible doit également prendre en compte l'engorgement des sols, la salinité, les besoins de lessivage, l'évacuation des sels, la consommation d'énergie et la qualité de l'eau en aval (Zhang et al., 2014).

Paradoxe de l'efficacité de l'irrigation et ses implications agroécologiques

Toute réflexion sur l'irrigation dans le cadre des transitions agroécologiques doit prendre en compte le paradoxe de l'efficacité de l'irrigation mis en évidence par Grafton et al. (2018) dans la revue *Science*. L'amélioration de l'efficacité de l'irrigation à l'échelle de l'exploitation entraîne souvent une augmentation de la consommation d'eau à l'échelle du bassin, les agriculteurs étendant les surfaces irriguées ou se tournant vers des cultures à plus forte valeur ajoutée mais plus gourmandes en eau; il s'agit d'un effet rebond qui compromet les objectifs de conservation de la ressource en eau. Zhang et al. (2014) ont documenté ce phénomène dans le bassin versant de Tarim, où une irrigation économe en eau à l'échelle de

la parcelle a exercé des effets complexes sur les eaux souterraines et la salinité des oasis. Zhao et al. (2026) ont étendu cette analyse au bassin du Lancang–Mékong, montrant que le changement climatique et l'expansion de l'irrigation interagissent pour remodeler la pression hydrique d'une manière que les gains d'efficacité locaux seuls ne peuvent résoudre.

Ce cadrage de rebond, cependant, n'est pas sans défi. Une vision mécaniste plus directe soutient que l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation réduit le volume d'eau prélevé des sources de surface et souterraines par unité de culture produite, et que cette réduction du prélèvement est l'effet le plus fondamental et mesurable des gains d'efficacité. Selon cette vision, les augmentations de la consommation à l'échelle du bassin observées dans certaines études peuvent refléter des facteurs confondants tels que les incitations politiques, les changements de culture induits par le marché, ou l'expansion de la superficie irriguée pour des raisons indépendantes des améliorations d'efficacité plutôt qu'un rebond causal direct induit par l'efficacité elle-même. Pour concilier ces perspectives, il convient de distinguer le prélèvement d'eau (que les gains d'efficacité tendent à réduire) de la consommation ou de l'épuisement de la ressource à l'échelle du bassin (qui peut augmenter pour des raisons seulement partiellement liées à l'efficacité au niveau de l'exploitation), une distinction qui n'est pas toujours explicite dans la littérature consacrée à l'effet de rebond.

Ce paradoxe exerce des implications majeures sur la transition agroécologique : si l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation permet simplement une production plus intensive, elle risque d'aller à l'encontre des objectifs agroécologiques de réduction des intrants et de gestion responsable des ressources. Pour y remédier, il est nécessaire de mettre en place des limites à l'échelle du bassin sur la consommation et l'expansion des zones irriguées, de tenir en compte des débits récupérés et de coordonner la politique hydrique et foncière, plutôt que de se focaliser uniquement sur des objectifs d'efficacité (Liu et al., 2014, 2015 ; Leauthaud et Leenhardt, 2025).

Par ailleurs, cet indicateur unidimensionnel ne tient compte ni des cycles hydrologiques locaux impliquant le recyclage de l'eau, ni du vaste réseau d'externalités positives — telles que l'atténuation des inondations, la realimentation des nappes phréatiques ou la conservation des écosystèmes — dont la valeur est estimée à 48,6 milliards de dollars par an dans le cas du Japon (Conseil scientifique du Japon, 2001). Pour réconcilier avec ce paradoxe, les cadres de surveillance mondiale doivent évoluer vers une évaluation globale de l'eau qui intègre formellement ces externalités positives.

Politiques et instruments économiques : Assurer la transition

Les cadres politiques actuels compartimentent souvent l'irrigation et l'agroécologie, en les traitant comme des questions distinctes gérées par différents départements gouvernementaux, soutenues par différents mécanismes de financement et évaluées selon différents indicateurs de performance. (Leauthaud et al., 2025; Leauthaud & Leenhardt, 2025). Cette compartimentation constitue un obstacle structurel à l'approche intégrée nécessaire.

La littérature récente sur les politiques publiques propose des voies pour l'avenir. Das et al. (2025) ont souligné le rôle joué par des politiques, des technologies et de l'innovation pour réaliser la résistance des ressources dans la gestion de l'eau. Le Compendium de politiques de la Banque mondiale (2025) sur la réorientation du soutien agricole a recommandé de réorienter les subventions des intrants vers des incitations conditionnelles qui réduisent l'utilisation de l'eau par unité de production et améliorent les résultats environnementaux (Banque mondiale, 2025). Okiria et al. (2021) ont soutenu que le paiement des services écosystémiques (PES) provenant des ouvrages de maîtrise de l'eau agricoles pourrait créer des incitations économiques pour la gestion des infrastructures d'irrigation et de drainage afin de fournir de multiples services écosystémiques, bien tout en notant que les projets de PES dans le domaine de l'eau agricole restent rares et géographiquement limités.Timpanaro et

al. (2026) ont examiné les cadres politiques soutenant l'agroécologie en Méditerranée. Les preuves sociohydrologiques montrent en outre que les valeurs sociétales et les structures de gouvernance co-évoluent et peuvent permettre ou contraindre les transitions vers la durabilité (Wei et al., 2023).

Une priorité de recherche essentielle comporte l'analyse et la conception des politiques publiques qui font simultanément progresser l'irrigation durable et les transitions agroécologiques. Cela inclut l'examen des instruments de politique existants afin de déterminer s'ils favorisent par inadvertance les modèles agricoles conventionnels à forte consommation d'intrants, et comment ils pourraient être réformés. Les politiques, qui lient l'accès à l'eau à l'adoption de pratiques agroécologiques, la planification spatiale des systèmes d'irrigation pour refléter à la fois la disponibilité des ressources et les besoins locaux, ainsi que les instruments multi-échelles conciliant intérêts privés et publics, représentent des orientations prometteuses. La communauté CIID, grâce à ses liens établis avec les ministères chargés de l'eau, les organismes d'irrigation, les partenaires du secteur privé et les réseaux professionnels dans plus de 90 pays, est idéalement placée pour faire avancer cette démarche politique.

Priorités de recherche pour l'irrigation, le drainage et la transition agroécologique

Sur la base des lacunes identifiées dans la revue de littérature et de l'expertise collective de l'équipe d'auteurs chargée de la «Question 66», nous proposons six priorités de recherche qui complètent les thèmes de pointe soulignés par Leauthaud et Leenhardt (2025). La Hongrie recherche des moyens innovants d'utiliser les systèmes d'irrigation et de drainage pour la rétention d'eau et/ou le réapprovisionnement en eau, en établissant un nouveau calendrier d'exploitation. Ce nouveau calendrier permet de stocker l'eau dans le sol; l'élévation du niveau de la nappe phréatique devrait, espère-t-on, réduire les besoins en eau d'irrigation. (Szamosvari, 2026) Bien que leurs thèmes aient abordé le concept d'irrigation multiservice d'un point de vue principalement conceptuel et méditerranéen, nos priorités émergent des aspects pratiques, technologiques, hydrologiques, et institutionnels des défis auxquels sont confrontés les professionnels de l'irrigation et du drainage dans divers contextes géographiques et de développement — des systèmes d'irrigation de précision du Midwest américain aux paysages de collecte des eaux en Afrique subsaharienne, en passant par l'agriculture oasienne en Asie centrale et les systèmes rizicoles en Asie du Sud et du Sud-Est.

Priorité 1: Irrigation de précision et à débit variable comme catalyseurs de la diversification agroécologique

Les technologies d'irrigation à débit variable (VRI) et de fertigation spécifique au site, développées principalement pour les systèmes de monoculture conventionnels, n'ont pas fait l'objet d'une évaluation systématique quant à leur capacité à favoriser la diversification agroécologique à l'échelle du sous-champ. Par ailleurs, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour déterminer le seuil de variabilité au sein de la parcelle qui justifie la mise en œuvre de la technologie VRI afin d'améliorer la productivité de l'eau des cultures et d'économiser les ressources en eau ainsi que d'autres intrants. Sharma et Irmak (2020 ; 2021a, b) ont démontré la viabilité économique de la VRI et de la fertigation par rapport à une gestion à débit uniforme, tout en montrant que la VRI spécifique au sol et la fertigation à débit variable peuvent réduire les intrants d'irrigation et d'engrais tout en maintenant la productivité des cultures. Sharda et al. (2022) ont également démontré qu'il est possible de cartographier le stress hydrique des cultures à l'échelle du sous-champ, offrant ainsi une base pour une gestion de l'irrigation ciblée spatialement. Toutefois, ces technologies ont été déployées presque exclusivement dans des systèmes de culture intensifs en intrants. Un recherche critique exige d'adapter et d'évaluer les technologies d'irrigation de précision pour des systèmes de culture diversifiés et multi-espèces — y compris les cultures mixtes, l'agroforesterie et les cultures en relais — où la demande en eau varie non seulement dans

l'espace mais aussi dans le temps selon les espèces cultivées et le stade de croissance au sein d' d'une même parcelle. Cela nécessiterait de nouvelles configurations de capteurs, des algorithmes d'aide à la décision et des protocoles de planification d'irrigation qui tiennent compte de la complexité des polycultures plutôt que de l'uniformité des monocultures. Irmak (2015) et Irmak (2024) ont fait progresser la compréhension de la réponse du maïs à différentes stratégies de gestion de l'irrigation (goutte-à-goutte souterraine et par aspersion), fournissant ainsi les données spécifiques à la culture concernant l'évapotranspiration (ET) et la réponse au rendement, nécessaires pour chaque espèce composant les systèmes diversifiés.

Priorité 2: Conséquences hydrologiques des transitions agroécologiques dans les paysages irrigués à l'échelle du bassin

Le paradoxe de l'efficacité de l'irrigation (Grafton et al., 2018) démontre que les économies d'eau réalisées à l'échelle de la parcelle ne se traduisent pas nécessairement, dans certains cas, par une conservation de la ressource en eau à l'échelle du bassin. Zhang et al. (2014) ont montré que l'irrigation économe en eau dans l'oasis de Tarim avait exercé des effets complexes sur la dynamique des eaux souterraines, tandis que Zhao et al. (2026) ont documenté la manière dont le changement climatique et l'expansion de l'irrigation remodèlent les pressions exercées sur la ressource en eau à l'échelle du bassin.Toutefois, il n'existe aucune étude de comparaison concernant les conséquences hydrologiques des transitions agroécologiques sur les paysages irrigués. Si un bassin versant irrigué de manière conventionnelle adopte une gestion agroécologique — intégrant des cultures de couverture, des rotations diversifiées, des techniques de conservation (réduite) ou de l'absence de travail du sol, et des modifications de la matière organique — il s'agit de savoir quels sont les effets cumulés sur l'évapotranspiration, la reéalimentation des nappes phréatiques, les débits récupérés et la disponibilité de l'eau en aval. Cela nécessite des modèles sociohydrologiques et agronomiques couplés qui représentent l'hydrologie, les décisions relatives aux cultures, la politique, l'adoption de technologies, l'expansion des terres et les retours d'expérience à différentes échelles (Liu et al., 2014, 2015 ; Han et al., 2017). L'évaluation doit rendre compte de la consommation, des débits récupérés, des eaux souterraines, de la salinité, de l'équité et des effets en aval par rapport à des scénarios contrefactuels explicites.

Priorité 3: Collecte des eaux de pluie et stockage à petite échelle en tant que solutions fondées sur la nature pour la transition d'une agriculture pluviale vers une agriculture irriguée

Dans de nombreuses régions arides, la transition agroécologique implique de passer de systèmes entièrement pluviaux à des systèmes partiellement irrigués grâce à une irrigation d'appoint alimentée par la collecte de l'eau plutôt que par les infrastructures d'irrigation conventionnelles. Villani et al. (2025) et Tarolli et al. (2025) ont fait progresser la compréhension des solutions fondées sur la nature pour la conservation des sols et de l'eau (restauration des zones humides et de la zone tampon riveraine — citées par Tarolli et al. (2025) pour la régulation de l'eau — dans le contexte des événements climatiques extrêmes), tandis que Piemontese et al. (2020) ont estimé le potentiel mondial de la collecte des eaux en s'appuyant sur des études de cas réussies. Des exemples typiques de pratiques de collecte des eaux de pluie sont les étangs creusés, utilisés pour la collecte et le stockage de l'eau de précipation au sein des terres agricoles en vue d'une irrigation d'appoint durant les périodes sèches (Liniger et Mekdaschi Studer, 2019). D'autres pratiques répandues sont les terrasses, construites sur des terrains en pente pour ralentir le ruissellement et augmenter l'infiltration et traditionnellement utilisées dans les zones montagneuses latino-américains, africains et asiatiques (Denevan, 2003, Mekdaschi Studer et Liniger, 2018, Saiz et al., 2016, Stroosnijder, 2009). En utilisant une approche de modélisation participative, Castelli et Villani et al. (2025) ont démontré la manière dont les grands barrages et les petits réservoirs peuvent être modélisés conjointement comme des stratégies de stockage complémentaires dans

un contexte de changement climatique. Cependant, le rôle joué par la collecte de l'eau en favorisant des transitions agroécologiques — en particulier la conception de systèmes de stockage à petite échelle qui soutiennent la diversification des cultures, l'intégration de l'élevage et la fourniture de services écosystémiques à l'échelle du paysage — reste insuffisamment exploré. Il est nécessaire de mener des recherches sur: (i) la quantification du potentiel de la collecte des eaux pour l'irrigation d'appoint de systèmes de cultures diversifiés dans les zones agroécologiques; (ii) l'évaluation des co-bénéfices des services écosystémiques des petits réservoirs et des ouvrages de collecte des eaux (biodiversité, séquestration du carbone, rétention des sédiments); et (iii) le développement des outils de planification participative intégrant la collecte des eaux dans la conception de paysages agroécologiques.

Priorité 4: Instruments économiques et innovation institutionnelle pour l'intégration de l'irrigation et de l'agroécologie

Les dimensions institutionnelles et économiques de l'intégration de l'irrigation et de l'agroécologie ont suscité beaucoup moins d'intérêt que les dimensions biophysiques. Okiria et al. (2021) ont examiné le potentiel des paiements pour services écosystémiques (PES) liés aux ouvrages de maîtrise de l'eau agricole; ils ont constaté que, bien que le concept soit prometteur, les dispositifs de PES dans ce domaine restent rares et géographiquement concentrés. Les recherches de Kawasaki sur la gestion des infrastructures hydrauliques agricoles au Japon (Kawasaki et al., 2024) et sur les bouquets de services écosystémiques fournis par les réseaux de canaux d'irrigation offrent un cadre pour réfléchir sur la valorisation, le financement et la gouvernance des infrastructures d'irrigation et de drainage. Il est nécessaire de mener des recherches sur: (i) le développement et l'essai des instruments économiques qui récompensent les opérateurs d'irrigation et de drainage pour la fourniture de services écosystémiques en plus de la distribution d'eau; (ii) la conception des dispositions de gouvernance de l'eau permettant de combler l'écart institutionnel entre les agences d'irrigation et les organismes de promotion de l'agroécologie ; et (iii) l'évaluation du rôle joué par les plateformes de parties prenantes multiples dans la promotion de la gestion conjointe des systèmes d'irrigation et agroécologiques, en s'appuyant sur les approches participatives documentées par Pahl-Wostl et al. (2008) et Ameur et Leauthaud (2024).

Priorité 5: Dynamique eau-sol et productivité de l'eau dans le cadre des interactions entre l'agriculture de conservation et l'irrigation

L'interaction entre les pratiques d'agriculture de conservation (AC) — sans travail du sol, cultures de couverture, maintien des résidus — et la gestion de l'irrigation est complexe sur le plan biophysique et dépend du contexte. Il est tout aussi crucial de reconnaître et de comprendre les effets de toute pratique de gestion des cultures et/ou des sols sur la consommation d'eau des cultures que d'en appréhender les impacts prévus. Le travail de conservation du sol est l'une de ces pratiques adoptées par les producteurs dans les régions américaines de culture du maïs; elle vise à maintenir environ 30 à 40% ou plus, de la couverture végétale résiduelle sur la surface du sol après le semis. La présence de nombreux facteurs en interaction suggère que la réussite de cette pratique dépend des conditions locales, ce qui nécessite des données scientifiques/fondées sur la recherche (Irmak et al., 2019). Grâce à des recherches approfondies menées sur le terrain, Irmak et al. (2019) ont quantifié l'évapotranspiration des cultures (ETc), le microclimat, le rendement, la productivité de l'eau (WP) et d'autres variables pour le maïs irrigué (Zea mays L.) dans le cadre de deux systèmes : le travail du sol en disques (DT) (conventionnel) et sans travail du sol (NT) (conservation) en 2011, 2012 et 2013 sur deux champs de producteurs soigneusement gérés et surveillés, qui sont soumis à ces pratiques de gestion du travail du sol depuis plus de 17 ans. While the research was not designed agroecological services in mind explicitly, it implicitly demonstrated an important conservation practice that can lead to additional water resources conservation that can contribute to the agroecological services for other vegetation services and habitats. Au cours

de trois années, l'ETc du maïs en système DT (2 091 mm) a été supérieure de 92 mm à celle de l'ETc du maïs en système NT (1 999 mm). Une tendance saisonnière et mensuelle a été observée concernant l'écart d'ETc entre les systèmes DT et NT. Au cours des trois campagnes agricoles, le maïs en système NT a consommé moins d'eau avant la floraison (anthèse) et davantage après la floraison que le maïs en système DT. Le rendement du maïs a été plus élevé en système DT qu'en système NT durant les trois années, de 7% (0,8 t/ha), 6% (0,8 t/ha) et 10% (1,2 t/ha) en 2011, 2012 et 2013, respectivement. Bien que ces recherches n'aient pas été explicitement conçues en tenant compte des services agroécologiques, elles ont mis en évidence, de manière implicite, une pratique de conservation importante susceptible de favoriser une meilleure conservation des ressources en eau et de contribuer ainsi aux services agroécologiques liés aux services de végétation et aux habitats. Kukal et Irmak (2021) ont examiné les effets exercés par l'AC sur la capacité de rétention d'eau du sol et les économies d'eau, en constatant que les effets variaient selon les pratiques de gestion et les conditions agroécologiques. Kienzler et al. (2012) ont démontré que l'AC en conditions irriguées en Asie centrale modifiait les modes de consommation de l'eau, tandis que Mohammad et al. (2018) ont constaté une réduction de la consommation d'eau par la culture du riz en semis direct sous AC dans les plaines indo-gangétiques. Cependant, ces études n'ont pas été conçues dans un cadre agroécologique explicite, et les effets interactifs entre des stratégies spécifiques d'irrigation et de drainage (par exemple, irrigation déficitaire, irrigation d'appoint, drainage contrôlé) et des pratiques spécifiques d'AC (par exemple, les espèces de cultures de couverture, la gestion des résidus, l'intensité du travail du sol) restent mal quantifiées selon la diversité des types de sols, des climats et des systèmes de culture. Il est nécessaire de mener des expérimentations ainsi que des travaux de modélisation systématiques sur le terrain pour : (i) la détermination de manière dont les pratiques d'agriculture de conservation (AC) modifient la dynamique eau-sol, nécessitant ainsi des ajustements dans la planification de l'irrigation; (ii) la quantification des gains (ou pertes) de productivité de l'eau résultant de la combinaison de l'AC et de l'irrigation de précision ; et (iii) l'identification des conditions dans lesquelles l'AC peut réduire la demande en eau d'irrigation sans compromettre la stabilité des rendements face à la variabilité climatique.

Priorité 6: Modernisation des infrastructures d'irrigation et de drainage en vue de la multifonctionnalité et de la prestation de services écosystémiques

La plupart des infrastructures d'irrigation et de drainage mondiales ont été conçues en tenir en compte un seul objectif : la fourniture de l'eau aux cultures ou l'évacutaion des eaux excédentaires des parcelles. Le concept d'infrastructure multifonctionnelle — qui consiste à concevoir et à gérer des systèmes d'irrigation et de drainage pour fournir de l'eau à l'agriculture tout en assurant simultanément des services écosystémiques, en soutenant la biodiversité, en régulant les crues et en séquestrant le carbone — est encore un domaine assez récent. La feuille de route de la Vision CIID 2030 (CIID, 2017) a reconnu les principes de gestion intégrée de l'eau, d'innovation et de gouvernance qui s'alignent sur les principes agroécologiques, mais la mise en œuvre concrète de ces principes dans la conception et la gestion des infrastructures reste un défi à relever. La base de données probante devrait établir un lien entre la performance hydraulique et les résultats concernant les plans écologique, social et de la gouvernance. Il est nécessaire de mener des recherches sur: (i) l'élaboration des critères de conception et des indicateurs de performance pour des infrastructures d'irrigation et de drainage multifonctionnelles ; (ii) l'évaluation des coûts et des avantages de la modernisation des infrastructures existantes en vue de fournir des services écosystémiques; et (iii) l'étude des dispositions de gouvernance et de financement requis pour soutenir une modernisation des infrastructures servant à la fois la production agricole et les objectifs agroécologiques.

Raison pour laquelle le Congrès de la CIID doit combler cette lacune

Le 26e Congrès de la CIID des irrigations et du drainage, qui se tiendra à Marseille, offre une plateforme unique et opportune pour combler les lacunes en matière de connaissances entre l'irrigation/drainage et, et ce, pour plusieurs raisons :

- Tout d'abord, la CIID est l'organisation professionnelle de renommée internationale, leader historique dans les domaines de l'irrigation, du drainage et de la gestion des inondations, ayant une adhésion de plus de 90 pays. Sa capacité de mobilisation lui permet de réunir les communautés de l'irrigation et de l'agroécologie comme peu d'autres plateformes peuvent le faire.
- Deuxièmement, le thème du Congrès invite explicitement les chercheurs, les praticiens et les décideurs à explorer la manière dont l'irrigation, le drainage et les solutions d'eau fondées sur la nature — lorsqu'ils sont guidés par des principes agroécologiques — peuvent aider à construire des systèmes durables, des systèmes alimentaires inclusifs et résistants pour nourrir la population mondiale en croissance rapide. Lorsque ces deux disciplines cruciales et interconnectées (irrigation/drainage et agroécologie) sont envisagées conjointement, elles permettent de rechercher des solutions de gestion pratiques visant à minimiser les impacts négatifs du changement climatique sur la productivité agroécologique, afin de soutenir la production alimentaire et de fibres. Cette approche permet déjà de surmonter le fossé disciplinaire, une nécessité plus impérieuse que jamais.
- Troisièmement, la feuille de route de la Vision CIID 2030 reconnaît les principes de gestion intégrée de l'eau, d'innovation, de partage des connaissances, d'équité et de gouvernance qui sont partagés avec les 13 principes de l'agroécologie (CIID, 2017; Wezel et al., 2020). Il s'agit d'un alignement structurel, et pas simplement thématique.
- Quatrièmement, le Congrès se réunit à un moment où le changement climatique redéfinit, de manière difficile, le contexte de l'irrigation et du drainage repositionnés. Le sixième rapport d'évaluation du GIEC (2023) a clairement indiqué que l'adaptation progressive est insuffisante; une transformation profonde des systèmes alimentaires est nécessaire. L'irrigation et le drainage, repositionnés dans un cadre agroécologique, peuvent et doivent faire partie de cette transformation.
- Enfin, le Congrès peut catalyser la démarche de la recherche. Les six priorités de recherche identifiées ci-dessus nécessitent une recherche coordonnée, multidisciplinaire et à plusieurs échelles que le réseau CIID est particulièrement bien positionnée pour mobiliser — reliant les ingénieurs en irrigation, les agronomes, les hydrologues, les écologistes, les spécialistes en sciences sociales et les décideurs politiques de tous les pays et contextes. L'équipe de Question 66 est bien positionnée pour soutenir une telle intégration dans les domaines de l'ingénierie, de l'agronomie, de l'hydrologie, de l'écologie, des sciences sociales et de la politique.

Conclusion

Les liens entre l'agroécologie et l'irrigation et le drainage restent profondément sous-explorés : en avril 2023, seuls 38 articles scientifiques les relient explicitement de manière explicite, et la plupart d'entre eux le faisaient de manière superficielle (Leauthaud et al., 2025) et sans avoir une compréhension complète de leur interconnexion en ce qui concerne la durabilité de la productivité agricole, la sécurité alimentaire ainsi que les services agroécologiques. Cette rareté représente à la fois un écart et une opportunité. La lacune réside dans le fait

que les agriculteurs, les décideurs et les chercheurs ne disposent pas de la base de données nécessaire pour concevoir des systèmes d'irrigation et de drainage contribuant activement aux transitions agroécologiques. L'opportunité offre l'ouverture du domaine à la recherche innovante et d'intégration qui peut redéfinir le rôle joué par la gestion de l'eau dans les systèmes alimentaires durables.

Le changement climatique rend cette réconciliation urgente. L'irrigation et le drainage doivent être évalués le long d'un continuum allant des infrastructures « grises » conventionnelles aux mesures hybrides et fondées sur les écosystèmes; seules ces deux dernières catégories peuvent être qualifiées comme des solutions fondées sur la nature, dès lors que leurs bénéfices écologiques et sociaux sont démontrés. Le concept d'irrigation multiservice (Leauthaud et Leenhardt, 2025) fournit un cadre conceptuel précieux pour ce repositionnement, tandis que les six priorités de recherche que nous proposons dans cet article traduisent ce concept en une démarche pratique fondé sur les défis technologiques, hydrologiques, institutionnels et écologiques auxquels est confrontée au quotidien la communauté mondiale de l'irrigation et du drainage.

Le 26e Congrès de la CIID (Commission internationale de l'irrigation et du drainage) à Marseille est constaté à marquer un tournant décisif dans cette démarche. En réunissant les communautés de l'irrigation et de l'agroécologie, ce congrès peut catalyser les innovations en matière de recherche, de politiques et de pratiques nécessaires pour faire de la gestion de l'eau agricole, de la production agricole et des pratiques de gestion associées une composante transformatrice et intégrante de la transition agroécologique, afin de construire des systèmes alimentaires non seulement productifs et économes en eau, mais aussi écologiquement fondés, socialement équitables et résistants face au climat.

Références

Akakpo, K., S. Bouarfa, M. Benoit, and C. Leauthaud. 2021. Challenging agroecology through the characterization of farming practices' diversity in Mediterranean irrigated areas. European Journal of Agronomy 128: 126284. doi: 10.1016/j.eja.2021.126284.

Alletto, L., Cueff, S., Bréchemier, J., Lachaussée, M., Derrouch, D., Page, A., ... & Bustillo, V. (2022). Physical properties of soils under conservation agriculture: A multi-site experiment on five soil types in south-western France. Geoderma, 428, 116228.

Altieri, M.A. 1992. Agroecological foundations of alternative agriculture in California. Agriculture, Ecosystems & Environment 39(1–2): 23–53. doi: 10.1016/0167-8809(92)90203-N.

Ameur, F., and C. Leauthaud. 2024. Assessing the integration of agroecological principles in smallholder farming systems in North African irrigated plains. Agroecology and Sustainable Food Systems. doi: 10.1080/21683565.2024.2417266.

Basche, A.D., and O.F. Edelson. 2017. Improving water resilience with more perennially based agriculture. Agroecology and Sustainable Food Systems 41(7): 799–824. doi: 10.1080/21683565.2017.1330795.

Çakmakçı, R., S. Çakmakçı, and M.F. Çakmakçı. 2025. Principles of environmentally sustainable agriculture for building resilient and resource-efficient food systems. Turkish Journal of Biology 49(5): 550–584. doi: 10.55730/1300-0152.2764.Christianson, L., A. Brij, A. Carvalho, and J. Helmers. 2017. Reducing nitrogen contamination from agricultural subsurface drainage with denitrification bioreactors and controlled drainage. Biosystems Engineering 153: 1–10.

Das, A., and S. Mishra. 2025. Smart and sustainable water management: policy, technology, and innovation pathways for resource resilience. Green Technology, Resilience and Sustainability 5 (2025). https://doi.org/10.1007/s44173-025-00022-8Devkota, M., K.P. Devkota, M. Karrou, and V. Nangia. 2023. Genotype and agronomic management interaction to enhance wheat yield and water use efficiency in the Mediterranean rainfed environment of Morocco: I. Field data analysis. European Journal of Agronomy 151: 126972. doi: 10.1016/j.eja.2023.126972.

D'Acunha, B., et al. 2026. Drained agricultural peatlands as persistent carbon sources. (PMC12970578) — a review of drained organic soils as carbon sources.

W.M. Denevan. 2003. Cultivated Landscapes of Native Amazonia and the Andes Oxford University Press.

Devkota, K.P., M. Devkota, M. Mabhaudhi, V. Nangia, S. Attaher, R.J. Boroto, J. Timsina, and K.H. Siddique. 2025. A blueprint for building resilience and food security in MENA and SSA drylands: Diversifying agriculture with neglected and underutilized species. Food and Energy Security 14(1): e70046. doi.org/10.1002/fes3.70046.

FAO. 2018. The 10 Elements of Agroecology: Guiding the Transition to Sustainable Food and Agricultural Systems. FAO. Rome, Italy.

FAO. 1996. Food production: the critical role of water. Technical Background Document. FAO. Rome, Italy.

Fischer, K., G. Vico, H. Röcklinsberg, H. Liljenström, and R. Bommarco. 2025. Progress towards sustainable agriculture hampered by siloed scientific discourses. Nature Sustainability 8: 66–74.

Galeana-Pizana, J.M., S. Couturier, D. Figueroa, and A.D. Jimenez. 2021. Is rural food security primarily associated with smallholder agriculture or with commercial agriculture? Agricultural Systems 190: 103091. doi: 10.1016/j.agsy.2021.103091.

Grafton, R.Q., J. Williams, C.J. Perry, F. Müller, C. Ringler, A. Steduto, B. Udall, S.A. Wheeler, Y. Wang, D. Garrick, and S.M. Allen. 2018. The paradox of irrigation efficiency. Science 361(6404): 748–750. doi: 10.1126/science.aat9314.

Gross, B., and R. Jaubert. 2019. Vegetable gardening in Burkina Faso: drip irrigation, agroecological farming and the diversity of smallholders. Water Alternatives 12(1): 46–67.

Guzman, G.I., and A.M. Alonso. 2008. A comparison of energy use in conventional and organic olive oil production in Spain. Agricultural Systems 98(3): 167–176. doi: 10.1016/j.agsy.2008.06.004.

Han, S., F. Tian, Y. Liu, and X. Duan. 2017. Socio-hydrological perspectives of the co-evolution of humans and groundwater in Cangzhou, North China Plain. Hydrology and Earth System Sciences 21: 3619–3633. doi: 10.5194/hess-21-3619-2017.

HLPE. 2019. Agroecological and Other Innovative Approaches for Sustainable Agriculture and Food Systems That Enhance Food Security and Nutrition. HLPE Report #14. Rome: Committee on World Food Security.

ICID. 2017. A Water Secure World Free of Poverty and Hunger: A Roadmap to ICID Vision 2030. New Delhi: ICID.

Irmak, S., S. Irmak and J. Kaur. 2025. Sprayable bio-based polymer conserved soil-water, enhanced soybean growth, moderated soil temperature, increased soil organic matter content and reduced giant foxtail [Setaria faberi hermm.] density and biomass. Applied Engineering in Agriculture. 41(6):695-706. https://doi.org/10.13031/aea.16439.

Irmak, S., J. Aguilar, V. Adamchuk, H. Huang, S. O'shaughnessy, M. Kukal, I. Kisekka, D. Porter, M. Andrade-Rodriguez, A. Yari, C. Madramootoo. 2025. Precision Irrigation Management. The Council for Agricultural Science and Technology (CAST) Paper. pp. 1-21. https://doi.org/10.62300/6b9hf011.

Irmak, S., T.A. Hinn, M.S. Kukal and A.T. Mohammed. 2025. Concurrent response of soybean to fixed (full and limited) and variable rate irrigation management in three soil types: I. Soil water dynamics. Irrigation and Drainage. 74:1853–1873. https://doi.org/10.1002/ird.3124.

Irmak, S., and T.A. Hinn. 2025. Concurrent response of soybean to fixed (full and limited) and variable rate irrigation management in three soil types: II. Growth, yield, evapotranspiration and water productivity. Irrigation and Drainage. 74:1874–1888. https://doi.org/10.1002/ird.3121.

Irmak, S. 2024. Maize response to different subsurface drip irrigation management strategies: Yield, production functions, basal and crop evapotranspiration. Agricultural Water Management 300 (2024) 108927. doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108927.

Irmak, S., S. Irmak and J. Kaur. 2024. Effect of sprayable biobased polymers on soybean growth and yield, weed suppression, soil temperature, soil-water, evapotranspiration and soil quality variables. Journal of Natural Resources and Agricultural Ecosystems. 2(4):227-242. https://doi.org/10.13031/jnrae.16177.

Irmak, S. 2023. Agriculture and agricultural water management: Historical perspectives and integration of research and extension/outreach for large-scale technology adoption in production fields. Journal of ASABE. 66(1):167-192. https://doi.org/10.13031/ja.15272.

Irmak, S., A.T. Mohammed and M. Drudik. 2023. Maize nitrogen (N) uptake, grain N concentration and root-zone residual nitrate N (NO3-N) response under center pivot, subsurface drip and surface (furrow) irrigation. Agricultural Water Management 287(2023)108421. doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108421.

Irmak, S., and A.T. Mohammed. 2023. Maize nitrogen uptake and use efficiency, partial factor productivity of nitrogen, and yield response to different nitrogen and water applications under three irrigation methods. Irrigation and Drainage. 73:64-88. https://doi.org/10.1002/ird.2868.

Irmak, S., A.T. Mohammed and M.S. Kukal. 2022. Maize response to coupled irrigation and nitrogen fertilization under center pivot, subsurface drip and surface or gravity (furrow) irrigation: Growth, development and productivity. Agricultural Water Management. 263(2022):107457. doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107457.

Irmak, S., M.S. Kukal, A.T. Mohammed and K. Djaman. 2019. Disk-till vs. no-till maize evapotranspiration, microclimate, grain yield, production functions and water productivity. Agricultural Water Management. 26(5):177-195. doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.006.

Irmak, S., V. Sharma, A.T. Mohammed and K. Djaman. 2018. Impacts of cover crops on soil physical properties: Field capacity, permanent wilting point, soil-water holding capacity, bulk density, hydraulic conductivity and infiltration. Transactions of the ASABE. 61(4):1307-1321. doi.org/10.13031/trans.12700.

Irmak, S., and K. Djaman. 2016. Effects of planting date and density on plant growth, yield, evapotranspiration, and irrigation- and evapotranspiration-yield production functions of maize (Zea mays L.) under subsurface drip irrigation and rainfed conditions. Transactions of the ASABE. 59(5):1235-1256. doi:10.13031/trans.59.11169.

Irmak, S., J.E. Specht, L. Odhiambo, J.M. Rees and K.G. Cassman 2015. Soybean yield, water productivity, evapotranspiration and soil-water extraction response to subsurface drip irrigation. Transactions of the ASABE. 57(3):729-748. doi:10.13031/trans.57.10085.

Irmak, S. 2015. Inter-annual variation in long-term center pivot-irrigated maize evapotranspiration (ET) and various water productivity response indices: Part I. Grain yield, actual and basal ET, irrigation-yield production functions, ET-yield production functions, and yield response factors. J. Irrigation and Drainage Engineering. 141(5):1-17. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000825.

IPCC. 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva: IPCC. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

Kawasaki, K., Ide, K., Yamamuro, N., Oda, T., Matsumura, A., Noda, K., Hanasaki, N., Hirabayashi, Y. 2024. Considering the irrigation canal network in Japan: an attempt to model inter-basin water conveyance. Japanese Journal of JSCE 80(16): 1-7. doi:10.2208/jscejj.23-16095.

Kienzler, K.M., J.P.A. Lamers, A. McDonald, A. Mirzabaev, N. Ibragimov, O. Egamberdiev, E. Ruzibaev, and A. Akramkhanov. 2012. Conservation agriculture in Central Asia—What do we know and where do we go from here? Field Crops Research 132: 95–105. doi: 10.1016/j.fcr.2011.12.008.

Kröger, R. et al. 2023. A review of ecosystem services from edge-of-field practices in tile-drained agricultural landscapes. Journal of Environmental Management 348: 119220. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119220.

Kukal, M.S., and S. Irmak. 2021. Conservation agriculture effects on soil water holding capacity and water-saving varied with management practices and agroecological conditions: A review. Agriculture 11(9): 1681. doi: 10.3390/agriculture11091681.

Leauthaud, C., F. Ameur, and D. Leenhardt. 2025. Irrigation and agroecology: a scientific mismatch? A literature review. Agroecology and Sustainable Food Systems. 49(9), 1415–144. doi: 10.1080/21683565.2025.2481405.

Leauthaud, C., and D. Leenhardt. 2025. Towards multiservice irrigation for an agroecological future. npj Sustainable Agriculture 3: 55. doi: 10.1038/s44264-025-00094-w.

Leauthaud, C., F. Ameur, A. Richa, J. Ben Yahmed, N. Tadjer, S. Bakouchi, K. Akakpo, M. Djezzar, and H. Amichi. 2022a. Production and use of homemade dry manure-based tea in fertigation systems in North Africa. Renewable Agriculture and Food Systems 37(3): 248–256. doi: 10.1017/S174217052100051X.

Leauthaud, C., J. Ben Yahmed, M. Husseini, F. Rezgui, and F. Ameur. 2022b. Adoption factors and structural characteristics of irrigated olive grove agroforestry systems in Central Tunisia. Agroecology and Sustainable Food Systems 46(7): 1025–1046. doi: 10.1080/21683565.2022.2085230.

Liniger, H., Mekdaschi Studer, R., 2019. Sustainable Rangeland Management in Sub-Saharan Africa: Guidelines to Good Practice (No. 138574), HP and Mekdaschi Studer, R. The World Bank.

Liu, D., F. Tian, M. Lin, and M. Sivapalan. 2015. A conceptual socio-hydrological model of the co-evolution of humans and water: Case study of the Tarim River basin, western China. Hydrology and Earth System Sciences 19: 1035–1054. doi: 10.5194/hess-19-1035-2015.

Liu, Y., F. Tian, H. Hu, and M. Sivapalan. 2014. Socio-hydrologic perspectives of the co-evolution of humans and water in the Tarim River basin, Western China: The Taiji–Tire model. Hydrology and Earth System Sciences 18: 1289–1303. doi: 10.5194/hess-18-1289-2014.

Lu, Y., F. Tian, L. Guo, et al. 2021. Socio-hydrologic modeling of the dynamics of cooperation in the transboundary Lancang–Mekong River. Hydrology and Earth System Sciences 25: 1883–1903. doi: 10.5194/hess-25-1883-2021.

Mdee, A., A. Wostry, A. Coulson, and J. Maro. 2019. A pathway to inclusive sustainable intensification in agriculture? Assessing evidence on the application of agroecology in Tanzania. Agroecology and Sustainable Food Systems 43(2): 201–227. doi: 10.1080/21683565.2018.1485126.

Mekdaschi, R. and Liniger, H.P., 2013. Water harvesting: guidelines to good practice.

Mitchell, M. E., Newcomer-Johnson, T., Christensen, J., Crumpton, W., Dyson, B., Canfield, T. J., ... & Forshay, K. J. (2023). A review of ecosystem services from edge-of-field practices in tile-drained agricultural systems in the United States Corn Belt Region. Journal of environmental management, 348, 119220.

Mohammad, A., S. Sudhishri, T.K. Das, M. Singh, R. Bhattacharyya, A. Dass, M. Khanna, V.K. Sharma, N. Dwivedi, and M. Kumar. 2018. Water balance in direct-seeded rice under conservation agriculture in north-western Indo-Gangetic Plains of India. Irrigation Science 36(6): 381–393. doi: 10.1007/s00271-018-0590-z.

Mohammed, A.T., and S. Irmak. 2022. Maize response to irrigation and nitrogen under center pivot, subsurface drip and furrow irrigation: Water productivity, production functions, basal evapotranspiration and yield response factors. Agricultural Water Management. 271(2022), 107795. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107795.

Moraine, M., J. Grimaldi, C. Murgue, M. Duru, and O. Therond. 2016. Co-design and assessment of cropping systems for developing crop-livestock integration at the territory level. Agricultural Systems 147: 87–97. doi: 10.1016/j.agsy.2016.06.002.

Murgia, I., Beltrami, S., Villani, L., Vaglia, V., Alderotti, F., Angeloni, G., ... & Piemontese, L. (2026). The challenge of science for sustainable agriculture: an Italian early career researchers' perspective. Agroecology and Sustainable Food Systems, 50(7), 1595-1603.

Nangia, V., T. Oweis, F.H. Kemeze, and J. Schnetzer. 2018. Supplemental Irrigation: A Promising Climate-Smart Practice for Dryland Agriculture. Climate-Smart Agriculture Practice Brief. CGIAR CCAFS.

Nhamo, L., et al. 2025. Transforming agricultural water management through the Water–Energy–Food Nexus: Trends, opportunities, barriers and solutions. Irrigation and Drainage 2025; 0:1–1. https://doi.org/10.1002/ird.70032.

Nika, C.E., V. Vasilaki, A. Expósito, and E. Katsou. 2020. Water cycle and circular economy: developing a circularity assessment framework for complex water systems. Water Research 187: 116423. doi: 10.1016/j.watres.2020.116423.

Okiria, E., K. Noda, M.K. Zaki, and T. Okayasu. 2021. A review of payment for ecosystem services (PES) in agricultural water: Are PES from the operation of agricultural water control structures ubiquitous? Sustainability 13(22): 12624. doi: 10.3390/su132212624.

Ostrom, E. 1993. Design principles in long-enduring irrigation institutions. Water Resources Research 29(7): 1907–1912.

Otsuka, K., Nishimura, S., Senge, M., Noda, K. 2025. Urbanization impacts on operational efforts of agricultural water infrastructure. Hydrological Research Letters, 19: 283-288. doi: 10.3178/hrl.25-00030.

Pahl-Wostl, C., E. Mostert, and D. Tàbara. 2008. The growing importance of social learning in water resources management and sustainability science. Ecology and Society 13(1): 1-4. https://www.jstor.org/stable/26267907.

Payero, J.O., D.D. Tarkalson and S. Irmak, D. Davison, and J.L. Petersen. 2008. Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semi-arid climate. Agricultural Water Management. 95:895-908.

Perez Neira, D. 2016. Energy efficiency of cacao agroforestry under traditional and organic management. Agronomy for Sustainable Development 36(49). doi: 10.1007/s13593-016-0386-6.

Piemontese, L., G. Castelli, I. Fetzer, J. Barron, H. Liniger, N. Harari, E. Bresci, and G. Cecchi. 2020. Estimating the global potential of water harvesting from successful case studies. Global Environmental Change 63: 102121. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2020.102121.

Pörtner, H.-O. et al. 2022. Technical summary. In Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009325844.002.

Rasmussen, L.V. et al. 2024. Joint environmental and social benefits from diversified agriculture. Science 384(6691: 87–93. doi: 10.1126/science.adj19

Romero, P., J.M. Navarro, and P.B. Ordaz. 2022. Towards a sustainable viticulture: the combination of deficit irrigation strategies and agroecological practices in Mediterranean vineyards. A review and update. Agricultural Water Management 259: 107216. doi: 10.1016/j.agwat.2021.107216.

Rouge, A., G. Adeux, H. Busset, R. Hugard, J. Martin, A. Matejicek, D. Moreau, J.P. Guillemin, and S. Cordeau. 2022. Weed suppression in cover crop mixtures under contrasted levels of resource availability. European Journal of Agronomy 136: 126499. doi: 10.1016/j.eja.2022.126499.

Science Council of Japan. 2001. Report on the Evaluation of Multifunctional Roles of Agriculture and Forestry Contributed to Global Environment and Human Life (Response to the Ministerial Inquiry). Science Council of Japan, Tokyo, Japan. (in Japanese).

Sharda, V., R. Bajwa, G. Shekhar, and S. Irmak. 2022. Evaluating spatial and temporal variations in sub-field level crop water stress for variable rate irrigation. Frontiers in Agronomy 4: 983244. doi: 10.3389/fagro.2022.983244.

Sharma, V and S. Irmak. 2021a. Comparative analyses of variable and fixed rate irrigation and nitrogen management for maize in different soil types: Part I. Impact on soil-water dynamics and crop evapotranspiration. Agric. Water Manage., 245 (28) (2021), Article 106644, 10.1016/j.agwat.2020.106644

Sharma, V and S. Irmak. 2021b. Comparative analyses of variable and fixed rate irrigation and nitrogen management for maize in different soil types: Part II. Growth, grain yield, evapotranspiration, production functions and water productivity. Agric. Water Manag., 246 (2021), 10.1016/j.agwat.2020.106653

Sharma, V., and S. Irmak. 2020. Economic comparisons of variable rate irrigation and fertigation with fixed (uniform) rate irrigation and fertigation and pre-plant fertilizer management for maize. Agricultural Water Management 240: 106307. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106307.

Sietz, D., Frey, U., Roggero, M., Gong, Y., Magliocca, N., Tan, R., Janssen, P. and Václavík, T., 2019. Archetype analysis in sustainability research. Ecology and Society, 24(3).

Skaggs, R.W., M.A. Youssef, and G.M. Chescheir. 2012. DRAINMOD: Model use, calibration, and validation. Transactions of the ASABE 55(4): 1509–1522. doi: 10.13031/2013.42259.Tardieu, H. 2005. Irrigation and drainage services: some principles and issues towards sustainability. An ICID position paper. Irrigation and Drainage 54: 251–262.

Stroosnijder, L. (2009). Modifying land management in order to improve efficiency of rainwater use in the African highlands. Soil and Tillage Research, 103(2), 247-256. Tarolli, P., Liu, G., Castelli, G., Bresci, E., Bailly, J.S., Rizzo, D., Loc, H.H., Sidle, R.C. and Bogaard, T., 2025. Nature-based solutions for soil and water conservation in an era of climate extremes: Limitations and future scenarios. International Soil and Water Conservation Research.

Tarolli, P., G. Castelli, et al. 2026. Nature-based solutions for soil and water conservation in an era of climate extremes: Limitations and future scenarios. International Soil and Water Conservation Research 14(2): 100604. doi: 10.1016/j.iswcr.2025.12.004.

Tian, F., J. Wei, M. Haeffner, and H. Kreibich, eds. 2026. Coevolution and Prediction of Coupled Human-Water Systems: A Sociohydrologic Synthesis of Change in Hydrology and Society. Elsevier. ISBN 978-0-443-41736-8.

Timpanaro, G. et al. 2026. Regulatory frameworks and policy innovations for agroecology in the Mediterranean basin. Land Use Policy 108001. doi: 10.1016/j.landusepol.2026.108001.Van der Laan, M., Virtanen, S., Matsuno, Y., Castelli, G., Fayrap, A., Cresswell, R., & Hsieh, M. K. (2024). Ecosystem services of irrigated and controlled drainage agricultural systems: A contemporary global perspective. Irrigation and Drainage, 73(5), 1823-1837.

Villani, L., and G. Castelli. 2025. Large dams and small reservoirs: co-modeling water storage strategies in a Mediterranean catchment under a changing climate. Frontiers in Water 7: 1673203. doi: 10.3389/frwa.2025.1673203.

Villani, L., Castelli, G., Forzini, E., Piemontese, L., Lucca, E., Bouizrou, I., ... & Bresci, E. (2025). Large dams and small reservoirs: co-modeling water storage strategies in a Mediterranean catchment under a changing climate. Frontiers in Water, 7, 1673203.

Wei, J., Y. Wei, F. Tian, Y. Xiong, and H. Hu. 2023. Transition in the societal value and governance of water resources in Australia and China. Humanities and Social Sciences Communications 10: 359. doi: 10.1057/s41599-023-01857-x.

Wezel, A., M. Casagrande, F. Celette, J.-F. Vian, A. Ferrer, and J. Peigne. 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture: A review. Agronomy for Sustainable Development 34(1): 1–20. doi: 10.1007/s13593-013-0180-7.

Wezel, A., B.G. Herren, R.B. Kerr, E. Barrios, A.L.R. Gonçalves, and F. Sinclair. 2020. Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems: A review. Agronomy for Sustainable Development 40(6): 40. doi: 10.1007/s13593-020-00646-z.

World Bank. 2025. Repurposing Agricultural Support: 2025 Policy Compendium. Washington, DC: World Bank.

Xue, R., Y. Jiang, H. Li, and B. Shi. 2025. Review of advancements and challenges in delayed irrigation: Enhancing crop water productivity and sustainable crop production. Agricultural Water Management 318: 109739. doi: 10.1016/j.agwat.2025.109739.

Yonts, C.D., A. Haghverdi, D.L. Reichert and S. Irmak. 2018. Deficit irrigation and surface residue cover effects on dry bean yield, in-season soil water content and irrigation water use efficiency in western Nebraska High Plains. Agricultural Water Management. 199:138-147. doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.024.

Zhang, Z., H. Hu, F. Tian, X. Yao, and M. Sivapalan. 2014. Groundwater dynamics under water-saving irrigation and implications for sustainable water management in an oasis: Tarim River basin of western China. Hydrology and Earth System Sciences 18: 3951–3967. doi: 10.5194/hess-18-3951-2014.

Zhao, H., F. Tian, et al. 2026. Climate change and irrigation expansion reshape the water pressure and upstream–downstream interactions in the Lancang–Mekong River Basin. Hydrology and Earth System Sciences 30: 2433–2453. doi: 10.5194/hess-30-2433-2026.Zwarteveen, M. et al. 2021. Transformations to groundwater sustainability: from individuals and pumps to communities and aquifers. Current Opinion in Environmental Sustainability 49: 88–97.

Q.66.1: At the plot, landscape, and watershed scales, what processes are involved in the interaction between irrigation/drainage and agroecology, and how might we model them?

À l'échelle de la parcelle, du paysage et du bassin versant, quels sont les processus impliqués dans l'interaction entre l'irrigation/le drainage et l'agroécologie, et comment pouvons-nous les modéliser?

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS — **Page No.**

R.66.1.01 **RETHINKING AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT THROUGH AN INCLUSIVE AND HOLISTIC WATER–ENERGY–FOOD NEXUS** — 65
REPENSER LA GESTION DE L'EAU AGRICOLE A TRAVERS UNE APPROCHE INCLUSIVE ET HOLISTIQUE DU LIEN ENTRE EAU-ENERGIE-ALIMENTATION
Luxon Nhamo, Cuthbert Taguta, Sylvester Mpandeli, Tinashe Dirwai, Stanley Liphadzi, and Tafadzwanashe Mabhaudhi (South Africa)

R.66.1.02 **CLIMATE CHANGE, ECOSYSTEM CHALLENGES, AND ARSENIC CONTAMINATION IN THE KOK RIVER BASIN: CHALLENGES, NATURE-BASED SOLUTIONS, AND ADAPTATION STRATEGIES FOR TRANSBOUNDARY IRRIGATION MANAGEMENT** — 67
CHANGEMENT CLIMATIQUE, DEFIS LIES AUX ECOSYSTEMES ET CONTAMINATION PAR L'ARSENIC DANS LE BASSIN VERSANT DE KOK: DEFIS, SOLUTIONS FONDEES SUR LA NATURE ET STRATEGIES D'ADAPTATION A LA GESTION TRANSFRONTALIERE DE L'IRRIGATION
Dr. Pronmongkol Chidchob, Dr. Noppadon Kowsuvon, and Mr. Satit Maneepai (Thailand)

R.66.1.03 **ASSESSING LONG-TERM CLIMATE VARIABILITY IMPACTS ON STREAMFLOW AND DROUGHT TO PROMOTE SUSTAINABLE WATER RESOURCES AND AGRICULTURAL MANAGEMENT IN BORKENA WATERSHED, AWASH BASIN, ETHIOPIA** — 70
ÉVALUATION DES IMPACTS DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE À LONG TERME SUR LE DÉBIT DES COURS D'EAU ET LA SÉCHERESSE AFIN D'ENCOURAGER UNE GESTION DURABLE DES RESSOURCES EN EAU ET DE L'AGRICULTURE DANS LE BASSIN VERSANT DE BORKENA, DANS LE BASSIN DE L'AWASH, EN ÉTHIOPIE
Asnake Enawgaw Amognehegn, and Asmare Belay Nigussie (Ethiopia)

R.66.1.04 **AGROECOLOGICAL SOIL MANAGEMENT IN VEGETABLE PRODUCTION, IMPACT ON SOIL HEALTH AND IRRIGATION SCHEDULING** — 72
GESTION AGROÉCOLOGIQUE DES SOLS DANS LA PRODUCTION MARAICHERE, IMPACT SUR LA SANTÉ DES SOLS ET LA PROGRAMMATION DE L'IRRIGATION
E. Guillot, L. Pares, C. Leroy, H. Raynal, F. Chinarro, D. Calmant (France)

R.66.1.05 **INFLUENCE OF DIFFERENT IRRIGATION REGIMES ON COVER CROPS BIOMASS PRODUCTION AND WATER PRODUCTIVITY** — 74
INFLUENCE DE DIFFÉRENTS RÉGIMES D'IRRIGATION SUR LA PRODUCTION DE BIOMASSE DES CULTURES DE COUVERTURE ET LA PRODUCTIVITÉ DE L'EAU
Hector Mussillon, Lionel Alletto, Gaël Hermet, Cyril Dejean, Jean-Marie Lopez, David Tang, and Claire Wittling (France)

R.66.1.06 **BEYOND IRRIGATION: THE ROLE OF DRAINAGE IN BUILDING CLIMATE RESILIENT PADDY SYSTEMS** — 76
AU-DELA DE L'IRRIGA'TION: LE ROLE JOUE PAR LE DRAINAGE DANS LA MISE EN PLACE DES SYSTEMES RIZICOLES RESISTANTS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE
S.H.A. Mohd Yusof (Malaysia)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS

Page No.

R.66.1.07 **SMALL WATER STORAGE SYSTEMS FOR CLIMATE-RESILIENT AGRICULTURE: DANG VALLEY IRRIGATION PROJECT** 77
PETITS SYSTÈMES DE STOCKAGE D'EAU POUR UNE AGRICULTURE RÉSISTANTE AU CLIMAT: PROJET D'IRRIGATION DE LA VALLÉE DE DANG
Susheel C Acharya (Nepal)

R.66.1.08 **RESILIENT IRRIGATION INFRASTRUCTURE AND COMMUNITY-CENTERED CANAL REHABILITATION: INTEGRATED EVIDENCE FROM THE BABAO SECOND MAIN CANAL, TAIWAN** 79
INFRASTRUCTURES D'IRRIGATION RÉSISTANTES ET RÉHABILI-TATION DES CANAUX AXÉE SUR LES COMMUNAUTÉS: ANALYSE INTÉGRÉE TIRÉE DU DEUXIÈME CANAL PRINCIPAL DE BABAO, TAÏWAN
Paul Abudulai Yelinje, Jui-Min Hsu, Juabih Wang, Shih-Hao Wang, and Su-Chin Chen (Taiwan)

R.66.1.09 **INNOVATING AGROECOLOGY-BASED INDIGENOUS TECHNOLOGIES FOR CLIMATE-RESILIENT WATER MANAGEMENT** 81
INNOVATION DES TECHNOLOGIES AUTOCHTONES FONDÉES SUR L'AGROÉCOLOGIE POUR UNE GESTION DE L'EAU RÉSISTANTE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE
U.N. Parajuli, B.R. Thapa, and S.C. Acharya (Nepal)

R.66.1.10 **CLIMATE CHANGE AND ADAPTIVE WATER MANAGEMENT IN LOWER CHAO PHRAYA AND THA CHIN BASINS, THAILAND** 83
CHANGEMENT CLIMATIQUE ET GESTION ADAPTATIVE DE L'EAU DANS LES BASSINS INFÉRIEURS DE LA CHAO PHRAYA ET DE LA THA CHIN, THAÏLANDE
Wongsa Sanit, Suttigran Arthon & Sakdeethanaporn Aekkasit (Thailand)

R.66.1.11 **CAPACITY OF SOIL ANALOGUE FACING CLIMATE CHANGE: A TRUMP OR A JUMBLE?** 86
CAPACITÉ DES SOLS CONSTRUITS FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE: ATOUT OU PROBLÈME?
Behzad Nasri, Latifah Omar, Marie-José Makhoul, and Olivier Fouché-Grobla (France)

R.66.1.12 **STATUS OF AGROECOLOGY IN SOUTH AFRICA: A DIAGNOSTIC ASSESSMENT OF TRANSITION PATHWAYS IN SMALL-SCALE AND COMMERCIAL FARMING SYSTEMS** 88
ÉTAT DE L'AGROÉCOLOGIE EN AFRIQUE DU SUD: ÉVALUATION DIAGNOSTIQUE DES TRAJECTOIRES DE TRANSITION DANS LES SYSTÈMES AGRICOLES À PETITE ÉCHELLE ET COMMERCIAUX
S. Walker, J.J. Anderson, J.S Kau, T.A.B. Koatla, G.L. Maboa, C. Mapumulo, A. Mashakeni, P.C. Tharaga, and C.N. Qwabe (South Africa)

R.66.1.13 **DRY-STONE TERRACES FOR AGROHYDROLOGICAL RESILIENCE** 90
TERRASSES EN PIERRE SÈCHE POUR UNE RÉSISTANCE AGROHYDROLOGIQUE
C. Colliot A. Ract-Madoux (France)

R.66.1.14 **MANAGEMENT OF AGRICULTURAL SUBSURFACE DRAINED FLOW BY ARTIFICIAL WETLAND: WATER QUALITY AND BIODIVERSITY SUPPORT** 92
GESTION DE L'ECOULEMENT DES EAUX DRAINÉES AGRICOLES SOUTERRAINES PAR DES ZONES HUMIDES ARTIFICIELLES: QUALITE DE L'EAU ET CONSERVATION DE LA BIODIVERSITE
Tournebize Julien, and Chaumont Cédric (France)

R.66.1.15 **IS IRRIGATION A BARRIER OR A LEVER FOR AGROECOLOGICAL TRANSITION? INSIGHTS FROM SOUTHWESTERN FRANCE** 93
EST-CE QUE L'IRRIGATION EST UN OBSTABLE OU UN LEVIER DE LA TRANSION AGROECOLOGIQUE? PERSPECTIVES TIREES DU SUD-OUEST DE LA FRANCE
Ariane Degroote, Adeline Bouvard, and Hichem Amichi (France)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.66.1.16 **FOURTY YEARS OF CONTINUOUS MONITORING OF AGRICULTURAL DRAINAGE IN WESTERN FRANCE** 95
QUARANTE ANS DE SUIVI CONTINU DU DRAINAGE AGRICOLE A L'OUEST DE LA FRANCE
Dutertre A., Brunet-Lefevre D. Mesmin X., and Piquemal B. (France)

R.66.1.17 **HOW IRRIGATION CAN FACILITATE CONSERVATION AGRICULTURE PRACTICES AND RESULTS: PRACTICAL CASE IN SOUTH-EAST OF FRANCE** 97
COMMENT L'IRRIGATION PEUT FAVORISER LES PRATIQUES ET LES RÉSULTATS DE L'AGRICULTURE DE CONSERVATION: CAS PRATIQUE AU SUD-EST DE LA FRANCE
Marguerie Mathieu (France)

R.66.1.18 **ADAPTING REDUCED T`ILLAGE WITHIN MEDITERRANEAN IRRIGATED CONSERVATION AGRICULTURE ENHANCES SOIL HEALTH AND WATER PRODUCTIVITY** 99
L'ADAPTATION DU TRAVAIL DU SOL REDUIT DANS LE CADRE DE L'AGRICULTURE DE CONSERVATION IRRIGUÉE EN MILIEU MÉDITERRANÉEN AMÉLIORE LA SANTÉ DES SOLS ET LA PRODUCTIVITÉ HYDRIQUE
Juan David Dominguez Bohorquez, Claire Wittling, and Nicolas Urruty (France)

R.66.1.19 **RAPID-ONSET DROUGHTS AND IRRIGATION BUFFERING: ASSESSING WATER STRESS AND RICE YIELDS RESPONSES IN SOUTH KOREA** 101
SÉCHERESSES À APPARITION RAPIDE ET EFFET TAMPON DE L'IRRIGATION: ÉVALUATION DU STRESS HYDRIQUE ET DES RÉPONSES DES RENDEMENTS RIZICOLES EN CORÉE DU SUD
Hee-Jin Lee, Won-Ho Nam, and Eunmi Hong (South Korea)

R.66.1.20 **NATURE-BASED SOLUTIONS IN AGRICULTURE: INSIGHTS FROM THE COMMON TRAITS OF CHINESE WHIS TERRACE SYSTEMS** 103
LES SOLUTIONS FONDEES SUR LA NATURE EN AGRICULTURE: PERSPECTIVES TIREES DES CARACTERISTIQUES COMMUNES DES SYSTEMES DE TERRASSES CHINOIS RECONNUS COMME OUVRAGES D'IRRIGATION DU PATRIMOINE MONDIAL (WHIS)
Ruoxi Li, Lihui Gao and Jing Liu (china)

R.66.1.21 **THE ROLE OF IRRIGATION AND DRAINAGE IN MALAYSIA'S AGRO-ECOLOGICAL TRANSITION UNDER CLIMATE CHANGE: A COMPREHENSIVE ANALYSIS OF ADAPTIVE MANAGEMENT AND TECHNOLOGICAL INTEGRATION** 105
RÔLE JOUE PAR L'IRRIGATION ET LE DRAINAGE DANS LA TRANSITION AGRO-ÉCOLOGIQUE DE LA MALAISIE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE: ANALYSE COMPLÈTE DE LA GESTION ADAPTATIVE ET DE L'INTÉGRATION TECHNOLOGIQUE
Nor Hafizah Mohd Suhadis, Yuslina Hj Mohd Sani, and Muhamad Aliif Aimran Jamaari (Malaysia)

R.66.1.22 **ADAPTIVE STRATEGIES FOR WATER SCARCITY MANAGEMENT IN GOLESTAN PROVINCE: PATHWAYS TOWARD SUSTAINABLE AGRICULTURAL RESILIENCE UNDER CLIMATE CHANGE** 107
STRATEGIES D'ADAPTATION POUR LA GESTION DE LA PENURIE D'EAU DANS LA PROVINCE DU GOLESTAN: VOIES VERS UNE RESIS-TANCE AGRICOLE DURABLE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE
Mohammad Nouri, and Iraj Heydarian (Iran)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS

Page No.

R.66.1.23 **REINFORCEMENT LEARNING-BASED RESERVOIR OPERATIONAL MODEL DUE TO CLIMATE CHANGE AND LAND USE: CASE STUDY IN HERITAGE SOLO VALLEY DEVELOPMENT, INDONESIA** 110
MODELE D'EXPLOITATION DE RESERVOIR BASE SUR L'APPRENTISSAGE PAR RENFORCEMENT FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET A L'USAGE DES SOLS: ETUDE DE CAS DU PROJET DE DÉVELOPPEMENT DE LA VALLEE DE HERITAGE SOLO (INDONESIE)
Y. Indriani, S.I. Wahyudi, T. Andersen, and S. Soedarsono (Indonesia)

R.66.1.24 **CLIMATE-RESILIENT WATER INFRASTRUCTURES FOR SUSTAINA-BLE FOOD, LAND, AND WATER SYSTEMS IN INDIA** 112
INFRASTRUCTURES HYDRAULIQUES RÉSISTANTES AU CLIMAT POUR DES SYSTÈMES ALIMENTAIRES, FONCIERS ET HYDRAULIQUES DURABLES EN INDE
Sharad Jain, Alok Sikka, Mohammad Faiz Alam, and Giriraj Amarnath (India)

R.66.1.25 **SUBIRRIGATION AS CLIMATE-ADAPTATION TOOL: PROCESS-BASED ASSESSMENT USING FLUSH MODEL IN NORDIC CONDITIONS** 114
L'IRRIGATION SOUTERRAINE COMME OUTIL D'ADAPTATION AU CLIMAT: ÉVALUATION BASÉE SUR LES PROCESSUS À L'AIDE DU MODÈLE FLUSH DANS LES CONDITIONS NORDIQUES
Joy Bhattacharjee, Ali Raza, Heidi Salo, Minna Mäkelä, and Harri Koivusalo (Finland)

R.66.1.26 **HYDROLOGICAL EFFECTS OF FARMLAND DRAINAGE IN THE HUAIBEI PLAIN: AN EXPERIMENTAL STUDY** 116
EFFETS HYDROLOGIQUES DU DRAINAGE AGRICOLE SUR LA PLAINE DE HUAIBEI: UNE ÉTUDE EXPÉRIMENTALE
Gu Nan, Wang Guoqing, Liu Cuishan, He Yupu, & Zhang Wei, Qi Wei (China)

R.66.1.27 **DYNAMIC CONTROL OF SUBSURFACE DRAINAGE DURING WHEAT-GROWING PERIOD UNDER ROTATED RICE-WHEAT FIELD** 118
CONTRÔLE DYNAMIQUE DU DRAINAGE SOUTERRAIN PENDANT LA PÉRIODE DE CROISSANCE DU BLÉ DANS UN CHAMP DE RIZ-BLÉ EN ROTATION
Yuan Tao, Haorui Chen, Boyu Mi and Xiaoyan Guan (China)

R.66.1.28 **USING THE RECLAMATION REGIME EQUATION TO SAVE IRRIGATION WATER** 120
UTILISATION DE L'ÉQUATION DU RÉGIME DE MISE EN VALEUR POUR ÉCONOMISER L'EAU D'IRRIGATION
V. Shabanov, I. Bondarik (Russia)

RETHINKING AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT THROUGH AN INCLUSIVE AND HOLISTIC WATER–ENERGY–FOOD NEXUS

REPENSER LA GESTION DE L'EAU AGRICOLE À TRAVERS UNE APPROCHE INCLUSIVE ET HOLISTIQUE DU LIEN ENTRE EAU-ÉNERGIE-ALIMENTATION

Luxon Nhamo[1], Cuthbert Taguta[2],Sylvester Mpandeli[3], Tinashe Dirwai[4], Stanley Liphadzi[5], and Tafadzwanashe Mabhaudhi[6]

ABSTRACT

Agricultural water management (AWM) practices are increasingly shifting toward a transformative process that connects the interlinked sectors of water, energy, and food. This shift is prompted by traditional and legacy AWM practices that fail to address current interconnected water insecurities. This mixed-methods study explores both theoretical and practical narratives, aiming to identify pathways to reduce unproductive water losses, optimise crop water productivity, and enhance AWM and agronomic practices by examining the fundamental relationships between water, energy, and food resources. It also considers the opportunities and pathways to transition from traditional agricultural practices to integrated AWM. The research offers a comprehensive overview of an integrated AWM system that improves water-use efficiency through the WEF nexus. It emphasises reducing water consumption, boosting environmental flows, minimising waste, and reusing resources in agriculture. Pathways for transitioning traditional AWM practices toward a water–energy–food (WEF) nexus-informed system are identified to foster an equitable, inclusive, integrated, resilient, and balanced socio-ecological system. This is achieved by viewing the WEF sectors as a unified system that supports sustainable crop production, highlighting trends, opportunities, barriers, and solutions for a smarter AWM system. The recommendations advocate shifting from the current production-focused AWM to a transformative, equitable, sustainable, and resilient process that benefits both people and the planet.

Keywords: Water productivity; climate change adaptation; sustainable food systems; agriculture transformation; water-use efficiency.

RESUME

Les pratiques de la gestion de l'eau agricole (AWM) s'orientent de plus en plus vers un processus de transformation qui relie les secteurs interdépendants de l'eau, de l'énergie et de l'alimentation. Cette évolution résulte de l'incapacité des pratiques traditionnelles et héritées du passé à répondre aux insécurités hydriques actuelles étroitement liés. Cette étude

1 Water Research Commission (WRC), Lynnwood Manor, Pretoria, South Africa; E-mail: luxonn@wrc.org.za

2 Post-doctoral fellow. Centre for Transformative Agricultural and Food Systems, School of Agricultural, Earth and Environmental Sciences, University of KwaZulu-Natal, Pietermaritzburg, South Africa; E-mail 'tagutac@ukzn.ac.za

3 Senior Research Manager. Water Research Commission (WRC), Lynnwood Manor, Pretoria, South Africa; E-mail: sylvesterm@wrc.org.z

4 Researcher. International Water Management Institute (IWMI), Harare, Zimbabwe; E-Mail t.dirwai@cgiar.org

5 Group Executive. Water Research Commission (WRC), Lynnwood Manor, Pretoria, South Africa; E-mail: stanleyl@wrc.org.za

6 Prof of Climate Change and Food Systems, Centre on Climate Change and Planetary Health, London School of Hygiene and Tropical Medicine (LSHTM), London, UK, E-mail: tafadzwanashe.mabhaudhi@lshtm.ac.uk

basée sur des méthodes mixtes, explore à la fois les perspectives théoriques et pratiques, afin d'identifier des voies permettant de réduire les pertes d'eau improductives, d'optimiser la productivité hydrique des cultures et d'améliorer les pratiques de gestion de l'eau agricole et les pratiques agronomiques, en examinant les relations fondamentales entre les ressources en eau, en énergie et alimentaires. Elle examine également les possibilités et les perspectives de transition des pratiques agricoles traditionnelles vers une gestion intégrée de l'eau agricole. Cette recherche offre une vue d'ensemble complète d'un système intégré de la gestion de l'eau agricole qui améliore l'efficacité de l'utilisation de l'eau grâce au lien entre eau-énergie-alimentation (WEF). Elle met l'accent sur la réduction de la consommation d'eau, l'augmentation des débits environnementaux, la minimisation du gaspillage et la réutilisation des ressources dans l'agriculture. Des voies de transition des pratiques traditionnelles de la gestion de l'eau agricole vers un système fondé sur le lien entre eau-énergie-alimentation (WEF) sont identifiées afin de favoriser un système socio-écologique équitable, inclusif, intégré, résistant et équilibré. Pour réaliser cet objectif, il faut tenir les secteurs de l'eau, de l'énergie et de l'alimentation comme un système unifié qui soutient une production agricole durable, mettant en lumière les tendances, les possibilités, les obstacles et les solutions pour avoir un système de gestion de l'eau agricole plus intelligent. Les recommandations préconisent de passer de la gestion de l'eau agricole actuelle, axée sur la production, à un processus transformateur, équitable, durable et résistante bénéfique à la fois aux populations et à la planète.

Mots-clés : Productivité de l'eau; Adaptation au changement climatique; Systèmes alimentaires durables; Transformation de l'agriculture; Efficacité de l'utilisation de l'eau.

CLIMATE CHANGE, ECOSYSTEM CHALLENGES, AND ARSENIC CONTAMINATION IN THE KOK RIVER BASIN: CHALLENGES, NATURE-BASED SOLUTIONS, AND ADAPTATION STRATEGIES FOR TRANSBOUNDARY IRRIGATION MANAGEMENT

CHANGEMENT CLIMATIQUE, DEFIS LIES AUX ECOSYSTEMES ET CONTAMINATION PAR L'ARSENIC DANS LE BASSIN VERSANT DE KOK : DEFIS, SOLUTIONS FONDEES SUR LA NATURE ET STRATEGIES D'ADAPTATION A LA GESTION TRANSFRONTALIERE DE L'IRRIGATION

Dr. Pronmongkol Chidchob[1], Dr. Noppadon Kowsuvon*, and Satit Maneepai[2]

ABSTRACT

The Kok River Basin, a vital transboundary watershed shared between Thailand and Myanmar, is increasingly threatened by the compounded impacts of climate change, hydrological extremes, and arsenic contamination. Rising global temperatures and shifting precipitation patterns have intensified the frequency and severity of floods and droughts, undermining the reliability of irrigation systems and destabilizing agricultural productivity. These hydrological extremes not only disrupt water availability but also exacerbate the mobilization of naturally occurring arsenic in sediments and groundwater, posing significant risks to human health, food security, and ecosystem integrity. The convergence of these challenges highlights the urgent need for integrated, adaptive, and cooperative management strategies that transcend political boundaries and prioritize both ecological resilience and community well-being. Climate change has altered the hydrological regime of the Kok River Basin, with erratic rainfall and prolonged dry spells straining irrigation infrastructure and increasing competition among water users. Flood events accelerate erosion, sedimentation, and pollutant transport, while droughts reduce aquifer recharge and concentrate contaminants in water supplies. Arsenic contamination, already a pressing issue in many parts of Southeast Asia, is magnified under these conditions, as fluctuating water tables and sediment dynamics enhance arsenic release into irrigation channels and drinking water sources. The health implications are profound, with chronic exposure linked to cancers, cardiovascular diseases, and developmental disorders, while agricultural impacts include reduced crop yields and compromised soil fertility. These interconnected risks demand a holistic approach that integrates hydrological science, environmental health, and socio-economic considerations.

Nature-based solutions (NbS) offer promising pathways to mitigate these challenges by harnessing ecological processes to restore balance in the basin. Wetland restoration, riparian buffer zones, and reforestation can stabilize riverbanks, filter contaminants, and regulate water flows, reducing both flood risks and arsenic mobility. Agroecological practices, such as crop diversification, organic soil amendments, and water-efficient irrigation techniques, enhance resilience to climate variability while minimizing chemical inputs that exacerbate contamination. Constructed wetlands and phytoremediation systems can serve as low-cost, community-driven interventions to remove arsenic from irrigation water, simultaneously providing biodiversity benefits. Importantly, NbS are adaptive, scalable, and culturally compatible, making them suitable for transboundary contexts where resource disparities and governance complexities often hinder conventional engineering solutions. Adaptation strategies for transboundary irrigation management must emphasize cooperation, knowledge-

1 Senior Expert on Irrigation Engineering, Royal Irrigation Department, Thailand
2 Senior Expert Advisor In Irrigation Engineering, Irrigation Development Institute , Royal Irrigation Department, Thailand

sharing, and participatory governance. Joint monitoring of hydrological and contamination trends, supported by accessible data platforms, can foster transparency and trust among stakeholders. Regional agreements that prioritize equitable water allocation, pollution control, and investment in resilient infrastructure are essential to prevent conflict and ensure sustainable livelihoods. Capacity-building initiatives, particularly for local farmers and water managers, can empower communities to adopt NbS and adaptive practices tailored to their socio-economic realities. Furthermore, integrating traditional ecological knowledge with modern scientific insights enriches the adaptive toolkit, ensuring solutions are context-specific and socially acceptable. Financial mechanisms, such as climate adaptation funds and cross-border development programs, can provide the necessary resources to implement these strategies at scale.

The Kok River Basin exemplifies the complex interplay between climate change, hydrological extremes, and environmental contamination in transboundary river systems. Addressing these challenges requires moving beyond fragmented, short-term interventions toward integrated, cooperative frameworks that recognize the basin as a shared ecological and socio-economic entity. By leveraging nature-based solutions and fostering adaptive governance, stakeholders can transform vulnerabilities into opportunities for resilience, sustainability, and peacebuilding. Ultimately, the success of transboundary irrigation management in the Kok River Basin will depend on the collective commitment to harmonize ecological integrity with human development, ensuring that water resources remain a foundation for health, prosperity, and regional stability in the face of accelerating climate pressures.

Keywords: Climate change, Kok River, arsenic contamination, irrigation, transboundary water, Nature-based Solutions (NbS).

RESUME

Le bassin versant de Kok, un bassin versant transfrontalier vital partagé entre les pays tels que la Thaïlande et le Myanmar, est de plus en plus menacé par les effets cumulés du changement climatique, des phénomènes hydrologiques extrêmes et de la contamination par l'arsenic. L'accroissement des températures à l'échelle mondiale et l'évolution des régimes de précipitations ont intensifié la fréquence et la gravité des inondations et des sécheresses, compromettant ainsi la fiabilité des systèmes d'irrigation et déstabilisant la productivité agricole. Ces phénomènes hydrologiques extrêmes perturbent non seulement la disponibilité en eau, mais aggravent aussi la mobilisation de l'arsenic présent naturellement dans les sédiments et les eaux souterraines, constituant un danger important pour la santé humaine, la sécurité alimentaire et l'intégrité des écosystèmes. La convergence de ces défis met l'accent sur la nécessité d'avoir les stratégies de gestion intégrées, adaptatives et coopératives qui transcendent les frontières politiques et accordent la priorité à la fois à la résistance écologique et au bien-être des communautés. Le changement climatique a apporté une modification au régime hydrologique du bassin fluvial de Kok : des précipitations irrégulières et des périodes de sécheresse prolongées exercent des pressions sur les infrastructures d'irrigation et accentuent la concurrence entre les différents usagers de l'eau. Les crues accélèrent l'érosion, la sédimentation et le transport des polluants, tandis que les sécheresses réduisent la recharge des aquifères et concentrent les contaminants dans les réserves d'eau. La contamination par l'arsenic, qui constitue déjà un problème urgent dans de nombreuses régions de l'Asie du Sud-Est, est amplifiée dans ces conditions, car les variations du niveau des nappes phréatiques et la dynamique sédimentaire augmentent le déversement d'arsenic dans les canaux d'irrigation et les sources d'eau potable. Les répercussions sur la santé sont énormes : une exposition chronique est associée à des cancers, des maladies cardiovasculaires et des troubles du développement, tandis que les répercussions concernant l'agriculture incluent une baisse des rendements agricoles et une diminution de la fertilité des sols. Ces risques interdépendants exigent une approche holistique intégrant la science

hydrologique, la santé environnementale et les considérations socio-économiques.

Les solutions fondées sur la nature (NbS) offrent des voies prometteuses pour atténuer ces défis en tirant parti des processus écologiques afin de rétablir l'équilibre du bassin. La restauration des zones humides, la mise en place des zones tampons riveraines et le reboisement peuvent stabiliser les berges, filtrer les contaminants et régler les débits d'eau, réduisant ainsi à la fois les risques d'inondation et la mobilité de l'arsenic. Les pratiques agroécologiques, telles que la diversification des cultures, l'enrichissement organique des sols et les techniques d'irrigation économes en eau, renforcent la résistance face à la variabilité climatique tout en minimisant l'utilisation de produits chimiques qui aggravent la contamination. Les zones humides artificielles et les systèmes de phytoremédiation peuvent constituer des interventions communautaires à faible coût pour éliminer l'arsenic des eaux d'irrigation, favorisant à la fois des avantages en matière de biodiversité. Il est important de noter que les solutions fondées sur la nature (NbS) possèdent des capacités d'adaptation, sont évolutives et compatibles avec les cultures locales, ce qui les rend adaptées aux contextes transfrontaliers où les disparités en matière de ressources et les complexités de gouvernance entravent souvent la mise en œuvre des solutions d'ingénierie conventionnelles. Les stratégies d'adaptation à la gestion transfrontalière de l'irrigation doivent mettre l'accent sur la coopération, le partage des connaissances et la gouvernance participative. Un suivi conjoint des tendances hydrologiques et de la contamination, soutenu par des plateformes de données accessibles, peut renforcer la transparence et la confiance en parties prenantes. Des accords régionaux donnant la priorité à une répartition équitable de l'eau, à la lutte contre la pollution et à l'investissement dans des infrastructures résistantes sont essentiels pour prévenir les conflits et garantir des moyens de subsistance durables. Les initiatives de renforcement des capacités, en particulier destinées aux agriculteurs locaux et aux gestionnaires de l'eau, peuvent donner aux communautés les moyens d'adopter des solutions fondées sur la nature (NbS) et des pratiques d'adaptation conçues en fonction de leurs réalités socio-économiques. De plus, l'intégration des savoirs écologiques traditionnels aux connaissances scientifiques modernes enrichit la trousse à outils d'adaptation, garantissant ainsi des solutions spécifiques au contexte et acceptables d'un point de vue social. Des mécanismes financiers, tels que les fonds d'adaptation au changement climatique et les programmes de développement transfrontaliers, peuvent fournir les ressources nécessaires pour mettre en œuvre ces stratégies à grande échelle.

Le bassin versant de Kok donne des exemples de l'interaction complexe qui s'établit entre le changement climatique, les phénomènes hydrologiques extrêmes et la contamination environnementale des systèmes fluviaux transfrontaliers. Pour relever ces défis, il faut aller au-delà des interventions fragmentées et à court terme pour s'orienter vers des cadres intégrés et coopératifs qui reconnaissent le bassin comme une entité écologique et socio-économique partagée. En tirant parti des solutions fondées sur la nature et en favorisant une gouvernance adaptative, les parties prenantes peuvent transformer les vulnérabilités en possibilités de résistance, de durabilité et de consolidation de la paix. En fin de compte, le succès de la gestion transfrontalière de l'irrigation dans le bassin versant de Kok dépendra de l'engagement collectif à harmoniser l'intégrité écologique et le développement humain, en veillant à ce que les ressources en eau restent un pilier de la santé, de la prospérité et de la stabilité régionale face à l'accélération des pressions climatiques.

Mots-clés : Changement climatique; Rivière Kok; Contamination à l'arsenic; Irrigation; Eaux transfrontalières; Solutions fondées sur la nature (SFN).

ASSESSING LONG-TERM CLIMATE VARIABILITY IMPACTS ON STREAMFLOW AND DROUGHT TO PROMOTE SUSTAINABLE WATER RESOURCES AND AGRICULTURAL MANAGEMENT IN BORKENA WATERSHED, AWASH BASIN, ETHIOPIA

ÉVALUATION DES IMPACTS DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE À LONG TERME SUR LE DÉBIT DES COURS D›EAU ET LA SÉCHERESSE AFIN D'ENCOURAGER UNE GESTION DURABLE DES RESSOURCES EN EAU ET DE L'AGRICULTURE DANS LE BASSIN VERSANT DE BORKENA, DANS LE BASSIN DE L'AWASH, EN ÉTHIOPIE

Asnake Enawgaw Amognehegn[1 *], Asmare Belay Nigussie[2]

ABSTRACT

Climate variability and change pose significant challenges to water resources and agriculture, particularly in the Borkena Watershed, part of Ethiopia's Awash Basin. The region is prone to recurring droughts that disrupt agricultural productivity and water availability, exacerbating socio-economic vulnerabilities. Despite the critical need to understand long-term climate impacts, research specifically targeting the Borkena Watershed is limited. This study investigates how climate variability influences water availability and drought patterns in the watershed. The objectives were to assess the performance of CMIP6 climate models under two Shared Socioeconomic Pathways (SSP2-4.5 and SSP5-8.5) and evaluate projected changes in precipitation, temperature, and streamflow. Using observed data (1985–2014) and projections (2041–2100), three models GFDL-CM3, MPI-ESM2-MR, and HADGEM2-AO were identified as best performing for the study area. The SWAT model simulated streamflow, while drought patterns were analyzed using the Reconnaissance Drought Index (RDI), Streamflow Drought Index (SDI), and Agricultural Standardized Precipitation Index (aSPI). Results indicate that maximum rainfall is projected to increase by 11.37% and 13.89%, while maximum temperatures may rise by 4.14°C and 5.23°C under SSP2-4.5 and SSP5-8.5, respectively. Despite higher rainfall and temperature, streamflow is predicted to decline by 36.29% and 32.04%, indicating reduced water availability. Hazardous drought events are expected to be most frequent at Kombolcha, Kemisse, and Cheffa stations, with agricultural droughts posing the greatest threat. The findings highlight the urgent need for integrated watershed management, sustainable water resource utilization, climate-smart agriculture, early warning systems, and community-based adaptation strategies to enhance resilience. Implementing these measures can mitigate the impacts of long-term climate variability on streamflow and future drought patterns, ensuring more secure water resources and sustainable agriculture in the Borkena Watershed.

Keywords: Borkena watershed, climate change; drought pattern, Mitigation Measures.

RESUME

La variabilité et le changement climatiques posent des défis majeurs pour les ressources en eau et l'agriculture, en particulier dans le bassin versant de Borkena, qui fait partie du bassin de l'Awash en Éthiopie. La région est exposée à des sécheresses récurrentes qui

1 School of Civil and Water Resource Engineering & Architecture, Kombolcha Institute of Technology, Wollo University, Kombolcha1145, Ethiopia: amanenawgawu@gmail.com (A.E.A); belay1asmare@gmail.comm (A.B.N),

2 Correspondence author: amanenawgawu@gmail.com ; Tel.: +251 9 48 26 49 11

affectent la productivité agricole et la disponibilité en eau, aggravant ainsi les vulnérabilités socio-économiques. Malgré la nécessité cruciale de comprendre les impacts climatiques à long terme, il existe peu de recherches dirigées particulièrement vers le bassin versant de Borkena. Cette étude examine la manière dont la variabilité climatique influence la disponibilité en eau et les tendances de sécheresse dans le bassin versant. Il s'agissait d'évaluer les performances des modèles climatiques CMIP6 selon deux scénarios socio-économiques communs (SSP2-4,5 et SSP5-8,5) et d'analyser les changements prévus en matière de précipitations, de température et de débit fluvial. À partir de données d'observation (1985–

2014) et de projections (2041–2100), trois modèles — GFDL-CM3, MPI-ESM2-MR et HADGEM2-AO — ont été identifiés comme étant bien performants pour la zone d'étude. Le modèle SWAT a permis de simuler le débit fluvial, tandis que les tendances de sécheresse ont été analysés à l'aide de l'Indice de reconnaissance de la sécheresse (RDI), de l'indice de sècheresse d'écoulement fluvial (SDI) et de l'indice de précipitations standardisé pour l'agriculture (aSPI). Les résultats indiquent que les précipitations maximales devraient augmenter de 11,37% et 13,89%, tandis que les températures maximales pourraient augmenter de 4,14 °C et 5,23 °C respectivement dans le cadre des scénarios SSP2-4,5 et SSP5-8,5. Malgré une augmentation des précipitations et des températures, les débits fluviaux sont destinés à diminuer de 36,29% et 32,04%, signalant ainsi une réduction de la disponibilité en eau. Les événements de sécheresse dangereux devraient être les plus fréquents aux stations de Kombolcha, de Kemisse et de Cheffa, les sécheresses agricoles constituant la menace la plus grave. Les résultats soulignent la nécessité d'avoir une gestion intégrée du bassin versant, une utilisation durable des ressources en eau, une agriculture adaptée au climat, des systèmes d'alerte précoce et des stratégies d'adaptation communautaires pour renforcer la résistance. La mise en œuvre de ces mesures peut atténuer les impacts de la variabilité climatique à long terme sur le débit fluvial et les tendances futures de sécheresse, garantissant ainsi une meilleure sécurité des ressources en eau et une agriculture durable dans le bassin versant de Borkena

Mots-clés : Bassin versant de Borkena; Changement climatique; Tendances de sécheresse, Mesures d'atténuation.

AGROECOLOGICAL SOIL MANAGEMENT IN VEGETABLE PRODUCTION, IMPACT ON SOIL HEALTH AND IRRIGATION SCHEDULING

GESTION AGROÉCOLOGIQUE DES SOLS DANS LA PRODUCTION MARAICHERE, IMPACT SUR LA SANTÉ DES SOLS ET LA PROGRAMMATION DE L'IRRIGATION

E. Guillot[1], L. Pares[2], C. Leroy[1], H. Raynal[1], F. Chinarro[1], D. Calmant[1]

ABSTRACT

In Mediterranean conditions, irrigation is unavoidable to secure vegetable production. A major challenge is to maximize the conservation of plant-available water in the soil profile. Improving soil multifunctionality, especially water infiltration and retention, through agroecological practices like mulching and/or reduction of soil tillage could be efficient over time. The impacts of such soil conservation practices on the amount of plant-available water and its dynamics are not consistent and vary with soil texture. Soil management in market gardening can be fairly intensive, with several crops per year and repeated tillage operations. We set up a field experiment in 2023 at the INRAE experimental facility (Alénya, South of France), based on a gradient of soil management practices combining soil tillage intensity and organic matter (OM) supply. (T-ref: conventional tillage + low OM; T-NA: passive tillage + low OM; TNA-Sup: shallow passive tillage + high OM; NT: No tillage + high OM). Soil water dynamics was continuously monitored with both tensiometers and soil water content sensors. Once a year soil health was evaluated and water consumption and crop performances measured across seasons. After 2 years of experiment, we observed differences between treatments for soil conditions, irrigation schedule and amount of water supplied varied according to the crop species and to the treatment in such case. Data based on soil volumetric water content and water potential appeared less variable in the NT treatment compared to T-ref and T-NA, highlighting a potential buffering effect. NT exhibited the highest water infiltration rates across years and T-NA the lowest. For spring crop, total water amount could be similar between treatments but effective irrigation scheduling was different (cucumber) or cumulative water consumption was higher under T-ref (bell pepper). Our results highlighted the capacity of alternative, agroecological soil management in vegetable production to perform as well as conventional management, while improving soil health over time.

Keywords: Agroecological practices; Soil management; Irrigation schedule; Water consumption; Soil health.

RESUME

Dans les conditions Méditerranéennes, l'irrigation est inévitable pour assurer la production maraîchère. L'un des principaux défis à relever est de maximiser la conservation de l'eau disponible pour les plantes dans le profil de sol. L'amélioration de la multifonctionnalité du sol, notamment en matière d'infiltration et de contrôle de l'eau, grâce à des pratiques agroécologiques telles que le paillage et/ou la réduction du travail du sol, pourrait s'avérer efficace avec le temps. Les effets de ces pratiques de conservation des sols sur la quantité de l'eau disponible aux plantes et sur sa dynamique ne sont pas constants et varient selon la texture du sol. La gestion des sols en maraîchage peut être assez intensive, produisant

1 Agroecological Vegetable Systems Experimental Facility, INRAE, Universite Montpellier, Alenya, 66200, France, Email : Esther.Guillot@Inrae.Fr

2 Agroecological Vegetable Systems Experimental Facility, INRAE, Universite Montpellier, Alenya, 66200, France, Email : Esther.Guillot@Inrae.Fr

plusieurs récoltes par an et des exploitations répétées de travail du sol. En l'an 2023, nous avons mis en place une expérience de terrain menée au centre expérimental de l'INRAE

(Alénya, sud de la France), basée un gradient de pratiques de gestion des sols combinant l'intensité du travail du sol et l'apport de matière organique (MO). (T-ref : travail du sol conventionnel + faible teneur en MO; T-NA : travail du sol passif + faible teneur en MO; TNA-Sup : travail du sol passif superficiel + teneur élevée en MO; NT : sans travail du sol + teneur élevée en MO). La dynamique de l'eau dans le sol a été surveillée en continu à l'aide de tensiomètres et de capteurs de teneur en eau du sol. Une fois par an, la santé des sols a été évaluée et la consommation d'eau ainsi que les rendements des cultures ont été calculés au fil des saisons. Après deux années d'expérimentation, nous avons constaté des différences entre les traitements en ce qui concerne l'état des sols, la programmation de l'irrigation et la quantité d'eau fournie, qui variaient en fonction de l'espèce cultivée et du traitement appliqué. Les données concernant la teneur en eau volumétrique du sol et le potentiel hydrique se sont révélées moins variables dans le traitement NT que dans les traitements T-ref et T-NA, ce qui met l'accent sur l'effet tampon potentiel. Le traitement NT a présenté les taux d'infiltration d'eau les plus élevés sur l'ensemble des années, tandis que le traitement T-NA a affiché les plus faibles. En ce qui concerne les cultures de printemps, la quantité totale de l'eau pouvait être similaire entre les traitements, mais la programmation d'irrigation efficace était différente (concombre) ou la consommation cumulée de l'eau était plus élevée dans le cadre du traitement T-ref (poivron). Nos résultats ont mis l'accent sur la capacité des pratiques alternatives et agroécologiques de la gestion des sols dans la production sur maraîchère à offrir des performances équivalentes à celles des pratiques de la gestion conventionnelle, tout en améliorant la santé des sols au fil du temps.

Mots-clés : Pratiques agroécologiques; Gestion du sol; Programme d'irrigation; Consommation d'eau; Santé du sol.

INFLUENCE OF DIFFERENT IRRIGATION REGIMES ON COVER CROPS BIOMASS PRODUCTION AND WATER PRODUCTIVITY

INFLUENCE DE DIFFÉRENTS RÉGIMES D'IRRIGATION SUR LA PRODUCTION DE BIOMASSE DES CULTURES DE COUVERTURE ET LA PRODUCTIVITÉ DE L'EAU

Hector Mussillon[1], Lionel Alletto[2], Gaël Hermet[1], Cyril Dejean[1], Jean-Marie Lopez[1], David Tang[1], Claire Wittling[1]

ABSTRACT

Cover crops provide important ecosystem services but their establishment and biomass production are often constrained by water availability under Mediterranean conditions. This study investigated the effects of contrasting irrigation regimes on cover crop biomass production, soil water dynamics, and water productivity during the 2025–2026 growing season in southern France. A double cover crop system combining a summer sorghum/vetch mixture followed by a winter rapeseed/phacelia/faba bean mixture was evaluated under three irrigation treatments: rainfed (IR0), 20 mm irrigation at sowing (IR), and 150 mm supplemental irrigation (IR+). Soil water content was monitored biweekly down to 1.5 m using neutron probe measurements, allowing calculation of cover crop water use through a field-scale water balance approach.

Irrigation strongly increased summer cover crop biomass production, reaching 0.3, 1.9, and 6.0 t DM ha^{-1} under IR0, IR, and IR+, respectively. Corresponding water use amounted to 31, 87, and 180 mm. Total water productivity increased with irrigation, while irrigation water productivity was highest under the single establishment irrigation treatment. Results highlight that limited irrigation at establishment may provide an efficient compromise between biomass production and water conservation under Mediterranean semi-arid conditions.

Keywords: Biomass production; Water productivity; Ecosystem services; Soil water dynamics; Water use.

RESUME

Les cultures de couverture fournissent des services écosystémiques importants, mais leur mise en place et la production de biomasse font souvent face aux contraintes de la disponibilité de l'eau dans les conditions méditerranéennes. Cette étude a examiné les effets exercés par les régimes d'irrigation contrastés sur la production de biomasse des cultures de couverture, la dynamique de l'eau dans le sol et la productivité de l'eau au cours de la saison de croissance 2025–2026 au sud de la France. Un système à double culture de couverture, en combinant un mélange de sorgho et de vesce en été avec un mélange de colza, de phacélie et de féverole en hiver, a été évalué selon trois traitements d'irrigation: agriculture pluviale (IR0), avec 20 mm d'irrigation au semis (IR) et avec 150 mm d'irrigation d'appoint (IR+). Le suivi de la teneur en eau du sol a été réalisé toutes les deux semaines jusqu'à une profondeur de 1,5 m à l'aide de mesures par sonde à neutrons, permettant ainsi de calculer la consommation de l'eau par des cultures de couverture grâce à une approche de bilan hydrique à l'échelle de la parcelle. L'irrigation a fortement accru la production de biomasse des cultures de couverture en été, atteignant 0,3, 1,9 et 6,0 t MS ha^{-1} respectivement dans

1 G-Eau, Univ Montpellier, Agroparistech, Brgm, Cirad, Inrae, Institut Agro, Ird, Montpellier, France
2 Université De Toulouse, Inrae, Inpt, Ei Purpan, Agir, Castanet-Tolosan, France

le cadre de traitements IR0, IR et IR+. La consommation d›eau correspondante s›élevait à 31, 87 et 180 mm. La productivité totale de l'eau a augmenté avec l'irrigation, tandis que la productivité de l'eau d'irrigation était la plus élevée dans le traitement d'irrigation dans un établissement unique. Les résultats soulignent qu'une irrigation limitée dans un établissement peut constituer un compromis efficace entre la production de biomasse et la conservation de l'eau dans des conditions semi-arides méditerranéennes.

Mots-clés : Production de biomasse; Productivité de l'eau; Services écosystémiques; Dynamique de l'eau du sol; Consommation d'eau.

BEYOND IRRIGATION: THE ROLE OF DRAINAGE IN BUILDING CLIMATE RESILIENT PADDY SYSTEMS

AU-DELA DE L'IRRIGATION : LE ROLE JOUE PAR LE DRAINAGE DANS LA MISE EN PLACE DES SYSTEMES RIZICOLES RESISTANTS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

S.H.A. Mohd Yusof [1]

ABSTRACT

Climate change is intensifying extreme rainfall events, severely increasing flash flood and waterlogging risks within global irrigated agricultural systems. Paddy cultivation is highly sensitive to prolonged inundation caused by heavy monsoonal precipitation and inadequate hydraulic discharge capacity (Bouman & Tuong, 2001; Tuong & Bouman, 2003). While prevailing adaptation strategies prioritize irrigation efficiency, the critical role of drainage networks as active climate adaptation tools remains heavily underemphasized (Ouyang et al., 2020; Hossain et al., 2016). This paper addresses this knowledge gap by analyzing the drainage adaptation pathways deployed at the IADA Kerian irrigation scheme, a vital rice granary managed by Malaysia's Department of Irrigation and Drainage (DID). Utilizing a simplified conceptual framework, this study demonstrates how targeted structural, operational, and institutional drainage interventions can successfully mitigate flood vulnerabilities, preserve crop integrity, and reinforce agricultural resilience against hydrological extremes (ICID, 2016; Pathak et al., 2012).

Keywords: Extreme rainfall events; Irrigation efficiency; Simplified conceptual framework; Flood vulnerabilities.

RESUME

Le changement climatique intensifie les événements de précipitations extrêmes, augmentant de manière considérable les risques de crues soudaines et d'engorgement au sein des systèmes agricoles irrigués à l'échelle mondiale. La culture du riz est très sensible aux inondations prolongées causées par de fortes précipitations de mousson et à une capacité d'évacuation hydraulique insuffisante (Bouman & Tuong, 2001; Tuong & Bouman, 2003). Etant donné que les stratégies d'adaptation dominantes accordent la priorité à l'efficacité de l'irrigation, le rôle essentiel joué par les réseaux de drainage en tant qu'outils actifs d'adaptation au changement climatique reste largement sous-estimé (Ouyang et al., 2020 ; Hossain et al., 2016).

Cet article adresse ce vide de connaissances en analysant les stratégies d'adaptation en matière de drainage mises en œuvre au sein du périmètre irrigué d'IADA Kerian, un grenier rizicole essentiel géré par le Département de l'irrigation et du drainage (DID) de Malaisie. En utilisant un cadre conceptuel simplifié, cette étude démontre comment des interventions ciblées en matière de drainage – tant sur le plan structurel, opérationnel qu'institutionnel – peuvent réussir à atténuer les vulnérabilités aux inondations, préserver l'intégrité des cultures et renforcer la résistance agricole aux phénomènes hydrologiques extrêmes (ICID, 2016 ; Pathak et al., 2012).

Mots-clés : Evénements de précipitations extrêmes; Efficacité de l'irrigation; Cadre conceptuel simplifié; Vulnérabilité aux inondations.

1 Ministry of Agriculture and Food Security, Department of Irrigation and Agricultural Drainage, Putrajaya, Malaysia

SMALL WATER STORAGE SYSTEMS FOR CLIMATE-RESILIENT AGRICULTURE: DANG VALLEY IRRIGATION PROJECT

PETITS SYSTÈMES DE STOCKAGE D'EAU POUR UNE AGRICULTURE RÉSISTANTE AU CLIMAT : PROJET D'IRRIGATION DE LA VALLÉE DE DANG

Susheel C Acharya[1]

ABSTRACT

Nepal, despite abundant water resources, struggles to meet year-round water demand because of highly seasonal rainfall and uneven distribution of rivers and groundwater. The Dang Valley in western Nepal exemplifies this paradox, where fertile land and favorable agroecology are constrained by water scarcity during the dry season. Small water storage systems have emerged as a practical way to capture excess monsoon runoff and use it during lean months, thereby enhancing irrigation, domestic water supply, and climate resilience. These decentralized, cost-effective structures—earthen dams, ponds, and reservoirs—are transforming agriculture by enabling multiple cropping seasons, diversifying production, and increasing yields by more than 50 percent. Farmers who were previously limited to subsistence farming are now adopting commercial models, supported by improved water reliability and scientific inputs.

The Dang Valley experience demonstrates that storage dams not only improve agricultural productivity but also strengthen community institutions through Water User Associations (WUAs), fostering participatory governance, resource mobilization, and financial sustainability. Secondary benefits include groundwater recharge, fisheries, biodiversity restoration, ecotourism, and enhanced livelihoods for disadvantaged groups. While challenges such as sedimentation, leakage, and climateinduced risks remain, proper design, watershed management, and adaptive operation can mitigate these threats.

The economic and environmental returns are significant: cropping intensity has doubled, household incomes have risen, and local ecosystems have been revitalized. Importantly, these interventions embody Integrated Water Resources Management (IWRM) principles by balancing human needs with groundwater recharge and empowering local communities. The Dang Valley case illustrates that small storage dams are more than technical infrastructure; they are institutional innovations that build resilience, promote equity, and provide sustainable pathways for climateresilient agriculture. As Nepal confronts increasing climate variability, scaling up such systems offers a viable strategy for water security and rural transformation.

Keywords: Water storage systems; Groundwater recharge; Water User Associations (WUAs); Sedimentation; Integrated Water Resources Management (IWRM).

RESUME

Malgré des ressources en eau abondantes, le Népal tente désespérément à répondre à la demande en eau tout au long de l'année en raison des fortes précipitations saisonnières et d'une répartition inégale des cours d'eau et des nappes phréatiques. La vallée de Dang, situé à l'ouest du Népal, illustre parfaitement ce paradoxe : ses terres fertiles et son environnement agroécologique favorable sont limités par la pénurie d'eau pendant la saison sèche. Les petits systèmes de stockage d'eau ont été créés comme un moyen pratique pour capter

1 Joint Secretary, Ministry of Energy, Water Resources and Irrigation, Government of NEPAL, acharyasusheel@gmail.com

l'eau excédentaire de ruissellement de la mousson et de les utiliser pendant les mois de pénurie d'eau, améliorant ainsi l'irrigation, l'approvisionnement en eau à usage domestique et la résistance au changement climatique. Ces structures décentralisées et rentables — barrages en terre, étangs et réservoirs — transforment l'agriculture en permettant plusieurs cycles de culture, la diversification de la production et l'augmentation des rendements de plus de 50%. Les agriculteurs, qui se limitaient auparavant à une agriculture de subsistance, adoptent désormais des modèles commerciaux, soutenus par une meilleure fiabilité de l'approvisionnement en eau et des contributions scientifiques.

L'expérience menée dans la vallée de Dang prouve que les barrages de stockage améliorent non seulement la productivité agricole, mais renforcent également les institutions communautaires grâce aux Associations des usagers de l'eau (AUE), favorisant ainsi la gouvernance participative, la mobilisation des ressources et la viabilité financière. Il convient de noter que les avantages secondaires comprennent la réalimentation des eaux souterraines, la pêche, la restauration de la biodiversité, l'écotourisme et l'amélioration des moyens de subsistance des groupes défavorisés. Bien que des défis tels que la décantation, les fuites et les risques liés au changement climatique persistent, une conception adéquate, une gestion des bassins versants et une exploitation adaptative permettent d'atténuer ces menaces.

Les bénéfices économiques et environnementaux sont significatifs: l'intensité culturale a doublé, les revenus des ménages ont augmenté et les écosystèmes locaux ont été revitalisés. Il est important de noter que ces interventions expriment les principes de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) en équilibrant les besoins humains avec la réalimentation des eaux souterraines et en autonomisant les communautés locales. Le cas de la vallée de Dang démontre que les petits barrages de stockage sont plus que de simples infrastructures techniques; ce sont des innovations institutionnelles qui s'appuient sur la résistance, favorisent l'équité et ouvrent des voies durables pour avoir une agriculture résistante au changement climatique. Alors que le Népal fait face à une variabilité climatique croissante, le renforcement de tels systèmes constitue une stratégie viable pour la sécurité hydrique et la transformation rurale.

Mots-clés : Systèmes de stockage d'eau; Réalimentation des eaux souterraines; Associations des usagers de l'eau (AUE); Décantation; Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE).

RESILIENT IRRIGATION INFRASTRUCTURE AND COMMUNITY-CENTERED CANAL REHABILITATION: INTEGRATED EVIDENCE FROM THE BABAO SECOND MAIN CANAL, TAIWAN

INFRASTRUCTURES D'IRRIGATION RÉSISTANTES ET RÉHABILITATION DES CANAUX AXÉE SUR LES COMMUNAUTÉS : ANALYSE INTÉGRÉE TIRÉE DU DEUXIÈME CANAL PRINCIPAL DE BABAO, TAÏWAN

Paul Abudulai Yelinje[1], Jui-Min Hsu[2], Juabih Wang[3], Shih-Hao Wang[3] and Su-Chin Chen[4*]

ABSTRACT

Across monsoon Asia, aging irrigation networks face physical decay, climate extremes, and pressure to deliver ecological and social benefits. This paper examines the rehabilitation of the Babao Second Main Canal in Changhua County, Taiwan, as a test of whether aging infrastructure can become multifunctional climate assets without reducing agricultural productivity. Synthesizing engineering records, ecological monitoring, carbon accounting, and participatory governance documentation, the study evaluates a 382 m pilot reach rehabilitated during a 42-day irrigation shutdown. The project reduced annual conveyance losses by ~27,000 m³, provided 38 m³/s flood-diversion capacity alongside 14 m³/s irrigation flow, and lowered embodied carbon by 17% relative to conventional designs. Ecological outcomes included the preservation of four mature trees, the creation of 577 m² of vegetated space, and the rapid return of native birds. Enabled through participatory governance, the project demonstrates how ecological engineering, common-pool resource governance, and nature-based solutions (NbS) can transform canals into living infrastructure systems. The Babao case provides a replicable model for climate-vulnerable irrigated landscapes where dense settlements and agricultural engagements coexist. A key finding is that these outcomes were enabled not by advanced technology alone, but by integrated design and participatory governance. Community involvement throughout planning and construction strengthened technical effectiveness, social legitimacy, and long-term maintenance capacity.

Keywords: Irrigation, Multifunctional Infrastructure, Climate Adaptation, Participatory Governance, Ecological engineering, Nature-based Solutions.

RESUME

Dans toute l'Asie touchée par la mousson, le vieillissement des réseaux d'irrigation font face à la dégradation physique, aux phénomènes climatiques extrêmes et à la nécessité de générer des bénéfices écologiques et sociaux. Cet article examine la réhabilitation du deuxième canal principal de Babao, situé dans le comté de Changhua, à Taïwan, comme un test permettant de déterminer la mesure dans laquelle les infrastructures vieillissantes peuvent devenir des

1 International Doctoral Program in Agriculture/Nature-based Solutions Research Center, National Chung Hsing University, Taiwan, No. 145 Xingda Rd., South Dist., Taichung City 402, Taiwan (R.O.C.). Emails: pabudulai@yahoo.com or d8113030208@nchu.edu.tw

2 Changhua Management Office, Farmland Irrigation Agency, Ministry of Agriculture, Taiwan, No. 133 Sec 2, Zhongshan Rd., Yuanlin City, Taiwan (R.O.C). Email: ch875@iachu.nat.gov.tw

3 Glorious Engineering Consultants Co., Ltd., Taiwan, 11 F.-2, No. 6, Ln. 256, Sec. 2, Xitun Rd., Xitun Dist., Taichung City 407428, Taiwan (R.O.C.). Email: gloriou.mail@msa.hinet.net

4 Academy of Circular Economy/Nature-based Solutions Research Center, National Chung Hsing University, Taiwan, No. 145 Xingda Rd., South Dist., Taichung City 402, Taiwan (R.O.C.). *Email: scchen@nchu.edu.tw

atouts climatiques multifonctionnels sans réduire la productivité agricole. En synthétisant les rapports techniques, les données de surveillance écologique, la comptabilité carbone et la documentation relative à la gouvernance participative, l'étude évalue un tronçon pilote de 382 m réhabilité pendant la fermeture de l'irrigation de 42 jours. Le projet a permis de réduire les pertes de transport annuelles d'environ 27 000 m³, d'offrir une capacité de dérivation des crues de 38 m³/s parallèlement à un débit d'irrigation de 14 m³/s, et de diminuer le carbone incorporé de 17% par rapport aux conceptions conventionnelles. Sur le plan écologique, les résultats incluent la préservation de quatre arbres matures, la création de 577 m² d'espaces végétalisés et le retour rapide d'oiseaux indigènes. Grâce à une gouvernance participative, ce projet démontre comment l'ingénierie écologique, la gouvernance des ressources communes et les solutions fondées sur la nature (NbS) peuvent transformer les canaux en systèmes d'infrastructures vivants.

Le cas de Babao offre un modèle reproductible pour les paysages irrigués vulnérables au changement climatique où coexistent des milieux d'habitation denses et des activités agricoles. Il faut noter que ces résultats n'ont pas été rendus possibles uniquement par une technologie de pointe, mais par une conception intégrée et une gouvernance participative. L'implication des parties prenantes tout au long de la planification et de la construction a renforcé l'efficacité technique, la légitimité sociale et la capacité d'entretien à long terme.

Mots-clés : Irrigation; Infrastructure multifonctionnelle; Adaptation au climat; Gouvernance participative; Génie écologique; Solutions fondées sur la nature.

INNOVATING AGROECOLOGY-BASED INDIGENOUS TECHNOLOGIES FOR CLIMATE-RESILIENT WATER MANAGEMENT

INNOVATION DES TECHNOLOGIES AUTOCHTONES FONDÉES SUR L'AGROÉCOLOGIE POUR UNE GESTION DE L'EAU RÉSISTANTE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

U. N. Parajuli[1], B. R. Thapa[2], and S.C. Acharya[3]

ABSTRACT

Declining water availability is a major consequence of climate change, posing significant challenges for contemporary water management. In response, there is growing recognition of Indigenous water management technologies and knowledge systems (ITK), developed over generations by mountain communities to cope with spatial and temporal variability in water availability driven by complex physiographic conditions. Rooted in a deep understanding of local ecological systems, these technologies promote sustainable resource management and offer valuable nature-based solutions to climate change. However, despite increasing calls to upscale ITK concepts, systematic research and practical efforts for their adaptation and integration remain limited.

This paper examines two such Indigenous technologies: the *Karez* system—gently sloping underground tunnels used to access groundwater in Central Asia—and gravity canal-based daily flow-regulating ponds in the trans-Himalayan region. It first analyzes the scientific principles underlying their functioning and then, through case studies in Nepal, evaluates the transferability and effectiveness of their core concepts for climate-resilient water infrastructure and management.The paper suggests that the technological concepts underlying these Indigenous technologies, when adequately understood and contextually adapted, can be successfully integrated into modern engineering design of water infrastructure to enhance climate resilience in water management.

Keywords: Water management, agroecology, Indigenous technology, Climate adaptation, Mountainous landscape, and Nepal.

RESUME

La diminution des ressources en eau est une conséquence majeure du changement climatique, qui pose des défis considérables à la gestion contemporaine de l'eau. En réponse à cela, on tend de plus en plus à reconnaître la nécessité des technologies et des systèmes de connaissances autochtones (ITK) en matière de gestion de l'eau, développés au fil des générations par les communautés montagnardes pour faire face à la variabilité spatiale et temporelle de la disponibilité en eau, induite par des conditions physiographiques complexes. Ancrées dans une compréhension profonde des systèmes écologiques locaux, ces technologies encouragent une gestion durable des ressources et offrent de précieuses solutions fondées sur la nature pour lutter contre le changement climatique. Cependant, En dépit des appels croissants font en faveur d'une mise à l'échelle des concepts ITK, il

1 Interdisciplinary Water Management Engineer, Freelance researcher, and member NENCID, Nepal, unparajuli@gmail.com

2 Principal (Associate Professor), Universal Engineering and Science College, Pokhara University, Kathmandu, Nepal, bthapa.ioe@gmail.com

3 Joint Secretary, Ministry of Energy, Water Resources and Irrigation, Government of NEPAL, acharyasusheel@gmail.com

existe peu de recherche systématique et des efforts concrets visant à leur adaptation et à leur intégration. Cet article analyse deux de ces technologies autochtones : le système Karez — des tunnels souterrains à pente douce utilisés pour accéder aux eaux souterraines en Asie centrale — et les bassins de réglage du débit quotidien alimentés par des canaux gravitaires dans la région transhimalayenne. Il analyse tout d'abord les principes scientifiques qui mettent l'accent sur leur fonctionnement, puis, à travers des études de cas menées au Népal, évalue le transfèrement et l'efficacité de leurs concepts de base des infrastructures et une gestion de l'eau résistantes au changement climatique.

Cet article précise que les concepts technologiques associés à ces technologies autochtones, lorsqu'ils sont correctement compris et adaptés au contexte, peuvent être intégrés avec succès dans la conception technique moderne des infrastructures hydrauliques afin de renforcer la résistance au climat dans la gestion de l'eau.

Mots-clés : Gestion de l'eau; Agroécologie**;** Technologie autochtone; Adaptation au climat; Paysage montagneux; Népal.

CLIMATE CHANGE AND ADAPTIVE WATER MANAGEMENT IN LOWER CHAO PHRAYA AND THA CHIN BASINS, THAILAND

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET GESTION ADAPTATIVE DE L'EAU DANS LES BASSINS INFÉRIEURS DE LA CHAO PHRAYA ET DE LA THA CHIN, THAÏLANDE

Wongsa Sanit[1], Suttigran Arthon[2] and Sakdeethanaporn Aekkasit[3]

ABSTRACT

Climate change is one of the most pressing threats to sustainable development across the globe. There are expected to have significant effects on water resources planning and management, especially in estuary areas. A number of works have used numerical models attempting to simulate river catchment hydrological processes of rainfall-runoff, sediment transport, salinity intrusion and coastal erosion processes as well as to study the impact of climate change. However, there are a few application studies in Thailand. Wongsa et al. have exploited MIKE11 model to predict sea level affecting salinity intrusion and agricultural production in Tha Chin, Mae Klong and Chao Phraya rivers. Metropolitan Waterworks Authority (MWA) and Royal Irrigation Department (RID) reported that salinity intrusion, raw water supply and agricultural productivity in Chao Phraya and Ta Chin Rivers were affected by climate change. The objective of this study is to evaluate of the vulnerability and adaptability for water management in Chao Phraya River Basin and Tha Chin River Basin under drought conditions by using the MIKE11 software. Performance of the numerical model was applied to simulate flow events in 2100, which are water level change and salinity intrusion on agricultural and raw water supply in the proposed study areas. The study covered the area from Chao Phraya Dam, Chai Nat Province and Pho Phraya Regulator, Suphan Buri Province and to the river estuary at the Gulf of Thailand for Chao Phraya and Tha Chin rivers, respectively. The results of comparison between models and observation data revealed order of forecasting error (R2) in the range of 0.77-0.99 for water level and 0.75-0.86 for salinity. For model applications, the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios from IPCC report were simulated. Results indicated an increase salinity at Sam Lae Pumping Station were 0.83-0.87 g/l, the value of 0.25 g/l exceeding standard and the pointed tip of salinity was at Ko rain sub-district, Ayutthaya Province in Chao Phraya river, and the value of 2.0 g/l exceeding standard and the pointed tip of salinity was at Sam Phran district, Nakhon Pathom Province in Tha Chin river. The intrusion of salinity into two rivers has increased significantly. For agriculture, salinity values effect on economic plants in Nonthaburi, Ratchaburi, Nakhon Pathom and Prachinburi provinces. This intrusion of salinity affects growth of economic plants such as rice, durian, coconut, lychee, mango and, etc. Developing salt tolerant crop varieties and farming methods, and funding infrastructure projects to prevent saltwater flooding, groundwater contamination by seawater intrusion can help coastal farms remain viable as sea levels rise. It will also be important to regulate brackish aquaculture to avoid conflicts between rice farmers and shrimp/fish farmers. However, Metropolitan Waterworks Authority (MWA) reported that climate change affected salinity intrusion and raw water supply in Lower Chao Phraya River. The observed effects demonstrated that Sam Lae Pumping Station will not be available when salinity is over 0.25 and/or 0.50 g/l, and water supply shortage. The mitigation plan has suggested that

1 Department of Civil Technology Education, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, sanit.won@kmutt.ac.th
2 Former Royal Irrigation Department, Bangkok , Thailand, asut999@gmail.com
3 Director, Large-Scale Irrigation Construction Office No.7, Royal Irrigation Department, Thailand, A.sakdeethanaporn@gmail.com

the diversion from Mae Klong River and construction of new pump station for short-term and long-term, respectively. the proposed locations of new raw water pump station along the Chao Phraya River from Ayutthaya to Singburi Province. It was found that the most suitable sites when evaluation by multi-criteria analysis (MCA) is the site at Klong Pongpheng, Ayutthaya Province. The findings of this study will provide guidance for adapting the management of water resources for water supply and agriculture in the lower Chao Phraya and Tha Chin river basins.

Keywords: Climate Change, Salinity Intrusion, Adaptation Measures, Water Management, MIKE11 Software.

RESUME

Le changement climatique fait face à l'une des menaces les plus pressantes en ce qui concerne le développement durable à l'échelle mondiale. Il devrait exercer des impacts importants sur la planification et la gestion des ressources en eau, en particulier dans les zones estuariennes. De nombreux travaux ont utilisé des modèles numériques pour essayer de simuler les processus hydrologiques des bassins versants (écoulement naturel, transport sédimentaire, intrusion saline et érosion côtière) ainsi que pour étudier l'impact du changement climatique. Cependant, peu d'études ont été menées relevant de l'application en Thaïlande. Wongsa et al. ont utilisé le modèle MIKE11 pour prédire l'impact du niveau de la mer sur l'intrusion saline et la production agricole dans les bassins versants de Tha Chin, de Mae Klong et de Chao Phraya. L'Autorité métropolitaine des eaux (MWA) et le Département royal de l'irrigation (RID) ont signalé que l'intrusion saline, l'approvisionnement en eau brute et la productivité agricole des bassins versants de Chao Phraya et de Tha Chin étaient affectés par le changement climatique. Cette étude vise à évaluer la vulnérabilité et la capacité d'adaptation de la gestion de l'eau des bassins versants de Chao Phraya et de Tha Chin en conditions de sécheresse, à l'aide du logiciel MIKE11. Les performances du modèle numérique ont été utilisées pour simuler les événements d'écoulement prévus en 2100, à savoir les variations du niveau d'eau et l'intrusion saline, ainsi que leurs effets sur l'agriculture et l'approvisionnement en eau brute dans les zones d'étude proposées. L'étude a couvert la zone s'étendant du barrage de Chao Phraya (province de Chai Nat), du régulateur de Pho Phraya (province de Suphan Buri) jusqu'à l'estuaire (golfe de Thaïlande) pour les fleuves Chao Phraya et Tha Chin, respectivement. Les résultats obtenus de la comparaison faite entre les modèles et les données d'observation ont révélé un coefficient de détermination (R^2) compris entre 0,77 et 0,99 pour le niveau d'eau et entre 0,75 et 0,86 pour la salinité. Pour les applications des modèles, les scénarios SSP1-2.6 et SSP5-8.5 issus du rapport du GIEC ont été simulés. Les résultats ont indiqué une augmentation de la salinité à la station de pompage de Sam Lae comprise entre 0,83 et 0,87 g/l, la valeur de 0,25 g/l dépassant la norme, et le pic de salinité a été observé dans le sous-district de Ko Rain, dans la province d'Ayutthaya, sur le fleuve Chao Phraya, avec une valeur de 2,0 g/l dépassant la norme, et le pic de salinité se situant dans le district de Sam Phran, dans la province de Nakhon Pathom, sur le fleuve Tha Chin. L'intrusion saline dans deux cours d'eau a augmenté de manière considérable. Dans le domaine agricole, les niveaux de salinité ont exercé un impact sur les cultures commerciales dans les provinces de Nonthaburi, Ratchaburi, Nakhon Pathom et Prachinburi. Cette intrusion saline exerce un impact sur la croissance des cultures commerciales telles que le riz, le durian, la noix de coco, le litchi, la mangue, etc. Le développement de variétés des cultures et de méthodes agricoles tolérantes au sel, ainsi que le financement des projets d'infrastructure visant à prévenir les inondations d'eau salée et la contamination des eaux souterraines par l'intrusion d'eau de mer, peuvent aider les exploitations agricoles côtières à rester viables confrontés à l'élévation du niveau de la mer. Il sera également important de régler l'aquaculture en eau saumâtre afin d'éviter les conflits entre les riziculteurs et les éleveurs de crevettes ou de poissons. Cependant, l'Autorité métropolitaine des eaux (MWA) a constaté que le changement climatique avait

exercé un impact sur l'intrusion saline et l'approvisionnement en eau brute du cours inférieur du fleuve Chao Phraya. Les observations ont démontré que la station de pompage de Sam Lae ne pourrait pas être opérationnelle lorsque la salinité dépassera 0,25 et/ou 0,50 g/l, ce qui entraînera une pénurie d'approvisionnement en eau. Le plan d'atténuation propose un détournement du fleuve Mae Klong et la construction d'une nouvelle station de pompage à court et à long terme respectivement. Les emplacements envisagés pour la nouvelle station de pompage d'eau brute se situent le long du fleuve Chao Phraya, entre la province d'Ayutthaya et celle de Singburi. Il a été établi que le Klong Pongpheng, dans la province d'Ayutthaya est le site le plus approprié pour l'analyse multicritères (MCA). Les conclusions tirées de cette étude serviront de lignes directrices pour adapter la gestion des ressources en eau destinées à l'approvisionnement en eau et à l'agriculture dans les bassins versants du cours inférieur de Chao Phraya et de Tha Chin.

Mots-clés : Changement climatique; Intrusion saline; Mesures d'adaptation; Gestion de l'eau; Logiciel MIKE11.

CAPACITY OF SOIL ANALOGUE FACING CLIMATE CHANGE: A TRUMP OR A JUMBLE?

CAPACITÉ DES SOLS CONSTRUITS FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : ATOUT OU PROBLÈME?

Behzad Nasri[1], Latifah Omar[2], Marie-José Makhoul[3], and Olivier Fouché-Grobla[4]

ABSTRACT

Constructed soils created from mineral materials mixed with composted biowaste are proposed as for urban land restoration. Their relevance under climate change lies in their capacity to regulate infiltration, water retention, drainage, and carbon storage under increasingly contrasted hydrometeorological conditions. However, the threshold beyond which added organic matter no longer improves these functions remains poorly quantified. This study investigated the response of a constructed silty soil to increasing carbon pool, with emphasis on hydraulic processes controlling soil–water transfer at plot scale. A four-month in situ experiment was conducted using a silty soil mixed with food-waste compost at 0, 5, 10, and 15% (v/v). Four 1 m² plots were exposed to natural rainfall conditions. Matrix Ks (saturated hydraulic conductivity) was measured using a Mini Disk infiltrometer, while effective Ks and available water capacity were estimated using the BEST approach. Laboratory analyses included bulk density, organic matter content, carbon and nitrogen contents, and laser granulometry before and after organic matter removal. Results showed that added compost modified hydraulic functioning more strongly than textural class. Effective Ks increased progressively with compost proportion, reaching values up to six times higher at 15% compost than in the unmixed control plot, indicating enhanced drainage through structural and macropore pathways. In contrast, matrix Ks exhibited limited temporal persistence. Available water capacity increased piercingly after the first amendment, from 3.71% to 5.32% at 5% compost, but showed no significant additional increase at 10 and 15%. No robust relationship was observed between colloid-associated organic matter and hydraulic response. Regarding carbon dynamics, considering the last field campaign, total carbon content was multiplied by 2.4, 2.9 and 3.1 between the control soil and composite ones, respectively. At the same time, the organic matter associated with the mineral colloidal fraction also increased, suggesting that the food-waste compost used in this study contained a relatively high proportion of recalcitrant carbon, which did not induce a strong short-term priming effect. These findings identify 5% compost as a functional threshold for this silty soil: beyond this level, gains in matrix Ks and water retention become marginal.

Keywords: Climate change; natural rainfall; bulk density; organic matter content; food-waste compost.

RESUME

Les sols synthétisés, construits à partir de matériaux minéraux mélangés avec des déchets biologiques compostés, sont proposés pour la restauration des sols urbains. Leur pertinence dans le contexte du changement climatique réside dans leur capacité à régler l'infiltration, la rétention d'eau, le drainage et le stockage du carbone dans le cadre des conditions

1 Institute of Ecology and Environmental Sciences (IEES-Paris): Sorbonne Univ., CNRS, INRAE, Univ. Paris Cité, Univ. Paris Est Créteil, IRD, Paris, France, E-mail: behzad.nasri@ird.fr
2 Institute of Ecosystem Science Borneo, Universiti Putra Malaysia (UPM), Bintulu, Sarawak, Malaysia, Email:latifahomar@upm.edu.my
3 Institute of Ecology and Environmental Sciences (IEES-Paris): Sorbonne Univ., CNRS, INRAE, Univ. Paris Cité, Univ. Paris Est Créteil, IRD, Paris, France, E-mail: marie-jose-makhoul@hotmail.com
4 Geomatics & Land Law Laboratory (GeF), CNAM, Le Mans & Paris, France, Email: olivier.fouhce-grobla@lecnam.net

hydrométéorologiques de plus en plus contrastées. Cependant, le seuil au-delà duquel l'ajout de matière organique n'améliore plus ces fonctions reste mal quantifié. Cette étude a examiné la réponse d'un sol limoneux construit à l'augmentation du stock de carbone, en mettant l'accent sur les processus hydrauliques régissant les transferts sol-eau à l'échelle de la parcelle. Une expérience in situ de quatre mois a été faite sur un sol limoneux mélangé avec le compost de déchets alimentaires à des concentrations de 0, 5, 10 et 15% (v/v). Quatre parcelles de 1 m² ont été exposées aux conditions pluviométriques naturelles. La conductivité hydraulique saturée (Ks de la matrice) a été mesurée à l'aide d'un infiltromètre Mini Disk, tandis que la conductivité hydraulique effective (Ks effective) et la capacité en eau disponible ont été estimées via l'approche BEST. Les analyses en laboratoire ont porté sur la densité apparente, la teneur en matière organique, les teneurs en carbone et en azote, ainsi que sur la granulométrie laser avant et après élimination de la matière organique. Les résultats ont montré que l'ajout de compost modifiait le fonctionnement hydraulique plus fortement que la classe texturale. La valeur de Ks effective a augmenté progressivement avec la proportion de compost, atteignant des valeurs jusqu'à six fois supérieures à 15% de compost par rapport à la parcelle témoin sans compost, ce qui indique un drainage amélioré par les voies structurelles et de macropores. En revanche, la valeur Ks de la matrice a montré une persistance temporelle limitée. La capacité en eau disponible a augmenté de manière spectaculaire après le premier apport d'amendement, passant de 3,71% à 5,32% avec 5% de compost, mais n'a pas présenté l'augmentation supplémentaire significative à 10% et 15%. Aucune relation solide n'a été observée entre la matière organique associée aux colloïdes et la réponse hydraulique. En ce qui concerne la dynamique du carbone, selon la dernière campagne de terrain, la teneur totale en carbone a été multipliée par 2,4, 2,9 et 3,1 respectivement entre le sol témoin et les sols composites. En même temps, la matière organique associée à la fraction colloïdale minérale a également augmenté, ce qui suggère que le compost issu de déchets alimentaires utilisé dans cette étude contenait une proportion relativement élevée de carbone récalcitrant, qui n'a pas induit d'effet d'amorçage marqué à court terme. Ces résultats identifient un apport de 5% de compost comme seuil fonctionnel pour ce sol limoneux : au-delà de ce niveau, les gains en conductivité hydraulique saturée (Ks de la matrice) et en rétention d'eau deviennent marginaux.

Mots-clés : Changement climatique; Précipitations naturelles; Densité apparente; Teneur en matière organique; Compost des déchets alimentaires.

STATUS OF AGROECOLOGY IN SOUTH AFRICA: A DIAGNOSTIC ASSESSMENT OF TRANSITION PATHWAYS IN SMALL-SCALE AND COMMERCIAL FARMING SYSTEMS

ÉTAT DE L'AGROÉCOLOGIE EN AFRIQUE DU SUD : ÉVALUATION DIAGNOSTIQUE DES TRAJECTOIRES DE TRANSITION DANS LES SYSTÈMES AGRICOLES À PETITE ÉCHELLE ET COMMERCIAUX

S. Walker[1], J.J. Anderson[2], J.S Kau[3], T.A.B. Koatla[4], G.L. Maboa[5], C. Mapumulo[6], A. Mashakeni[7], P.C. Tharaga[8], and C.N. Qwabe[9]

ABSTRACT

South Africa is experiencing a gradual transition from conventional agricultural production systems towards more sustainable and regenerative farming approaches. Agroecology has emerged as a promising pathway for addressing challenges associated with climate variability, environmental degradation, biodiversity loss, and socio-economic inequalities. This paper presents the findings of a preliminary diagnostic assessment conducted across ten local municipalities in five provinces of South Africa to evaluate the status of agroecological adoption among small-scale, community-based, and commercial farming enterprises, representing diverse agroecological zones, production systems, and socio-economic conditions. Agroecological performance was assessed using an evaluation framework based on the thirteen principles proposed by the High-Level Panel of Experts (HLPE). Information was gathered through farmer interviews, focus-group discussions, stakeholder consultations, and field observations involving small-scale, community-based, and commercial farming enterprises. Results indicate that although a transition to agroecology is underway, adoption remains uneven across regions and farming sectors. Ecological principles associated with biodiversity, recycling, soil health, livestock integration, and reduced external inputs were commonly observed. In contrast, social dimensions such as fairness, governance, knowledge co-creation, and community empowerment were less developed and inconsistently implemented. Commercial irrigation enterprises demonstrated successful transitions towards conservation agriculture, diversified crop rotations, cover crops, silvopastoral crop-livestock integration, and agroforestry systems. Small-scale agroecological initiatives on the other hand relied heavily on support from community networks, non-governmental organisations (NGOs) and indigenous knowledge systems. These findings suggest that agroecological transition is underway in South Africa with producers already implementing practices aligned with agroecological principles, often without formally identifying them as such. However, broader adoption and long-term sustainability will require stronger institutional support, improved policy alignment, enhanced capacity development, strengthened value-chain integration, and greater investment in knowledge-sharing platforms that connect

1 South African Agricultural Research Council (ARC) - Natural Resources & Engineering (NRE), Agrometeorology, Pretoria, South Africa; University of the Free State, Soil, Crop & Climate Sciences, Bloemfontein, South Africa Email: suewalker06@gmail.com WalkerS@arc.agric.za
2 ARC-NRE, Water Science, Bloemfontein, South Africa Email: AndersonK@arc.agric.za
3 ARC- Central Office (CO), EAU, Pretoria, South Africa Email: KauJ@arc.agric.za
4 ARC-NRE, Water Science, Bloemfontein, South Africa Email: KoatlaT@arc.agric.za
5 ARC-CO, EAU, Pretoria, South Africa Email: MaboaL@arc.agric.za
6 ARC-NRE, Soil Science, Pietermaritzburg, South Africa Email: DlaminiC@arc.agric.za
7 RC-NRE, Agrometeorology, Pretoria, South Africa; Wits University, APES, Johannesburg, South Africa, Email: MashakeniA@arc.agric.za
8 ARC-NRE, Agrometeorology, Pretoria, South Africa Email: TharagaC@arc.agric.za
9 ARC-CO, EAU, Pretoria, South Africa Email: QwabeC@arc.agric.za

farmers, researchers, civil society organisations, with policymakers. These findings provide an important baseline for guiding future agroecological policy development and implementation in South Africa.

Keywords: Agroecology; climate variability; socio-economic inequalities; biodiversity; recycling; soil health; cover crops.

RESUME

L'Afrique du Sud fait face actuellement à une transition progressive des systèmes de production agricole conventionnels vers des approches agricoles plus durables et régénératrices. L'agroécologie est devenue une trajectoire prometteuse pour relever les défis liés à la variabilité climatique, à la dégradation de l'environnement, à la perte de biodiversité et aux inégalités socio-économiques. Cet article présente les résultats d'une évaluation diagnostique préliminaire menée dans dix municipalités locales de cinq provinces en Afrique du Sud afin d'évaluer l'état d'avancement de l'adoption de l'agroécologie au sein des exploitations agricoles à petite échelle, communautaires et commerciales, représentant diverses zones agroécologiques, divers systèmes de production et diverses conditions socio-économiques. Les performances agroécologiques ont été évaluées à l'aide d'un cadre d'évaluation fondé sur les treize principes proposés par le Groupe d'experts de haut niveau (HLPE). Les informations ont été recueillies grâce à des entretiens avec des agriculteurs, des discussions en groupes de réflexion, des consultations avec les parties prenantes et des observations sur le terrain auprès d'exploitations agricoles à petite échelle, communautaires et commerciales. Les résultats indiquent que, bien qu'une transition vers l'agroécologie soit en cours, son adoption reste inégale à travers les régions et les secteurs agricoles. Les principes écologiques liés à la biodiversité, au recyclage, à la santé des sols, à l'intégration de l'élevage et à la réduction des intrants externes ont été fréquemment observés. Au contraire, les dimensions sociales telles que l'équité, la gouvernance, la co-création de connaissances et l'autonomisation des communautés étaient moins développées et mises en œuvre de manière inégale. Les exploitations commerciales irriguées ont démontré des transitions réussies vers l'agriculture de conservation, la diversification des rotations culturales, les cultures de couverture, l'intégration sylvopastorale entre cultures et élevage, ainsi que les systèmes agroforestiers. Les initiatives agroécologiques à petite échelle, quant à elles, s'appuyaient fortement sur le soutien des réseaux communautaires, des organisations non gouvernementales (ONG) et des systèmes de savoirs autochtones. Ces résultats proposent qu'une transition agroécologique soit en cours en Afrique du Sud, les producteurs mettant déjà en œuvre des pratiques conformes aux principes agroécologiques, sans nécessairement les désigner de cette façon. Cependant, une adoption plus grande et une durabilité à long terme nécessiteront un soutien institutionnel plus solide, une meilleure harmonisation des politiques, un renforcement des capacités, une intégration accrue de la chaîne de valeur et des investissements plus importants dans des plateformes de partage des connaissances reliant les agriculteurs, les chercheurs, les organisations de la société civile et les décideurs politiques. Ces résultats font partie d'une une base de référence importante pour orienter l'élaboration et la mise en œuvre futures des politiques agroécologiques en Afrique du Sud.

Mots-clés: Agroécologie; Variabilité climatique; Inégalités socio-économiques; Biodiversité; Recyclage; Santé des sols; Cultures de couverture.

DRY-STONE TERRACES FOR AGROHYDROLOGICAL RESILIENCE

TERRASSES EN PIERRE SÈCHE POUR UNE RÉSISTANCE AGROHYDROLOGIQUE

C. Colliot[1], A. Ract-Madoux[2]

ABSTRACT

Across Mediterranean and mid-mountain regions, dry-stone terraced landscapes historically functioned as integrated agrohydrological systems combining runoff regulation, soil conservation, gravity-based irrigation, drainage management, and microclimate adaptation. In a context of increasing climatic instability, prolonged droughts, violent rainfall events, erosion processes, and growing tensions surrounding water resources, their rehabilitation deserves renewed attention within contemporary irrigation and territorial adaptation strategies.

Based on field observations, restoration works, professional training activities, and territorial interactions developed in southern France, this paper proposes to reinterpret dry-stone terraces as distributed agrohydrological infrastructures operating across plot, landscape, and watershed scales. Particular attention is given to the Domaine du Paternel vineyard in Cassis, where restoration works conducted before winter rainfall periods allowed the rehabilitation of nearly ten breaches representing approximately 80 linear meters of dry-stone retaining walls.

The paper examines how these systems may contribute simultaneously to runoff attenuation, distributed infiltration, soil conservation, biodiversity support, vegetation hydration, and agricultural resilience. By articulating practical experience with historical agronomic knowledge and contemporary hydrological approaches, this contribution highlights the relevance of terraced systems within current reflections concerning regenerative hydrology, Nature-Based Solutions, conservation agriculture, and climate adaptation.

The paper finally argues for the development of operational indicators capable of translating the multifunctionality of terraced systems into measurable hydrological, ecological, agricultural, and socio-economic values supporting future rehabilitation strategies.

Keywords: dry-stone terraces; soil conservation; Runoff attenuation; Nature-Based Solutions, climate adaptation.

RESUME

A travers les régions méditerranéennes et de moyenne montagne, historiquement, les paysages de terrasses en pierre sèche ont joué un rôle intégré, combinant régulation de ruissellement, conservation des sols, irrigation gravitaire, gestion du drainage et adaptation au microclimat. Face à une instabilité climatique croissante, des sécheresses prolongées, des événements de fortes précipitations, l'érosion et les tensions accrues relevant des ressources en eau, leur réhabilitation mérite une attention renouvelée dans le cadre des stratégies contemporaines d'irrigation et d'adaptation au territoire.

Sur la base des observations de terrain, des travaux de restauration, des activités de formation professionnelle et des interactions territoriales menées au sud de la France, cet article propose de réinterpréter les terrasses en pierres sèches comme des infrastructures agrohydrologiques distribuées fonctionnant à l'échelle de la parcelle, du paysage et du bassin versant. Une attention particulière est accordée au vignoble du Domaine du Paternel à

1 Agro & Co, EcoMur, ResTank, Aix-en-Provence, France

2 Labora, Aix-en-Provence, France

Cassis, où des travaux de restauration menés avant les périodes de précipitations hivernales ont permis la remise en état de près de dix brèches représentant environ 80 mètres linéaires de murs de soutènement en pierres sèches.

Cet article examine la manière dont ces systèmes peuvent contribuer simultanément à l'atténuation du ruissellement, à l'infiltration diffuse, à la conservation des sols, au maintien de la biodiversité, à l'hydratation de la végétation et à la résistance agricole. En associant l'expérience pratique aux connaissances agronomiques historiques et aux approches hydrologiques contemporaines, cette contribution met l'accent sur la pertinence des systèmes en terrasses dans le cadre des réflexions actuelles sur l'hydrologie régénérative, les solutions fondées sur la nature, l'agriculture de conservation et l'adaptation au changement climatique

Enfin, cet article discute en faveur d'élaboration des indicateurs opérationnels capables de traduire la multifonctionnalité des systèmes en terrasses en valeurs hydrologiques, écologiques, agricoles et socio-économiques mesurables, afin de soutenir les stratégies futures de réhabilitation.

Mots-clés : Terrasses en pierres sèches; Conservation des sols; Atténuation du ruissellement; Solutions fondées sur la nature; Adaptation au changement climatique.

MANAGEMENT OF AGRICULTURAL SUBSURFACE DRAINED FLOW BY ARTIFICIAL WETLAND: WATER QUALITY AND BIODIVERSITY SUPPORT

GESTION DE L'ECOULEMENT DES EAUX DRAINÉES AGRICOLES SOUTERRAINES PAR DES ZONES HUMIDES ARTIFICIELLES : QUALITE DE L'EAU ET CONSERVATION DE LA BIODIVERSITE

Tournebize Julien[1], and Chaumont Cédric

ABSTRACT

Agricultural intensification in northern France has generated diffuse pollution and landscape homogenization, threatening both water quality and biodiversity. In the Brie Nangissienne, a region characterized by intensive cereal production and widespread subsurface drainage, artificial wetland buffer zones—zones tampons humides artificielles (ZTHA)—were implemented to intercept drainage waters and promote mitigation of nitrates and pesticides. This study synthesizes a decade of hydrological, chemical, ecotoxicological, and ecological monitoring conducted on four ZTHA in Rampillon (SeineetMarne). Waterquality monitoring demonstrates average reductions of 11 mg/L in nitrate concentrations, 37% mean pesticide removal. Biodiversity surveys reveal 374 species across seven taxonomic groups, including amphibians, odonates, birds, mammals, reptiles, and insects, with species richness in ZTHA approaching that of regional natural wetlands. The results confirm that ZTHA simultaneously enhance water quality and support diverse biological communities, providing multiple ecosystem services. This article discusses the integrated functioning of ZTHA, their ecological and agronomic benefits, and the implications for regional waterresource management and agroecological transition.

Keywords: agrohydrological systems; soil conservation; gravity-based irrigation; runoff attenuation; terraced systems; climate adaptation

RESUME

L'intensification agricole au nord de la France a donné lieu à une pollution diffuse et une homogénéisation des paysages, menaçant à la fois la qualité de l'eau et la biodiversité. Dans la Brie Nangissienne, région caractérisée par une céréaliculture intensive et un drainage souterrain très répandu, des zones tampons humides artificielles (ZTHA) ont été mises en place pour intercepter les eaux de drainage et favoriser l'atténuation des teneurs en nitrates et en pesticides. Cette étude synthétise une décennie de suivi hydrologique, chimique, écotoxicologique et écologique mené sur quatre ZTHA à Rampillon (Seine-et-Marne). Le suivi de la qualité de l'eau montre une réduction moyenne de 11 mg/L des concentrations en nitrates et une élimination moyenne des pesticides de 37%. Les inventaires de la biodiversité ont révélé 374 espèces réparties en sept groupes taxonomiques, notamment des amphibiens, des odonates, des oiseaux, des mammifères, des reptiles et des insectes, la richesse en espèces des ZTHA se rapprochant de celle des zones humides naturelles régionales. Ces résultats confirment que les ZTHA rehaussent à la fois la qualité de l'eau tout en soutenant la diversité des communautés biologiques, fournissant ainsi de multiples services écosystémiques. Cet article examine le fonctionnement intégré des ZTHA, leurs avantages écologiques et agronomiques, ainsi que leurs implications sur la gestion régionale des ressources en eau et la transition agroécologique.

Mots-clés: Systèmes agrohydrologiques; Conservation des sols; Irrigation gravitaire; Atténuation d'écoulement; Systèmes en terrasses; Adaptation au changement climatique.

1 INRAE – University of Paris-Saclay, UR HYCAR, 1 Rue Pierre-Gilles de Gennes, F92160 Antony, France

IS IRRIGATION A BARRIER OR A LEVER FOR AGROECOLOGICAL TRANSITION? INSIGHTS FROM SOUTHWESTERN FRANCE

EST-CE QUE L'IRRIGATION EST UN OBSTABLE OU UN LEVIER DE LA TRANSION AGROECOLOGIQUE? PERSPECTIVES TIREES DU SUD-OUEST DE LA FRANCE

Ariane Degroote[1], Adeline Bouvard[2], Hichem Amichi[3]

ABSTRACT

How irrigation shapes the agroecological transition of farming systems remains poorly understood, despite mounting pressure on water and increasing market constraints. Drawing on an agrarian diagnosis and 107 in-depth interviews in an irrigated region of southwestern France (Barguelonne, Adour-Garonne basin), this communication analyzes how water access and value-chain organization shape farms' transition pathways. Results show that water access is a key factor in both farming system differentiation and transition pathways. Three main trajectories emerge: (i) farms with limited water access tend to engage in redesign strategies based on diversification and system restructuring at the cost of taking an economic risk and investing a considerable amount of effort; (ii) farms with secure and abundant water supplies mainly follow efficiency-oriented pathways, often constrained by capital-intensive production systems; and (iii) intermediate situations are associated with substitution strategies, particularly organic conversion. Value-chain organization further shapes these trajectories through two conceptions of agroecology, a "lever-based" approach focused on targeted technical fixes, and a "systemic" one oriented toward whole-system redesign. Value chains thus prove ambivalent, acting as both a resource and a constraint that can either foster or lock in the transition. These findings show that agroecological transitions arise from the interplay of water access, farm characteristics and value-chain dynamics, not from water availability alone. For policymakers, fostering them in irrigated agriculture means looking beyond water infrastructure and allocation, and coordinating water management, agricultural support and value-chain governance across diverse territorial contexts.

Keywords: agroecological transition; limited water access; water supplies; Value-chain organization; irrigated agriculture.

RESUME

La manière dont l'irrigation façonne la transition agroécologique des systèmes agricoles reste mal comprise, en dépit d'une pression croissante sur les ressources en eau et des contraintes de marché de plus en plus fortes. Sur la base d'un diagnostic agraire et 107 entretiens approfondis menés dans une région irriguée du sud-ouest de la France (Barguelonne, bassin de l'Adour-Garonne), cette communication analyse l'influence de l'accès à l'eau et de l'organisation de la chaîne de valeur sur les trajectoires de transition des exploitations agricoles. Les résultats montrent que l'accès à l'eau joue un rôle important à la fois dans la différenciation des systèmes agricoles et les trajectoires de transition. Trois trajectoires principales apparaissent : (i) les exploitations disposant d'un accès limité à l'eau ont tendance à s'engager dans des stratégies de refonte basées sur la diversification et la restructuration du système, au prix d'une prise de risque économique et d'un investissement considérable en efforts; (ii) les exploitations bénéficiant d'un approvisionnement en eau sûr et abondant suivent principalement des

1 Chambre Régionale d'Agriculture en Occitanie, UMR CNRS UT2J LISST, Occitanie, Toulouse, France
2 Université de Toulouse Ecole d'Ingénieurs de PURPAN, UMR CNRS UT2J LISST, Toulouse, France
3 Université de Toulouse Ecole d'Ingénieurs de PURPAN, UMR CNRS UT2J LISST, Toulouse, France

trajectoires axées sur l'efficacité, souvent limitées par des systèmes de production à forte intensité capitalistique; et (iii) les situations intermédiaires sont associées à des stratégies de substitution, notamment la conversion à l'agriculture biologique. L'organisation de la chaîne de valeur façonne davantage ces trajectoires à travers deux conceptions de l'agroécologie : une approche «axée sur les leviers» centrée sur des solutions techniques ciblées, et une approche «systémique», orientée vers une refonte globale du système. Les chaînes de valeur se révèlent ainsi ambivalentes, agissant à la fois comme une ressource et une contrainte pouvant soit favoriser, soit entraver la transition. Ces résultats constatent que les transitions agroécologiques résultent de l'interaction entre l'accès à l'eau, les caractéristiques des exploitations agricoles et la dynamique des chaînes de valeur, et non de la disponibilité de l'eau seulement. Pour les décideurs politiques, favoriser ces transitions dans l'agriculture irriguée implique de ne pas se limiter aux infrastructures et à la répartition de l'eau, mais de coordonner la gestion de l'eau, le soutien à l'agriculture et la gouvernance des chaînes de valeur dans des contextes territoriaux variés.

Mots-clés : Tansition agroécologique; Accès limité à l'eau; Approvisionnement en eau; Organisation de la chaîne de valeur; Agriculture irriguée.

FOURTY YEARS OF CONTINUOUS MONITORING OF AGRICULTURAL DRAINAGE IN WESTERN FRANCE

QUARANTE ANS DE SUIVI CONTINU DU DRAINAGE AGRICOLE A L'OUEST DE LA FRANCE

Dutertre A.[1], Brunet-Lefevre D. , Mesmin X.[1], Piquemal B.[1]

ABSTRACT

The experimental drainage system of the Jaillière (northwestern France) was set up in a french national context of drainage. The starting point for the Jaillière experiment is in 1987, in which drainage and runoff water are collected separately. Ten plots are equipped for the collection of drainage and/or runoff water, with areas ranging from 0.34 to 1.08 hectare. One plot kept undrained allows for the measurement of saturation runoff, which predominates in this pedoclimatic environment. The measurement of water flows is carried out on triangular overflow, with a time step of one hour.

In 2026, nearly forty years after the acquisition of the first experimental data, the hydraulic measurements of the Jaillière shed particular light on the long-term effects of drainage in agricultural plots. In the pedoclimatic context of western France, rainfall supplies water to drainage and runoff networks mainly in the winter. Drainage or runoff may occur in the spring and summer, but only one year out of three on average.

From the beginning to the end of a season called the intense drainage season (IDS), water flow in drainage and/or runoff networks is quasi-continuous. During this period, the portion of rainfall evacuated through drainage and/or runoff networks is used to compute the coefficient of restitution (CR_{SDI}).

With these data it is possible to assess the average response of drainage and runoff networks to rainfall in the pedoclimatic context of the Jaillière. Each plot gives an individual hydraulic response influenced by interactions with adjacent plots and with the geologic context, composed of cracked schists.

Long-term setups such as ours help addressing changes in drainage and runoff regimes over the long term and provide data to assess the long-term consequences of farming practices and the effects of climate change under defined environmental conditions (soil, climate).

Keywords: Agricultural drainage; Water flow; Runoff networks; Agricultural practices; Environmental conditions.

RESUME

Le système expérimental de drainage de la Jaillière (nord-ouest de la France) a été créé dans le cadre national français du drainage. L'année 1987 était le point de départ de l'expérience de la Jaillière, où les eaux de drainage et les eaux de ruissellement ont été collectées séparément. Dix parcelles ayant une superficie comprise entre 0,34 et 1,08 hectare, étaient équipées de collecter des eaux de drainage et/ou de ruissellement. Une parcelle non drainée permettait de mesurer le ruissellement par saturation, qui prédominait dans cet environnement pédoclimatique. Les débits étaient mesurés à l'aide de déversoirs triangulaires, avec un pas de temps d'une heure.

1 ARVALIS – Institut du vegetal, Station de recherche et d'expérimentation, 579 route de la Jaillière, 44 370 LOIREAUXENCE – a.dutertre@arvalis.fr, d.brunet-lefevre@arvalis.fr, x.mesmin@arvalis.fr, b.piquemal@arvalis.fr

En 2026, près de quarante ans après l'acquisition des premières données expérimentales, les mesures hydrauliques de la Jaillière apportent un éclairage particulier sur les effets à long terme du drainage sur les parcelles agricoles. Dans le contexte pédoclimatique de l'ouest de la France, les précipitations alimentent les réseaux de drainage et de ruissellement principalement en hiver. Le drainage ou le ruissellement peuvent se produire au printemps et en été, mais en moyenne une année sur trois seulement. Du début à la fin d'une saison appelé «saison de drainage intense» (IDS), l'écoulement d'eau dans les réseaux de drainage et/ou de ruissellement est quasi-continu. Au cours de cette période, on calcule le coefficient de restitution (CRSDI) à l'aide d'une partie des précipitations évacuée par ces réseaux de drainage.

A la lumière de ces données, il est possible d'évaluer la réponse moyenne des réseaux de drainage et de ruissellement aux précipitations dans le contexte pédoclimatique de la Jaillière. Chaque parcelle présente une réponse hydraulique propre, influencée par les interactions avec les parcelles adjacentes et par le contexte géologique, constitué de cristallins fissurés.

Les programmations à long terme tels que celles-ci permettent d'étudier l'évolution des régimes de drainage et de ruissellement longtemps et fournissent des données permettant d'évaluer les conséquences à long terme des pratiques agricoles et les effets du changement climatique dans le cadre des conditions environnementales bien définies (sol, climat).

Mots-clés : Drainage agricole; Ecoulement de l'eau; Réseaux de ruissellement; Pratiques agricoles; Conditions environnementales.

HOW IRRIGATION CAN FACILITATE CONSERVATION AGRICULTURE PRACTICES AND RESULTS: PRACTICAL CASE IN SOUTH-EAST OF FRANCE

COMMENT L'IRRIGATION PEUT FAVORISER LES PRATIQUES ET LES RÉSULTATS DE L'AGRICULTURE DE CONSERVATION : CAS PRATIQUE AU SUD-EST DE LA FRANCE

Marguerie Mathieu,[1]

ABSTRACT

This study examines how irrigation can support the successful implementation of conservation agriculture (CA) in Mediterranean environments, using a long-term field experiment conducted in southeastern France. The region faces strong climatic constraints, including low rainfall and high evapotranspiration, resulting in frequent water deficits that limit crop productivity and complicate the adoption of CA practices. In rainfed systems, crop diversification and the establishment of cover crops are particularly challenging, reducing the effectiveness of CA. The Oraison trial, conducted since 2013, compares rainfed and irrigated systems under conservation agriculture. Results show that CA significantly improves soil properties compared to conventional farming, including higher soil organic matter (+33%), increased carbon storage (+16%), enhanced microbial activity (+100%), and greater biodiversity, particularly earthworms. However, irrigation plays a critical role in enhancing these benefits. It facilitates the implementation of CA principles by enabling reliable cover crop establishment and more diversified crop rotations, including summer crops. Irrigation increases biomass production returned to the soil by 75%, which in turn boosts soil carbon inputs and biological activity. Economic results show that irrigation improves profitability (+118%) due to higher yields and yield stability, although it also increases labor and energy use. At the same time, irrigation modifies soil functioning by accelerating organic matter mineralization, which may limit long-term carbon accumulation if not balanced by sufficient biomass inputs. Overall, the study demonstrates that irrigation is a key enabler for conservation agriculture in dry Mediterranean regions. It improves system performance, stabilizes production, and enhances soil functions. However, careful management is required to balance increased biological activity with adequate carbon inputs in order to sustain soil fertility over the long term.

Keywords: conservation agriculture; climatic constraints; rainfed and irrigated systems; soil properties; biomass production.

RESUME

Cette étude examine la manière dont l'irrigation peut contribuer à la mise en œuvre réussie de l'agriculture de conservation (CA en milieu méditerranéen, à partir d'une expérience de terrain à long terme menée au sud-est de la France. La région fait face à de fortes contraintes climatiques, notamment de faibles précipitations et une évapotranspiration élevée, donnant lieu aux déficits hydriques fréquents limitant ainsi la productivité des cultures et compliquant l'adoption des pratiques de CA. Dans les systèmes pluviaux, la diversification des cultures et la mise en place des cultures de couverture posent particulièrement des difficultés, ce qui réduit l'efficacité de CA. L'essai d'Oraison, mené depuis 2013, compare les systèmes pluviaux et irrigués dans le cadre de l'agriculture de conservation. Les résultats montrent que le CA améliore de manière significative les propriétés du sol par rapport à l'agriculture conventionnelle, y compris une teneur plus élevée en matière organique (+33%), un stockage accru du carbone (+16%), une activité microbienne renforcée (+100%) et une plus grande

1 Arvalis Le plan, Route de Vinon 04800 Gréoux les Bains, m.marguerie@arvalis.fr

biodiversité, en particulier relevant de vers de terre. Cependant, l'irrigation joue un rôle essentiel dans l'amplification de ces avantages. Elle facilite la mise en œuvre des principes de CA en permettant la mise en place fiable de cultures de couverture et des rotations culturales plus diversifiées, y compris des cultures d'été. L'irrigation augmente de 75% la production de biomasse restituée au sol, ce qui stimule à son tour les apports en carbone au sol et l'activité biologique.

Sur le plan économique, les résultats montrent que l'irrigation améliore la rentabilité (+118%) grâce à des rendements plus élevés et à une meilleure stabilité des rendements, même si elle augmente également l'utilisation de la main-d'œuvre et de la consommation d'énergie. En même temps, l'irrigation modifie le fonctionnement du sol en accélérant la minéralisation de la matière organique, donnant lieu à la limitation de l'accumulation de carbone à long terme si ce phénomène n'est pas compensé par des apports suffisants en biomasse. Dans l'ensemble, l'étude démontre que l'irrigation est un facteur clé pour l'agriculture de conservation dans les régions méditerranéennes arides. Elle améliore les performances du système, stabilise la production et renforce les fonctions du sol. Cependant, une gestion rigoureuse est nécessaire pour équilibrer l'activité biologique accrue avec des apports adéquats en carbone afin de préserver la fertilité du sol à long terme.

Mots-clés : Agriculture de conservation; Contraintes climatiques; Systèmes pluviaux et irrigués; Propriétés du sol; Production de biomasse.

ADAPTING REDUCED T`ILLAGE WITHIN MEDITERRANEAN IRRIGATED CONSERVATION AGRICULTURE ENHANCES SOIL HEALTH AND WATER PRODUCTIVITY

L'ADAPTATION DU TRAVAIL DU SOL REDUIT DANS LE CADRE DE L'AGRICULTURE DE CONSERVATION IRRIGUÉE EN MILIEU MÉDITERRANÉEN AMÉLIORE LA SANTÉ DES SOLS ET LA PRODUCTIVITÉ HYDRIQUE

Juan David Dominguez Bohorquez[1], Claire Wittling[1], Nicolas Urruty[2]

ABSTRACT

Conservation agriculture (CA) is widely promoted as a strategy to enhance soil health and resilience, yet its performance under Mediterranean irrigated conditions remains insufficiently documented, particularly when structural constraints emerge during the transition from conventional tillage. This study evaluated the five-year trajectory (2021–2025) of an experiment in southern France comparing CA and conventional tillage (CT) under three water supply modes: non-irrigated (NI), sprinkler (S) irrigation, and subsurface drip (SSD) irrigation.

During the first three years, CA was managed under strict no-tillage while maintaining the other CA pillars (winter cover crops and diversified rotations). Although this practice enhanced several indicators of soil functioning, it also led to increased soil compaction and reduced infiltration. To alleviate these limitations while maintaining CA principles, a one-off decompaction (<25 cm depth) was implemented in 2024, followed by reduced shallow tillage (10–15 cm depth) in 2025.

his study compared conditions during the 2022 and 2025 experimental years, representing the early strict no-till phase and the adaptive reduced-tillage phase, respectively. We analyzed soil physical, chemical, and biological indicators as well as sorghum grain yield and water productivity. In 2022, CA improved aggregate stability, organic matter fractions and microbial activity, but also showed greater penetration resistance and lower infiltration than CT, resulting in significantly lower yields and water productivity. By 2025, soil structural conditions improved while gains in soil organic carbon, particulate and mineral-associated organic matter, microbial biomass, aggregate stability, and basal respiration were maintained or strengthened. Sorghum yield increased markedly, reaching from 8 to 9.2 t ha^{-1} under irrigation, and irrigation water productivity under CA exceeded CT by 24% under S and 53% under SSD.

The results indicate that CA in Mediterranean systems should be viewed as an adaptive management trajectory rather than a strict no-tillage doctrine. While maintaining the other CA pillars, strategic reduced tillage alleviated structural limitations while preserving soil health benefits and substantially improving crop and water productivity.

Keywords: Conservation agriculture; conventional tillage; organic matter; soil health; water productivity.

RESUME

L'agriculture de conservation (CA) est fortement conseillée comme une stratégie visant à améliorer la santé et la résistance des sols; cependant, ses performances en vertu des conditions méditerranéennes irriguées restent insuffisamment documentées, en particulier

1 G-EAU, INRAE, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, Institute Agro, IRD, University of Montpellier, 34000 Montpellier, France, Email: juan-david.dominguez-bohorquez@inrae.fr, Email: claire-wittling@inrae.fr`

2 Société du Canal de Provence (SCP), Le Tholonet, 13182 Aix-en-Provence, France, Email: nicolas.urruty@canal-de-provence.com

lorsque des contraintes structurelles apparaissent lors de la transition depuis le travail du sol conventionnel. Cette étude a évalué l'évolution d'une expérience menée sur cinq ans (2021-2025) au sud de la France, tout en comparant l'agriculture de conservation (CA) et le travail du sol conventionnel (CT) dans le cadre de trois modes d'approvisionnement en eau : sans irrigation (NI), irrigation par aspersion (S) et irrigation goutte-à-goutte souterraine (SSD).

Au cours des trois premières années, l'agriculture de conservation (CA) a été pratiquée dans le cadre de méthode sans le travail du sol strict, tout en maintenant d'autres éléments fondamentaux de cette approche (cultures de couverture hivernales et rotations diversifiées). Bien que cette pratique ait amélioré plusieurs indicateurs du fonctionnement du sol, elle a également donné lieu à une augmentation du compactage du sol et une réduction de l'infiltration. Afin de pallier à ces limites tout en respectant les principes de l'agriculture de conservation, un décompactage unique (à une profondeur de < 25 cm) a été réalisé en 2024, suivi d'un travail du sol réduit superficiel (à une profondeur de 10 à 15 cm) en 2025.

Cette étude a comparé les conditions observées au cours des années expérimentales 2022 et 2025, représentant la phase initiale de sans travail du sol strict et la phase adaptative de travail du sol réduit respectivement. Nous avons analysé les indicateurs physiques, chimiques et biologiques du sol, ainsi que le rendement en grains de sorgho et la productivité hydrique.

En 2022, l'agriculture de conservation (CA) a amélioré la stabilité des agrégats, les fractions de matière organique et l'activité microbienne, mais a également présenté une plus grande résistance à la pénétration et une infiltration plus faible que le travail du sol conventionnel (CT), donnant lieu à la réduction significative des rendements et une productivité hydrique. En 2025, les conditions structurelles du sol s'étaient améliorées, tandis que les gains en carbone organique du sol, en matière organique particulaire et associée aux minéraux, en biomasse microbienne, en stabilité des agrégats et en respiration basale avaient été maintenus ou renforcés. Le rendement du sorgho a augmenté de manière sensible, atteignant entre 8 et 9,2 t ha^{-1} sous la méthode d'irrigation, et la productivité hydrique d'irrigation sous le régime CA a dépassé celle du régime CT de 24% pour l›aspersion (S) et de 53% pour l'irrigation goutte-à-goutte souterraine (SSD).

Ces résultats indiquent que l'agriculture de conservation dans les systèmes méditerranéens doit être analysée comme une trajectoire de gestion adaptative plutôt qu'une doctrine stricte de sans travail du sol. Tout en préservant d'autres éléments fondamentaux de l'agriculture de conservation, le travail du sol réduit stratégique a permis d'atténuer les contraintes structurelles tout en maintenant les bénéfices de la santé du sol et en améliorant considérablement la productivité des cultures et la productivité hydrique.

Mots-clés : Agriculture de conservation; Travail conventionnel du sol; Matière organique; Santé des sols; Productivité hydrique.

RAPID-ONSET DROUGHTS AND IRRIGATION BUFFERING: ASSESSING WATER STRESS AND RICE YIELDS RESPONSES IN SOUTH KOREA

SÉCHERESSES À APPARITION RAPIDE ET EFFET TAMPON DE L'IRRIGATION : ÉVALUATION DU STRESS HYDRIQUE ET DES RÉPONSES DES RENDEMENTS RIZICOLES EN CORÉE DU SUD

Hee-Jin Lee[1], Won-Ho Nam[2], Eunmi Hong[3]

ABSTRACT

Rapid-onset droughts can intensify agricultural water stress before conventional drought indicators become fully established. In irrigated agricultural watersheds, however, the impacts of rapid soil moisture depletion may be partially buffered by reservoirs, river networks, and managed irrigation systems. This study evaluated the temporal relationships among rapid-onset drought intensity, river-network water-surface deficit, and vegetation stress in the Anseongcheon mid-watershed, South Korea, during 2017–2024. Rapid-onset drought intensity was represented using the Flash Drought Intensity Index (FDII), derived from soil moisture percentile dynamics. River-network water-surface deficit was assessed using WSA_spread, a satellite-based indicator derived from reservoir and river water-surface variability. Vegetation response was evaluated using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) anomalies. Weekly FDII, monthly WSA_spread, and 16-day NDVI datasets were harmonized to monthly time steps, and correlation, lag-correlation, event-centered composite, and compound stress analyses were conducted. The results showed that FDII exhibited a stronger relationship with WSA_spread than with NDVI anomalies. The strongest relationship occurred at a one-month lag between FDII and WSA_spread, indicating delayed hydrological response following rapid-onset drought development. In contrast, NDVI anomalies showed weak direct relationships with both FDII and WSA_spread, suggesting that vegetation stress responses may be buffered or delayed within managed irrigation systems. Compound stress conditions characterized by high FDII, high WSA_spread, and negative NDVI anomalies occurred intermittently during the irrigation season. These findings suggest that river-network water-surface deficit indicators can provide useful information for monitoring hydrological drought propagation in irrigated agricultural watersheds and highlight the importance of irrigation buffering effects when interpreting vegetation-based drought responses.

Keywords: Rapid-onset drought; Flash Drought Intensity Index; Irrigation buffering; Water-surface deficit; Vegetation stress; Lag analysis.

RESUME

Les sécheresses à apparition rapide peuvent aggraver le stress hydrique agricole même avant l'établissement plein des indicateurs de sécheresse classiques. Dans les bassins versants agricoles irrigués, cependant, les effets d'une réduction rapide de l'humidité du sol peuvent être partiellement atténués à l'aide des réservoirs, des réseaux hydrographiques et des systèmes d'irrigation gérés. Cette étude a évalué les relations temporelles entre l'intensité des sécheresses à apparition rapide, le déficit de surface d'eau du réseau fluvial et le stress de la végétation dans la partie centrale du bassin versant de l'Anseongcheon, en Corée du Sud, entre la période 2017 et 2024. L'intensité de la sécheresse à apparition

1 Senior Researcher, National Agricultural Water Research Center, Hankyong National University, Republic of Korea: heejin.lee@hknu.ac.kr

2 Professor, School of Social Safety and Systems Engineering, National Agricultural Water Research Center, Hankyong National University, Republic of Korea: wonho.nam@hknu.ac.kr

3 Associate Professor, Department of Environmental Science, College of Agriculture and Life Science, Kangwon National University, Republic of Korea: eunmi.hong@kangwon.ac.kr

rapide a été représentée à l'aide de l'indice FDII (Flash Drought Intensity Index), dérivé de la dynamique des centiles d'humidité du sol. Le déficit de surface d'eau du réseau fluvial a été évalué à l'aide de WSA_spread, un indicateur satellitaire dérivé de la variabilité de la surface d'eau des réservoirs et des cours d'eau. La réponse de la végétation a été évaluée à l'aide des anomalies de l'Indice de végétation par différence normalisée (NDVI). Les séries de données hebdomadaires du FDII, mensuelles du WSA_spread et de 16 jours du NDVI ont été harmonisées à une échelle mensuelle, et des analyses de corrélation, de corrélation avec décalage temporel, de composite centré sur les événements et de contraintes composées ont été menées. Les résultats ont démontré que le FDII présentait une corrélation plus forte avec le WSA_spread par rapport aux anomalies du NDVI. La corrélation la plus forte a été observée avec un décalage d'un mois entre le FDII et le WSA_spread, ce qui indique une réponse hydrologique retardée suite à l'apparition rapide d'une sécheresse. Au contraire, les anomalies du NDVI ont montré de faibles corrélations directes tant avec le FDII qu'avec le WSA_spread, proposant ainsi que les réponses de la végétation au stress peuvent être atténuées ou retardées au sein des systèmes d'irrigation gérés. Des conditions de contraintes composées, caractérisées par un FDII élevé, un WSA_spread élevé et des anomalies négatives du NDVI, se sont produites de manière intermittente pendant la saison d'irrigation. Ces résultats proposent que les indicateurs de déficit de surface d'eau du réseau hydrographique puissent fournir des informations utiles pour surveiller la propagation de la sécheresse hydrologique dans les bassins versants agricoles irrigués et soulignent l'importance d'effet tampon de l'irrigation lors de l'interprétation des réponses de la végétation à la sécheresse.

Mots-clés : Sécheresse à apparition rapide; Indice d›intensité des sécheresses rapides (FDII); Effet tampon de l›irrigation; Déficit de surface d›eau; Stress de la végétation; Analyse de décalage.

NATURE-BASED SOLUTIONS IN AGRICULTURE: INSIGHTS FROM THE COMMON TRAITS OF CHINESE WHIS TERRACE SYSTEMS

LES SOLUTIONS FONDEES SUR LA NATURE EN AGRICULTURE : PERSPECTIVES TIREES DES CARACTERISTIQUES COMMUNES DES SYSTEMES DE TERRASSES CHINOIS RECONNUS COMME OUVRAGES D'IRRIGATION DU PATRIMOINE MONDIAL (WHIS)

Ruoxi Li[1], Lihui Gao[2] and Jing Liu[3]

ABSTRACT

This study examines four ancient Chinese terrace systems—Yuanyang Hani, Shangbao, Ziquejie, and Fengyan—as outstanding historical practices of Nature-based Solutions (NbS) in mountain agriculture. Despite distinct geographical locations and cultural backgrounds, these World Heritage Irrigation Structures (WHIS) share core eco-engineering philosophies. They utilize scientific site selection to create a highly stable three-dimensional "forest-village-terrace-river" spatial layout. Furthermore, they employ "micro-intervention" gravity irrigation networks, integrated water-soil conservation mechanisms, and flexible, community-based water management systems. Notable examples include the Hani people's wood-carved water division and the Fengyan terraces' water share registries, which effectively ensure fair resource distribution and grassroots co-governance.

The systems also exhibit unique characteristics shaped by diverse historical driving forces and ethnic cultures. While Ziquejie relies entirely on natural bedrock fissure water, Fengyan utilizes a specific "field-canal-pond-stream" storage system developed by Qing Dynasty immigrants. The Hani terraces represent indigenous minority nature worship and ancient ecological knowledge, whereas Shangbao reflects the enduring pioneering traditions of the Hakka people.

These ancient systems offer profound insights for contemporary global challenges. They demonstrate how low-impact development and ecological circulation can maintain environmental balance in fragile mountainous regions. By promoting resilient agriculture and sustainable practices—like the Hani's rice-fish-duck co-culture and Fengyan's rice-rapeseed crop rotation—these terraces provide strategic models for ensuring national food security, combating extreme climate change, and reforming modern water resource governance through grassroots stakeholder autonomy. Ultimately, preserving and learning from these living fossils of farming civilization will supply invaluable historical wisdom for achieving a sustainable future.

Keywords: World Heritage Irrigation Structures (WHIS; water management systems; storage system; climate change; modern water resource governance.

RESUME

Cette étude examine quatre anciens systèmes de terrasses chinois — Yuanyang Hani, Shangbao, Ziquejie et Fengyan — en tant que pratiques historiques remarquables de solutions fondées sur la nature (NbS) dans l'agriculture de montagne. Malgré des sites géographiques et des contextes culturels distincts, ces ouvrages d'irrigation du patrimoine

1 Secretariat of Chinese National Committee on Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, A1 Fuxing Road, Beijing, Chin Email: liruoxi@iwhr.com,
2 gaolh@iwhr.com,
3 jing83694@163.com

mondial (WHIS) partagent des principes fondamentaux d'ingénierie écologique. Ils s'appuient sur une sélection scientifique des sites pour créer un agencement spatial tridimensionnel très stable «forêt-village-terrasse-rivière». En plus, ils engagent des réseaux d'irrigation gravitaire basés sur «micro-intervention», des mécanismes intégrés de conservation de l'eau et des sols, ainsi que des systèmes de gestion de l'eau flexibles et communautaires. Parmi les exemples notables, on peut citer le système de répartition de l'eau sculpté dans le bois par le peuple de Hani et les registres de partage de l'eau des terrasses de Fengyan, qui garantissent l'efficacité d'une distribution équitable des ressources et d'une co-gouvernance communautaire.

Ces systèmes présentent également des caractéristiques uniques façonnées par des forces majeures historiques et des cultures ethniques diverses. Alors que le système de Ziquejie dépend surtout de l'eau de diaclase naturelle du substrat rocheux, celui de Fengyan utilise un système de stockage spécifique «champ-canal-étang-courant», mis au point par des immigrants sous la dynastie Qing. Les terrasses du système de Hani incarnent le culte de la nature propre aux minorités autochtones et un savoir écologique ancestral, tandis que le système de Shangbao reflète les traditions pionnières pérennes du peuple de Hakka.

Ces systèmes anciens offrent des perspectives profondes pour relever les défis mondiaux contemporains. Ils démontrent la manière dont le développement à faible impact et la circulation écologique peuvent maintenir l'équilibre environnemental dans les régions montagneuses fragiles. En favorisant une agriculture résistante et des pratiques durables — telles que la culture associée de riz-poisson-canard chez les Hani et la rotation des cultures de riz-colza à Fengyan — ces systèmes de terrasses constituent des modèles stratégiques pour garantir la sécurité alimentaire nationale, lutter contre les effets extrêmes du changement climatique et réformer la gouvernance moderne des ressources en eau grâce à l'autonomie des parties prenantes locales. En fin, la préservation des «fossiles vivants» de la civilisation agricole et les leçons tirés nous apportera une sagesse historique inestimable pour la concrétisation d'un avenir durable.

Mots-clés : Ouvrages d'irrigation du patrimoine mondial (WHIS); Systèmes de gestion de l'eau; Systèmes de stockage; Changement climatique; Gouvernance moderne des ressources en eau.

THE ROLE OF IRRIGATION AND DRAINAGE IN MALAYSIA'S AGRO-ECOLOGICAL TRANSITION UNDER CLIMATE CHANGE: A COMPREHENSIVE ANALYSIS OF ADAPTIVE MANAGEMENT AND TECHNOLOGICAL INTEGRATION

RÔLE JOUE PAR L'IRRIGATION ET LE DRAINAGE DANS LA TRANSITION AGRO-ÉCOLOGIQUE DE LA MALAISIE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : ANALYSE COMPLÈTE DE LA GESTION ADAPTATIVE ET DE L'INTÉGRATION TECHNOLOGIQUE

Nor Hafizah Mohd Suhadis[1], Yuslina Hj Mohd Sani[2], Muhamad Aliif Aimran Jamaari[3]

ABSTRACT

This paper presents a comprehensive framework for Malaysia's agro-ecological transition in rice cultivation to address climate vulnerabilities and achieve the 80% self-sufficiency target under the National Agrofood Policy 2.0. With global climate models projecting a 21% decrease in dry-season irrigation supply, and diagnostics at the IADA Seberang Perak scheme revealing an average overall irrigation efficiency of just 22.14%, systemic upgrades are urgently required. By synthesizing recent case studies, this analysis evaluates interventions across multiple scales: catchment-level agro-hydrological modeling (HEC-HMS/HEC-RAS), tertiary efficiency diagnostics, automated Internet of Things (IoT) water gates and methane-mitigating irrigation regimes. Key findings demonstrate that hydrological modeling at the Tanjung Karang Irrigation Scheme (TAKRIS) highlights severe temporal water mismatches, necessitating off-river storage infrastructure to capture wet-season surpluses for dry-season deficits. Concurrently, deploying ESP32-based IoT automated water gates significantly reduces localized distribution waste by providing real-time precision control and preventing tailwater runoff. Environmentally, implementing Alternate Wetting and Drying (AWD) reduces cumulative methane emissions by 57.81% without compromising crop yields. The study concludes that navigating climate uncertainties requires a multidisciplinary approach. It recommends constructing off-river storage, deploying tertiary-level IoT water gates and broadly adopting safe-AWD regimes. Ultimately, these adaptive management strategies should be unified under an Integrated Water Sector Data Centre (IWSDC) to establish a resilient, data-driven agricultural sector in line with the Water Sector Transformation 2040 agenda.

Keywords: Irrigation Efficiency, Climate Change, HEC-RAS Modeling, IoT Automation, Methane Mitigation, Rice-Microbe Nexus, National Agrofood Policy 2.0, Malaysia.

RESUME

Ce document présente un cadre complet de la transition agro-écologique de la Malaisie dans la riziculture afin de remédier aux vulnérabilités climatiques et d'atteindre l'objectif d'autosuffisance de 80% dans le cadre de la politique agroalimentaire nationale 2.0. Alors que les modèles climatiques mondiaux prévoient une diminution de 21% de l'approvisionnement en irrigation pendant la saison sèche, et que les diagnostics du périmètre irrigué IADA Seberang Perak révèlent une efficacité moyenne globale de l'irrigation de seulement 22,14%,

1 Head of Assistant Director, Division of Irrigation and Agriculture Drainage, Ministry of Agriculture and Food Security Malaysia, Putrajaya, Malaysia, E-mail: norhafizah@water.gov.my

2 Director, Division of Irrigation and Agriculture Drainage, Ministry of Agriculture and Food Security Malaysia, Putrajaya, Malaysia, E-mail: yuslina@water.gov.my

3 Assistant Director, Division of Irrigation and Agriculture Drainage, Ministry of Agriculture and Food Security Malaysia, Putrajaya, Malaysia, E-mail: aliifaimran@water.gov.my

des améliorations systémiques doivent être établies d'urgence. En synthétisant des études de cas récentes, cette analyse examine les interventions à plusieurs échelles : modélisation agro-hydrologique au niveau du bassin versant (HEC-HMS/HEC-RAS), diagnostics d'efficacité tertiaire, vannes automatisées basées sur l'Internet des objets (IoT) et régimes d'irrigation atténuant les émissions de méthane. Les principales conclusions démontrent que la modélisation hydrologique du périmètre irrigué de Tanjung Karang (TAKRIS) met en évidence de graves disparités temporelles dans l'approvisionnement en eau, nécessitant des infrastructures de stockage hors rivière pour capturer les excédents de la saison des pluies et combler les déficits de la saison sèche. Parallèlement, le déploiement de vannes automatisées IoT basées sur ESP32 réduit considérablement les déchets de distribution localisés en offrant un contrôle de précision en temps réel et en empêchant le ruissellement d'eau aval. Sur le plan environnemental, la mise en œuvre de la technique d'humidification et de séchage alternés (AWD) réduit les émissions cumulées de méthane de 57,81% sans compromettre les rendements des agricoles. L'étude conclut que la gestion des incertitudes climatiques nécessite une approche multidisciplinaire. Elle recommande de construire des installations de stockage hors rivière, de déployer des vannes IoT au niveau tertiaire et d'adopter largement des régimes sûrs pour les AWD. Finalement, ces stratégies de gestion adaptative devraient être centralisées au sein d'un centre intégré de données du secteur de l'eau (IWSDC) afin d'établir un secteur agricole résistant et axé sur les données, conformément au programme de transformation du secteur de l'eau à l'horizon 2040.

Mots-clés : Efficacité de l'irrigation; Changement climatique; Modélisation HEC-RAS; Automatisation IoT; Réduction des émissions de méthane; Lien entre riz-microorganismes; Politique agroalimentaire nationale 2.0; Malaisie.

ADAPTIVE STRATEGIES FOR WATER SCARCITY MANAGEMENT IN GOLESTAN PROVINCE: PATHWAYS TOWARD SUSTAINABLE AGRICULTURAL RESILIENCE UNDER CLIMATE CHANGE

STRATEGIES D'ADAPTATION POUR LA GESTION DE LA PENURIE D'EAU DANS LA PROVINCE DU GOLESTAN : VOIES VERS UNE RESISTANCE AGRICOLE DURABLE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Mohammad Nouri [1], Iraj Heydarian [2]

ABSTRACT

Golestan Province, positioned strategically along the southern coast of the Caspian Sea, is intrinsically vulnerable to compounding environmental pressures, primarily stemming from climate change-induced hydrological volatility and unsustainable historical water usage patterns. The province's complex geology and topography, coupled with significant agricultural dependence, place immense strain on both surface and, critically, groundwater resources. This paper underscores the imperative for implementing a comprehensive, multi-sectoral adaptation strategy, as formalized in the Operational Plan for Water Scarcity Adaptation in Golestan Province. The necessity is underscored by observed trends, including erratic river flow regimes and mounting pressure on aquifers supplying major urban centers. The context demands a move beyond reactive measures toward a codified, measurable framework for water security, especially given the high reliance on groundwater reserves in cities like Kordkuy and Minudasht, where unsustainable abstraction poses risks to water quality and long-term yield stability. The methodology employed in this operational plan is built upon a rigorous, evidence-based assessment that integrates completed remedial actions with future structural and non-structural development programs.

Phase I: Remedial Action & Loss Mitigation (Period: 1399-1400): The initial focus was on immediate tactical improvements led by the Rural Water and Wastewater Company. These actions targeted both Apparent Losses (e.g., unauthorized connections, inaccurate metering) and Real Losses (e.g., leakage from aged infrastructure). Specific interventions included the replacement of faulty domestic meters, installation of smart meters, and significant pipeline rehabilitation efforts. For example, planned savings from these initial loss-reduction strategies in the Behrshahr-Bandargaz zone alone were projected at 1.4 MCM (Million Cubic Meters). Furthermore, comprehensive management strategies, including the purchase and installation of new low-flow fixtures and pressure-regulating valves, were initiated to control consumption patterns across the provincial network.

Phase II: Proactive Structural & Non-Structural Development (Period: 1399-1405): The long-term strategy centers on quantifiable groundwater conservation through a Total Proposed Groundwater Saving target of 84.326 MCM. This target is structurally divided: 51.176 MCM is expected from structural measures (e.g., physical infrastructure development), while 17.97 MCM is assigned to non-structural methods, primarily involving the substitution of surface water use where feasible. The distribution of these savings across key hydrological zones (e.g., Gorgan targeted for 48.9 MCM of savings) demonstrates a localized implementation strategy. A core component of this phase involves strict adherence to seven key prerequisites,

1 Assistant Professor, Department of Water Structures and Water Resources Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, tel: 09112800579

2 PhD graduate in Water Resources; CEO of the Golestan Regional Water Company, Gorgan, Iran, tel: 09111758360, Corresponding author: dr.m.nouri@gau.ac.ir

emphasizing economic scrutiny through Cost-Benefit Analysis (CBA), ensuring all investments yield measurable efficacy. This systematic evaluation ensures that adaptation efforts are not only ecologically necessary but also fiscally sustainable.

The successful implementation of this structured, dual-phase methodology is anticipated to deliver significant, measurable improvements in Golestan's water security profile by the end of the Seventh Development Plan period (1405/2026). The immediate impact will be the stabilization of vulnerable aquifers through the 71.376 MCM conservation target, directly mitigating the risks of quality degradation and over-pumping associated with high dependency on underground sources. On the supply side, the integrated urban loss-reduction programs will enhance the efficiency of existing infrastructure, reducing the need for costly emergency supply projects. In conclusion, this operational plan offers a validated, metric-driven roadmap that successfully marries immediate utility management reforms with long-term systemic development goals. It stands as a practical case study demonstrating how Integrated Water Resources Management (IWRM) principles can be translated into actionable, regionally specific programs to bolster resilience against inevitable future water scarcity scenarios.

Keywords: Water Scarcity Adaptation, Agricultural Resilience, Golestan Province Water Governance, Watershed Management, Urban Water Stress, Network Loss Management, Climate Change.

RESUME

La province du Golestan, située stratégiquement le long de la côte sud de la mer Caspienne, est intrinsèquement vulnérable à des pressions environnementales complexes, découlant principalement de la volatilité hydrologique induite par le changement climatique et des modèles historiques d'utilisation de l'eau non durables. La complexité de la géologie et de la topographie de la province, associées à une dépendance agricole importante, exercent une pression immense sur les ressources en eau de surface et, surtout, sur les **ressources en eaux souterraines**. Ce document souligne l'impératif de la mise en œuvre d'une stratégie d'adaptation globale et multisectorielle, telle que formalisée dans le **Plan opérationnel pour l'adaptation à la pénurie d'eau dans la province du Golestan.** La nécessité est mise en évidence par les tendances observées, y compris les régimes irréguliers de débit d'une rivière et la pression croissante sur les aquifères qui alimentent les grands centres urbains. Le contexte exige de passer des mesures réactives à l'adoption d'un cadre codifié et mesurable pour la sécurité de l'eau, en particulier compte tenu de la forte dépendance de réserves d'eaux souterraines dans des villes telles que Kordkuy et Minudasht, où le prélèvement non durable menacent la qualité de l'eau et la stabilité du rendement à long terme. La méthodologie adoptée dans ce plan opérationnel porte sur une évaluation rigoureuse, fondée sur des données probantes, qui intègre les mesures correctives déjà réalisées aux programmes futurs de développement structurels et non structurels.

Phase I : Mesures correctives et atténuation des pertes (période : 1399-1400) : L'accent a d'abord été mis sur les améliorations tactiques immédiates menées par la Société des eaux et des eaux usées en milieu rural. Ces actions ciblaient à la fois les **pertes apparentes** (par exemple, connexions non autorisées, relevés de compteurs imprécis) et les **pertes réelles** (par exemple, fuites provenant d'infrastructures vieillissantes). Les interventions spécifiques comprenaient le remplacement des compteurs domestiques défectueux, l'installation de compteurs intelligents et d'importants efforts de réhabilitation des pipelines. Par exemple, les économies prévues grâce à ces stratégies initiales de réduction des pertes dans la seule zone Behrshahr-Bandargaz ont été projetées à **1,4 MCM** (millions de mètres cubes). En outre, des stratégies de gestion globales, y compris l'achat et l'installation de nouveaux équipements à faible débit et de vannes de régulation de pression, ont été lancées pour maîtriser les habitudes de consommation dans l'ensemble du réseau provincial.

Phase II : Développement structurel et non structurel proactif (période : 1399-1405) : La stratégie à long terme porte sur la conservation quantifiable des eaux souterraines grâce à un **objectif global proposé d'économie d'eau de l'ordre de 84,326 MCM.** Cet objectif est divisé de manière structurelle : **51,176 MCM** proviendront des mesures structurelles (par exemple, le développement des infrastructures physiques), tandis que **17,97 MCM** seront obtenus grâce à des méthodes non structurelles, impliquant principalement la substitution de l'utilisation des eaux de surface lorsque cela est possible. La répartition de ces économies entre les zones hydrologiques clés (par exemple, Gorgan vise l'économie de l'ordre de **48,9 MCM**) démontre une stratégie de mise en œuvre localisée. Un élément central de cette phase implique le respect strict de **sept conditions essentielles**, mettant l'accent sur l'examen économique par une **analyse coûts-avantages (CBA),** garantissant que tous les investissements produisent une efficacité mesurable. Cette évaluation systématique assure que les efforts d'adaptation ne sont pas seulement nécessaires sur le plan écologique, mais reste aussi viable sur le plan financier.

La mise en œuvre réussie de cette méthodologie structurée en double phase devrait permettre d'apporter des améliorations significatives et mesurables au profil de sécurité de l'eau du Golestan d'ici la fin de la période du septième plan de développement (1405/2026). L'impact immédiat sera la stabilisation des aquifères vulnérables grâce à l'objectif de conservation de **71,376 MCM**, atténuant directement les risques de dégradation de la qualité et de surexploitation associés à une forte dépendance de sources souterraines. Du côté de l'offre, les programmes intégrés de réduction des pertes urbaines amélioreront l'efficacité des infrastructures existantes, réduisant ainsi le besoin de projets coûteux d'approvisionnement d'urgence. En conclusion, ce plan opérationnel propose une feuille de route validée, basée sur des indicateurs, qui associe avec succès des réformes immédiates de gestion des services publics à des objectifs de développement systémique à long terme. Il s'agit d'une étude de cas pratique démontrant la manière dont les principes de la **Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE)** peuvent être traduits en programmes concrets et spécifiques aux régions afin de renforcer la résistance face à des scénarios futurs inévitables de pénurie d'eau.

Mots-clés : Adaptation à la pénurie d'eau; Résistance agricole; Gouvernance de l'eau dans la province du Golestan; Gestion des bassins versants; Stress hydrique urbain; Gestion des pertes du réseau; Changement climatique.

REINFORCEMENT LEARNING-BASED RESERVOIR OPERATIONAL MODEL DUE TO CLIMATE CHANGE AND LAND USE: CASE STUDY IN HERITAGE SOLO VALLEY DEVELOPMENT, INDONESIA

MODELE D'EXPLOITATION DE RESERVOIR BASE SUR L'APPRENTISSAGE PAR RENFORCEMENT FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET A L'USAGE DES SOLS: ETUDE DE CAS DU PROJET DE DÉVELOPPEMENT DE LA VALLEE DE HERITAGE SOLO (INDONESIE)

Y. Indriani[1, 2], S.I. Wahyudi[1], T. Andersen[2], and S. Soedarsono[3]

ABSTRACT

The Heritage Solo Valley irrigation and flood-control system is a strategic water facility in the Bengawan Solo basin, Indonesia. It supplies irrigation to approximately 62,000 ha of agricultural land through a main canal of about 191 km and 23 branch canals totaling about 117 km. Climate change, upstream land-use change and non-stationary inflow have made fixed reservoir and canal operating rules less reliable for balancing irrigation supply and flood control. This paper develops a reinforcement learning-based reservoir operation framework for the Heritage Solo Valley system and the Karangnongko watershed. The framework integrates GR4J inflow simulation, RCP4.5 and RCP8.5 climate scenarios, Monte Carlo-based stochastic evaluation, satellite-derived land-use analysis for 2017-2025, and comparative testing of STATIC, DYNAMIC, PPO and PPO-RISK operation policies. Land-use analysis shows settlement expansion from 29.025% to 33.554%, shrub/grassland decline from 12.562% to 6.260%, and an increase in runoff coefficient proxy from 0.424 to 0.443. However, land-use change has limited influence on annual mean GR4J inflow compared with rainfall and potential evapotranspiration. The climate-only model already explains annual mean inflow with R2 = 0.998, while climate + LULC increases it slightly to R2 = 0.999. LULC adds more information for maximum inflow, where R2 increases from 0.105 to 0.254. Under RCP4.5, PPO reduces shortage by 92.3%, spill by 79.7% and the Climate Stress Index by 86.0% compared with STATIC operation. Under RCP8.5, PPO-RISK increases reliability to 0.988 and reduces shortage to 61.72 MCM, although spill remains 6,618.28 MCM and CSI remains 1.045. These findings show that operational risk shifts from deficit toward surplus and spill under extreme climate conditions. Land-use change is therefore better used as a risk-aware state and reward modifier in PPO-RISK than as a direct inflow correction factor.

Keywords: climate change; land-use change; PPO-RISK; reinforcement learning; reservoir operation; Solo Valley. 8/6.7.2026 FINAL.

RESUME

Le système d'irrigation et de la maîtrise des inondations de la vallée de Heritage Solo (Heritage Solo Valley) constitue une infrastructure hydraulique stratégique dans le bassin du Bengawan Solo, en Indonésie. Il fournit l'irrigation à environ 62 000 ha de terres agricoles grâce à un canal principal d'environ 191 km et 23 canaux secondaires totalisant environ 117 km. Le changement climatique, le changement d'usage des sols en amont et le débit non stationnaire de l'influx d'eau ont réduit la fiabilité des règlements d'exploitation fixes (réservoir et canaux) pour équilibrer l'approvisionnement en irrigation et la maîtrise des crues. Cet article présente un cadre d'exploitation de réservoir basé sur l'apprentissage par renforcement, appliqué au système de la vallée de Heritage Solo et au bassin versant de Karangnongko.

1 Universitas Islam Sultan Agung, Semarang, Indonesia, E-mail: wahyudi@unissula.ac.id
2 Bojonegoro University, Bojonegoro, Indonesia, E-mail: admin@unigoro.ac.id
3 VIA University College, Horsens, Denmark, E-mail: THRA@via.dk

Le cadre intègre la simulation de l'influx GR4J, les scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5, l'évaluation stochastique basée sur Monte Carlo, l'analyse de l'usage des sols par satellite pour 2017-2025, ainsi que les tests comparatifs des politiques d'exploitation STATIC, DYNAMIC, PPO et PPO-RISK. L'analyse de l'usage des sols montre une expansion des zones de peuplement de 29,025% à 33,554%, un déclin des arbustes/prairies de 12,562% à 6,260% et une augmentation de l'indicateur du coefficient ruissellement de 0,424 à 0,443. Cependant, le changement d'usage des sols exerce une influence limitée sur l'influx annuel moyen de GR4J par rapport aux précipitations et à l'évapotranspiration potentielle. Le modèle basé uniquement sur les données climatique explique déjà l'influx annuel moyen avec R2 = 0,998, tandis que l'intégration du climat + de l'usage des sols/de la couverture terrestre (LULC) augmente légèrement cette valeur à R2 = 0,999. Le modèle LULC ajoute plus d'informations concernant l'influx maximal, où R2 augmente de 0,105 à 0,254. Dans le scénario RCP4.5, le PPO réduit le déficit de 92,3%, les déversements de 79,7% et l'indice de stress climatique de 86,0% par rapport à l'exploitation STATIC. Dans le scénario RCP8.5, le PPO-RISK augmente la fiabilité à 0,988 et réduit le déficit à 61,72 MCM, bien que le déversement reste 6 618,28 MCM et le CSI reste 1,045. Ces résultats montrent que, dans des conditions climatiques extrêmes, le risque opérationnel passe d'une situation de déficit vers une situation d'excédent et de déversement. Par conséquent, il est plus pertinent d'intégrer le changement d'usage des sols dans PPO-RISK comme un état conscient du danger et modificateur de la récompense, plutôt que comme un facteur de correction direct d'influx.

Mots-clés : Changement climatique; Changement d'usage des sols; PPO-RISK; apprentissage par renforcement; Exploitation du réservoir; Vallée du Solo.

CLIMATE-RESILIENT WATER INFRASTRUCTURES FOR SUSTAINABLE FOOD, LAND, AND WATER SYSTEMS IN INDIA

INFRASTRUCTURES HYDRAULIQUES RÉSISTANTES AU CLIMAT POUR DES SYSTÈMES ALIMENTAIRES, FONCIERS ET HYDRAULIQUES DURABLES EN INDE

Sharad Jain[1], Alok Sikka[2] , Mohammad Faiz Alam[2], and Giriraj Amarnath[3]

ABSTRACT

Climate change is intensifying hydrological variability across the Global South, particularly in India, where agriculture, livelihoods, and economic systems remain highly dependent on climate-sensitive water resources. Increasing frequencies of floods, droughts, heatwaves, and compound extreme events are placing unprecedented stress on water infrastructure systems, including dams, irrigation canals, pipelines, reservoirs, urban drainage systems, and hydropower facilities. Existing infrastructure is increasingly unable to cope with changing climatic conditions because many systems were designed using historical hydrological assumptions that no longer reflect future climate realities.

This paper examines the concept of climate-resilient water infrastructure (CRWI) and evaluates its relevance for sustainable food, water, and energy systems in India. The study reviews major climate-induced risks affecting water infrastructure, explores resilience concepts and measurement approaches, and discusses institutional, technological, ecological, and governance pathways for enhancing resilience.Emphasis is placed on irrigation systems, flood management structures, urban water infrastructure, nature-based solutions (NbS), and Managed Aquifer Recharge (MAR) for enhanced resilience. Nature-based Solutions (NbS) together with grey infrastructures are found to provide robust solutions, particularly in management of climatic extremes. Water demand management interventions including efficient water use management, are equally important for climate resilient water systems besides robust supply side interventions.

The paper also highlights policy interventions, integrated water resources management (IWRM), adaptive real-time management systems, and institutional reforms necessary for strengthening climate resilience. It is necessary to plan and upscale such strategies in partnership with potential stakeholders including farmers and NGOs. The study concludes that climate resilience must become an integral component of future infrastructure planning and management in India, requiring coordinated investments in governance, innovation, ecological restoration, and adaptive management.

Keywords: Climate resilience, water infrastructure, irrigation, adaptation, India, nature-based solutions, water governance, climate change.

RESUME

Le changement climatique donne lieu à l'intensification de la variabilité hydrologique dans les pays du Sud, en particulier en Inde, où l'agriculture, les moyens de subsistance et les systèmes économiques restent fortement dépendants des ressources en eau sensibles aux effets du climat. La fréquence accrue des inondations, des sécheresses, des vagues de chaleur et des

1 Indian Institute of Technology, Gandhi Nagar, India
2 International Water Management Institute, New Delhi, India
3 International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka

événements extrêmes composés exerce une pression sans précédent sur les infrastructures hydrauliques, notamment les barrages, les canaux d'irrigation, les pipelines, les réservoirs, les systèmes de drainage urbain et les installations hydroélectriques. Les infrastructures existantes sont de plus en plus incapables de faire face à l'évolution des conditions climatiques parce que de nombreux systèmes ont été conçus sur la base d'hypothèses hydrologiques historiques qui ne reflètent plus les réalités climatiques futures.

Cet article examine le concept d'infrastructure hydraulique résistante au climat (CRWI) et étudie sa pertinence pour les systèmes alimentaires, hydrauliques et énergétiques durables en Inde. L'étude passe en revue les principaux risques induits par le climat qui affectent les infrastructures hydrauliques, explore les concepts de résistance et les approches de mesure, et discute des voies institutionnelles, technologiques, écologiques et de gouvernance pour renforcer la résistance.

L'accent est mis sur les systèmes d'irrigation, les ouvrages de gestion des inondations, les infrastructures hydrauliques urbaines, les solutions fondées sur la nature (NbS) et la recharge gérée des aquifères (MAR) pour renforcer la résistance. Les solutions basées sur la nature (NbS) ainsi que les infrastructures grises fournissent des solutions robustes, en particulier dans la gestion des phénomènes climatiques extrêmes. Les interventions de gestion de la demande en eau, y compris la gestion efficace de l'utilisation de l'eau, sont tout aussi importantes pour des systèmes d'eau résistants au climat que les interventions robustes du côté de l'offre.

Le document souligne également les interventions politiques, la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE), les systèmes de gestion adaptative en temps réel et les réformes institutionnelles nécessaires pour renforcer la résistance au climat. Il est impératif de planifier et de déployer ces stratégies à plus grande échelle en partenariat avec les parties prenantes potentielles, y compris les agriculteurs et les ONG. En fin, l'étude constate la résistance au climat doit devenir une composante à part entière de la planification et de la gestion des infrastructures futures en Inde, nécessitant des investissements coordonnés dans la gouvernance, l'innovation, la restauration écologique et la gestion adaptative.

Mots-clés : Résistance au climat; Infrastructures hydrauliques; Irrigation; Adaptation; Inde; Solutions fondées sur la nature; Gouvernance de l›eau; Changement climatique.

SUBIRRIGATION AS CLIMATE-ADAPTATION TOOL: PROCESS-BASED ASSESSMENT USING FLUSH MODEL IN NORDIC CONDITIONS

L'IRRIGATION SOUTERRAINE COMME OUTIL D'ADAPTATION AU CLIMAT: ÉVALUATION BASÉE SUR LES PROCESSUS À L'AIDE DU MODÈLE FLUSH DANS LES CONDITIONS NORDIQUES

Joy Bhattacharjee[1*], Ali Raza[2], Heidi Salo[3], Minna Mäkelä[4], Harri Koivusalo[5]

ABSTRACT

Climate change is intensifying hydroclimatic variability in Nordic regions, with more excess water during snowmelt and heavier rainfall interspersed with dry growing seasons. Conventional subsurface drainage (CV) in northern Finland, designed for rapid dewatering, effectively controls excess water but often exports water that could sustain crops later in the season. Controlled drainage (CD) and controlled drainage with subirrigation (CD-SI) convert drainage networks into active water-regulation systems. By retaining and redistributing water through subsurface drains, they stabilize GW levels, enhance soil moisture buffering, strengthen soil-plant-atmosphere coupling and reduce drainage losses. To quantify these benefits under current and future climates, we extended the two-dimensional FLUSH hydrological model with a new subirrigation routine and simulated CD-SI for a flat field in northern Finland. Forcing data were derived from downscaled, bias-corrected CMIP6 projections from the EC-Earth3 model from Google Earth Engine (SSP-245 and SSP-585) and processed to hourly meteorological inputs. We found that at the end of the century (SSP5-8.5) there will be a wetter growing season, with cumulative precipitation exceeding the historical (450–500 mm) and the drier baseline (400-450 mm). Subirrigation demand will be reduced, with most seasons requiring 20-30 mm additional water. Evapotranspiration rises slightly, while drain discharge becomes more frequent in the late season. Groundwater stays near the surface longer in spring with more variable late-summer declines, especially under SSP5-8.5. These shifts imply that future management should focus less on meeting average supplemental water needs and more on the timing and partitioning of water. Adaptive CD-SI strategies combined with on-field storage can retain spring water, temper peak discharges and buffer late-season shortages. Overall, CD-SI remains a viable adaptation, with the greatest benefits achieved by targeting event-scale variability rather than relying on static seasonal rules.

Keywords: Hydroclimatic variability; hydroclimatic variability; meteorological inputs; subsurface drains; Evapotranspiration.

RESUME

Le changement climatique intensifie la variabilité hydroclimatique dans les régions nordiques, avec plus d'eau excédentaire pendant la fonte des neiges et les précipitations plus intenses entrecoupées de saisons de croissance sèches. Le drainage souterrain conventionnel (CV) pratiqué au nord de la Finlande, conçu pour un assèchement rapide, dirige efficacement l'eau excédentaire mais évacue souvent de l'eau qui pourrait nourrir les cultures plus tard dans la saison. Le drainage contrôlé (CD) et le drainage contrôlé avec l'irrigation souterraine (CD-SI)

1 Department of Built Environment, School of Engineering, Aalto University, Espoo, Finland Email: joy.bhattacharjee@aalto.fi
2 Department of Built Environment, School of Engineering, Aalto University, Espoo, Finland
3 Department of Built Environment, School of Engineering, Aalto University, Espoo, Finland
4 Finnish Field Drainage Association, Helsinki, Finland
5 Department of Built Environment, School of Engineering, Aalto University, Espoo, Finland

transforment les réseaux de drainage en systèmes actifs de régulation de l'eau. En retenant et en redistribuant l'eau à travers les drains souterrains, ils stabilisent les niveaux de la nappe phréatique, rehaussent la capacité tampon de l'humidité du sol, renforcent le couplage sol-plante-atmosphère et réduisent les pertes par drainage. Afin de quantifier ces bénéfices dans le cadre des conditions climatiques actuelles et futures, nous avons étendu le modèle hydrologique bidimensionnel FLUSH avec une nouvelle routine d'irrigation souterraine et simulé le CD-SI sur une parcelle plate au nord de la Finlande. Les données de forçage ont été dérivées des projections CMIP6 à échelle réduite et corrigées des biais issues du modèle EC-Earth3 de Google Earth Engine (SSP-245 et SSP-585), puis traitées pour obtenir des données météorologiques horaires. Nous avons constaté qu'à la fin du siècle (SSP5-8,5), il restera la saison de croissance plus humide, avec des précipitations cumulées dépassant les valeurs historiques (450–500 mm) et le scénario de référence plus sec (400–450 mm).

Les besoins en irrigation souterraine seront réduits, la plupart des saisons ne nécessitant que 20 à 30 mm d'eau supplémentaire. L'évapotranspiration augmentera légèrement, tandis que les écoulements de drainage deviendront plus fréquents à la fin de saison. Au printemps, la nappe phréatique restera plus longtemps proche de la surface, avec des baisses de niveau plus variables à la fin de l'été, en particulier dans le scénario SSP5-8.5. Ces évolutions impliquent que dans l'avenir la gestion devrait moins se concentrer sur la satisfaction des besoins moyens en eau d'appoint et davantage sur le calendrier et la répartition de l'eau. Des stratégies adaptatives de CD-SI combinées à un stockage d'eau sur le terrain permettraient de retenir l'eau au printemps, d'atténuer les débits de pointe et de compenser les déficits hydriques à la fin de saison. Dans l'ensemble, le CD-SI demeure une stratégie d'adaptation viable, dont les avantages les plus importants sont obtenus en ciblant la variabilité à l'échelle des événements plutôt qu'en s'appuyant sur des règles saisonnières statiques.

Mots-clés: Variabilité hydroclimatique; Données météorologiques; Drains souterrains; Evapotranspiration.

HYDROLOGICAL EFFECTS OF FARMLAND DRAINAGE IN THE HUAIBEI PLAIN: AN EXPERIMENTAL STUDY

EFFETS HYDROLOGIQUES DU DRAINAGE AGRICOLE SUR LA PLAINE DE HUAIBEI : UNE ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Gu Nan[1], Wang Guoqing[2*], Liu Cuishan[3], He Yupu[4], Zhang Wei[5], Qi Wei[6]

ABSTRACT

The Huaibei Plain is a typical area frequently affected by drought and waterlogging in China. As key engineering infrastructure, farmland drainage systems play a vital role in regulating regional hydrological processes and safeguarding stable agricultural production. Combining long-term field monitoring data from 1963 to 2024 and investigations at 20 representative drainage experimental sites across the Huaibei Plain, this study systematically evaluates the impacts of farmland drainage works on groundwater dynamics, soil water recession and regional hydrological characteristics through zonal experiments and comparative analysis. The effective influence range of drainage ditches on groundwater, the applicability of diverse drainage standards, and regional differentiated layouts of ditch networks are quantitatively clarified.

The results reveal that the unilateral influence scope of drainage ditches on the water table extends beyond 250 m, with the most remarkable variations in groundwater hydraulic gradients occurring within this distance. The current drainage system complies with the requirement for 5-year return period storms, which requires the water table to drop to 0.5 m below ground surface within four to five days. However, farmlands in the central-southern part are exposed to prominent waterlogging hazards when encountering extreme storms with a return period of 10 years or longer. Three dominant drainage layout patterns have been established locally, namely deep-sparse, shallow-dense, and deep moisture-conserving furrow composite, corresponding to earthwork volumes of approximately 100,000 m³/km², 60,000 m³/km² and 55,000 m³/km².

Accordingly, differentiated ditch network designs are put forward: the central-southern region adopts the three-ditch waterlogging control plus field ditch subsurface control (3-waterlogging-2-subsurface) pattern, whereas the northern region employs the 3-waterlogging-1-subsurface pattern with integrated drainage and storage functions. This study's conclusions can provide theoretical basis and practical engineering guidance for optimizing farmland drainage systems, implementing integrated waterlogging management, and promoting the sustainable use of water and soil resources in the Huaibei Plain.

Keywords: Huaibei Plain; farmland drainage; waterlogging and subsurface control; groundwater recession; ditch network layout.

[1] Senior Engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, Email:nanguskrskr@163.com

[2] Professor-level Senior Engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, Email:gqwang@nhri.cn, corresponding author

[3] Professor-level Senior Engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, Email:csliu@nhri.cn

[4] Professor-level Senior Engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, Email:heyupu28@163.com

[5] Senior Engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, Email:zhangwei@nhri.cn

[6] Senior Engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, Email:wqi@nhri.cn

RESUME

La plaine de Huaibei est une région typique fréquemment touchée par la sécheresse et l'engorgement des sols en Chine. En tant qu'infrastructure d'ingénierie clé, les systèmes de drainage agricole jouent un rôle essentiel dans la régulation des processus hydrologiques régionaux et dans la préservation d'une production agricole stable. En combinant des données de surveillance de terrain à long terme recueillies de 1963 à 2024 et des enquêtes menées sur 20 sites expérimentaux représentatifs du drainage dans la plaine de Huaibei, cette étude évalue systématiquement les impacts des travaux de drainage agricole sur la dynamique des eaux souterraines, la décrue de la teneur en eau du sol et les caractéristiques hydrologiques régionales grâce à des expériences zonales et une analyse comparative. L'étude précise quantitativement la portée effective de l'influence des fossés de drainage sur les eaux souterraines, l'applicabilité de diverses normes de drainage et les plans différenciés des réseaux de fossés à l'échelle régionale. Les résultats révèlent que la portée de l'influence unilatérale des fossés sur la surface de la nappe phréatique s'étend au-delà de 250 m, avec les variations les plus remarquables des gradients hydrauliques des eaux souterraines se produisant à cette distance. Le système de drainage actuel est conforme à l'exigence relative aux tempêtes avec une période de retour de 5 ans, exigeant la descente de la nappe phréatique à 0,5 m sous la surface du sol en délai de quatre à cinq jours. Cependant, les terres agricoles de la partie centrale méridionale sont exposées à des risques importants d'engorgement lorsqu'elles rencontrent des tempêtes extrêmes avec une période de retour de 10 ans ou plus. Trois plans de drainage dominants ont été établis localement, à savoir un composite de sillons «profond et clairsemés», «peu profonds et denses», et «profonds et conservant l'humidité», correspondant à des volumes de terrassement d'environ 100 000 m³/km², 60 000 m³/km²et 55 000 m³/km². En conséquence, des conceptions de réseaux de fossés différenciées sont mises en avant : la région centrale méridionale adopte le modèle de contrôle de l'engorgement dans les trois fossés ainsi que celui du contrôle souterrain des fossés de terrain (3-engorgement-2-souterrain), tandis que la région du nord utilise le modèle de 3- engorgement -1- souterrain avec des fonctions intégrées de drainage et de stockage. Les conclusions de cette étude peuvent fournir une base théorique et des conseils d'ingénierie pratique pour optimiser les systèmes de drainage agricole, mettre en œuvre une gestion intégrée de l'engorgement et promouvoir l'utilisation durable des ressources en eau et en sol dans la plaine de Huaibei.

Mots-clés : Plaine de Huaibei; Drainage agricole; Contrôle de l'engorgement et du niveau souterrain; décrue de la surface de la nappe phréatique; Plan du réseau de fossés.

DYNAMIC CONTROL OF SUBSURFACE DRAINAGE DURING WHEAT-GROWING PERIOD UNDER ROTATED RICE-WHEAT FIELD

CONTRÔLE DYNAMIQUE DU DRAINAGE SOUTERRAIN PENDANT LA PÉRIODE DE CROISSANCE DU BLÉ DANS UN CHAMP DE RIZ-BLÉ EN ROTATION

Yuan Tao[1], Haorui Chen[2], Boyu Mi[3] and Xiaoyan Guan[4]

ABSTRACT

Rice-wheat rotation is a main agricultural production system in the Yangtze River Basin of China. To better improve subsurface drainage management in rice-wheat rotation field, the control height of subsurface drainage is a crucial parameter. The setting of the control height needs to fully consider multiple objectives of crop requirements, waterlogging disasters, and drainage pollution. This paper proposes a multi-objective optimization method using HYDRUS-2D coupled with Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 (SPEA2). Dynamic drainage control heights were investigated across tn representative years, including three dry, three normal, three wet, and one extremely wet year. Taking the case of subsurface drainage ine Gaoyou Irrigation District as example, dynamic control heights of subsurface drainage for ten representative years among 1956~2017 were studied. The results indicated that the determination of control height for subsurface drainage is influenced by the hydrological year type, as well as by rainfall conditions during each growth stage. In wet years, the controlled drainage height during the paddy drying period is set to 0 cm; for wheat, the control heights during the sowing and emergence stage, tillering stage, jointing stage, booting and heading stage, milking stage, and yellow ripening stage are set to 46 cm, 43 cm, 37 cm, 0 cm, 49 cm, and 23 cm, respectively. In normal years, the controlled drainage height during the paddy drying period is set to 38 cm; for wheat, the control heights are set to 50 cm, 42 cm, 20 cm, 41 cm, 43 cm, and 37 cm in sequence, respectively. In dry years, the controlled drainage height during the paddy drying period is set to 7 cm; for wheat, the control heights are set to 46 cm, 13 cm, 34 cm, 40 cm, 5 cm, and 14 cm in sequence.

Keywords: Rica- wheat rotation; agricultural production system; controlled drainage; subsurface drainage; paddy drying period.

RESUME

La rotation riz-blé est l'un des principaux systèmes de production agricole dans le bassin versant de Yangtze en Chine. Pour optimiser la gestion du drainage souterrain dans les parcelles pratiquant cette rotation, la hauteur de contrôle du drainage est un paramètre crucial. Le réglage de la hauteur de contrôle doit pleinement prendre en compte les multiples objectifs liés aux besoins des cultures, aux catastrophes liées à l'engorgement et à la pollution du drainage. Cet article propose une méthode d'optimisation à objectifs multiples utilisant HYDRUS-2D couplée à l'algorithme évolutif de Pareto fort 2 (SPEA2). Les hauteurs de contrôle du drainage dynamique ont été étudiées sur dix années représentatives, dont trois années sèches, trois normales, trois humides et une extrêmement humide. En tenant en

1 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, China, Email: taoyuanss.good@163.com

2 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, China, Email: chenhr@iwhr.com

3 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, China, Email: miboyu@yeah.net

4 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, China, Email: guanxy@iwhr.com

compte le cas du drainage souterrain du périmètre irrigué de Gaoyou comme exemple, on a étudié les hauteurs de contrôle dynamiques du drainage souterrain pendant dix années représentatives entre la période 1956 et 2017. Les résultats indiquent que la détermination de la hauteur de contrôle du drainage souterrain dépend du type d'année hydrologique ainsi que des conditions pluviométriques à chaque stade de développement. Lors des années humides, la hauteur de drainage contrôlée durant la période de séchage du paddy est fixée à 0 cm; pour le blé, les hauteurs de contrôle durant la période de semis-levée, de tallage, de tige articulée, d'ébauchage et d'étêtage, de stade laiteux et de jaunissement sont fixées à 46 cm, 43 cm, 37 cm, 0 cm, 49 cm et 23 cm respectivement. Dans les années normales, la hauteur de drainage contrôlée pendant la période de séchage du paddy est fixée à 38 cm; pour le blé, les hauteurs de contrôle sont fixées successivement à 50 cm, 42 cm, 20 cm, 41 cm, 43 cm et 37 cm en séquence, respectivement. Pendant les années sèches, la hauteur de drainage contrôlée pendant la période de séchage du paddy est fixée à 7 cm; pour le blé, les hauteurs de contrôle sont fixées successivement à 46 cm, 13 cm, 34 cm, 40 cm, 5 cm et 14 cm.

Mots-clés : Rotation riz-blé; Système de production agricole; Drainage contrôlé; Drainage souterrain; Période de séchage du paddy.

USING THE RECLAMATION REGIME EQUATION TO SAVE IRRIGATION WATER

UTILISATION DE L'ÉQUATION DU RÉGIME DE MISE EN VALEUR POUR ÉCONOMISER L'EAU D'IRRIGATION

V. Shabanov[1], I. Bondarik[2]

ABSTRACT

Water conservation issues are very relevant in times of climate change. Despite the huge amount of water resources in Russia, water conservation during irrigation has always been given great attention. [1] In order to optimize the distribution of water during the growing season, a mathematical model was developed that allowed us to obtain an analytical dependence of the relative productivity on the irrigation rate. This allows, when optimizing the irrigation regime, to reduce the irrigation rate almost twice, and the yield, at the same time, decreased only by 10-15%. [2]However, at present, when the technical accuracy of irrigation has been improved and the neural network technologies has become possible to use, these opportunities can be expanded.

According to forecasts of the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, the south of Europe, the East of the USA and the South of Russia are threatened by decrease in surface runoff, so additional opportunities for integrated improvement regulation could be used for irrigation.

The paper considers new methodological approaches that make it possible to differentially assess the accuracy of complex land reclamation regulation based on a mathematical model of the land reclamation regime. "Reclamation regime", applied to agricultural land, is a set of requirements for controlled factors of soil formation, plant growth and environmental impacts, which must be provided by a system of reclamation measures to achieve the goal. [3]

The reclamation regime is described by a system of equations, the parameters of which vary over time, depending on the ecotype of the plant and the environmental factor. They are quasi-bell-shaped and can be asymmetrical with respect to the central axis. [4]

But, despite the wide variety of curves, several reclamation management zones are steadily formed inside the "dome". The first zone is the optimal level of productivity from 1.0 to 0.8. The second zone is critical, the level of productivity is from 0.8 to 0.3 (0.5). The third zone is a survival zone with a productivity level from 0.3 to 0.

Each zone has two characteristics. The first characteristic is the level of productivity that is provided by being in this zone. The second characteristic is the level of control accuracy that is necessary to stay in this zone. At each level of productivity, on a given zone may require a different amount of resource, such as water or fertilizer. In particular, for some crops, the optimal range will be narrow (high-yielding crops), for some it will be wider ("natural" varieties). Depending on the phenotype of the agricultural crop, different asymmetries of the reclamation regime curve are possible:

The optimal range width determines the critical control accuracy and may show itself in different ways in different zones. If we estimate critical accuracy as a change in productivity per unit (fraction) of environmental factors, then in the second zone, the slightest change in the value of the factor leads to a significant decrease of productivity.

1 Russian State Agrarian University., Problem Laboratory, Moscow., Russian Federation,
2 Federal Research Centre for Hydraulic Engineering and land reclamation, Ecosystem water use, Moscow, Russian Federation

Thus, the “optimal” range of environmental factor control lies to the left of the” maximum “ point of productivity and is substantially narrow as it is given in regulatory documents (approximately twice), but at the same time it has a “minimal control error”, since it uses the natural potential of plant self-regulation. Using this approach could be a guarantee of stretch resource at a given level of productivity.

Moreover, determining the width of optimal conditions zone, based on the reclamation regime equation, guarantees not only to maximize the resource potential ability of plant self-regulation, but also reduces the impact of regulatory errors to the crop yield. [5]

Keywords : Water conservation; mathematical model; environmental factor; environmental factor; level of productivity.

RESUME

Les préoccupations de conservation de l’eau sont très pertinentes en période de changement climatique. Malgré l’abondance des ressources en eau en Russie, la question de conservation de l’eau pendant l’irrigation a toujours fait l’objet d’une attention particulière. [1]

Afin d’optimiser la distribution de l’eau pendant la saison de croissance, un modèle mathématique a été développé qui nous a permis d’obtenir une dépendance analytique de la productivité relative au taux d’irrigation. Cela permet, lors de l’optimisation du régime d’irrigation, de réduire le taux d’irrigation de près de moitié, et le rendement, dans le même temps, n’a diminué que de 10-15%. [2]Cependant, à l’heure actuelle, lorsque la précision technique de l’irrigation a été améliorée et que les technologies des réseaux neuronaux sont devenues utilisables, ces possibilités peuvent être élargies.

Selon les prévisions faites par l’Institut des problèmes de l’eau de l’Académie russe des sciences, le sud de l’Europe, l’est des États-Unis et le sud de la Russie sont menacés par une diminution du ruissellement de surface, de sorte que des opportunités supplémentaires de régulation d’amélioration intégrée pourraient être utilisées pour l’irrigation.

L’article examine de nouvelles approches méthodologiques qui permettent d’évaluer de manière différentielle la précision de la régulation complexe de mise en valeur des terres sur la base d’un modèle mathématique du régime de mise en valeur des terres. Le «régime de mise en valeur», appliqué aux terres agricoles, est un ensemble d’exigences relatives à des facteurs contrôlés de la formation du sol, de la croissance des plantes et des impacts environnementaux, qui doivent être fournis par un système de mesures de mise en valeur pour atteindre l’objectif. [3]

Le régime de mise en valeur est décrit par un système d’équations dont les paramètres varient dans le temps, en fonction de l’écotype de la plante et du facteur environnemental. Ces paramètres sont quasi-en forme de cloche et peuvent être asymétriques par rapport à l’axe central. [4]Cependant, malgré la grande variété de courbes, plusieurs zones de gestion de mise en valeur se forment régulièrement à l’intérieur du «dôme».

La première zone est le niveau optimal de productivité de 1,0 à 0,8. La deuxième zone est critique, le niveau de productivité est de 0,8 à 0,3 (0,5). La troisième zone est une zone de survie avec un niveau de productivité de 0,3 à 0.Chaque zone a deux caractéristiques. La première caractéristique est le niveau de productivité qui est fourni en se situant dans cette zone. La deuxième caractéristique est le niveau de précision du contrôle nécessaire pour rester dans cette zone.

À chaque niveau de productivité, une zone donnée peut nécessiter une quantité différente de ressources, telles que l’eau ou les engrais. En particulier, pour certaines cultures, la gamme optimale sera étroite (cultures à haut rendement), tandis que pour d›autres, elle sera plus

large (variétés «naturelles»).Selon le phénotype de la culture agricole, différentes asymétries de la courbe du régime de mise en valeur sont possibles :

La largeur de gamme optimale détermine la précision critique du contrôle et peut se manifester de différentes manières dans différentes zones. Si nous estimons la précision critique comme un changement de productivité par unité (fraction) des facteurs environnementaux, alors dans la deuxième zone, le moindre changement dans la valeur du facteur conduit à une diminution significative de la productivité.

Ainsi, la gamme «optimale» de contrôle des facteurs environnementaux se situe à gauche du point de productivité «maximale» et est nettement plus étroite que celle indiquée dans les documents réglementaires (environ deux fois); cependant, elle implique une «erreur de contrôle minimale» car elle tire parti du potentiel naturel d'autorégulation de la plante. Cette approche pourrait garantir une utilisation rationnelle des ressources pour un niveau de productivité donné.

De plus, la détermination de la largeur de la zone des conditions optimales, basée sur l'équation du régime de mise en valeur, garantit non seulement de maximiser la capacité d'autorégulation des plantes en termes de ressources potentielles, mais réduit également l'impact des erreurs réglementaires sur le rendement des cultures. [5]

Mots-clés : Conservation de l'eau; Modèle mathématique; Facteur environnemental; Facteur environnemental; Niveau de productivité.

Q.66.2: At the farm, territorial, sectoral, and food system levels, what are the characteristics of irrigated/drained agroecological systems and the methods for supporting the agroecological transition of irrigated/drained systems?

Aux niveaux de l'exploitation agricole, du territoire, du secteur et du système alimentaire, quelles sont les caractéristiques des systèmes agroécologiques irrigués/drainés ainsi que les méthodes pour soutenir la transition agroécologique des systèmes irrigués/drainés?

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS — **Page No.**

R.66.2.01 **NUTRIENT GOVERNANCE FOR AGRO-ECOLOGICAL TRANSITION UNDER FLORIDA'S STATEWIDE BMP PROGRAM** — 127
GOUVERNANCE DES NUTRIMENTS POUR LA TRANSITION AGRO-ÉCOLOGIQUE DANS LE CADRE DU PROGRAMME DE MEILLEURES PRATIQUES DE GESTION (BMP) DE L'ÉTAT DE FLORIDE
Michael D. Dukes (USA)

R.66.2.02 **WATER-PROFIT DECOUPLING: AGROECOLOGICAL TRANSITION IN CAP BON** — 129
DÉCOUPLAGE EAU-BENEFICE: TRANSITION AGROÉCOLOGIQUE AU CAP BON
Yosr Abid, Cathal O'Donoghue and Mehdi Khouadja (Tunisia)

R.66.2.03 **PAYMENTS FOR ENVIRONMENTAL SERVICES TO SUPPORT AN IRRIGATED AGROECOLOGICAL PRODUCTION: THE CASE OF THE CRAU AQUIFER IN FRANCE** — 131
PAIEMENTS AUX SERVICES ENVIRONNEMENTAUX POUR SOUTENIR LA PRODUCTION AGROÉCOLOGIQUE IRRIGUÉE: LE CAS DE L'AQUIFÈRE DE LA CRAU EN FRANCE
S. Morardet, M. Montginoul, M. Ben Salah, and T. Guérin (France)

R.66.2.04 **A CHARTER FOR FLEXIBLE FRUGAL FLOURISHING IRRIGATION IN A WARMING WORLD** — 133
UNE CHARTE POUR UNE IRRIGATION SOUPLE, ECONOME ET PROSPERE DANS UN MONDE EN RECHAUFFEMENT
Bruce Lankford (UK)

R.66.2.05 **SUPPORTING AGROECOLOGICAL TRANSITIONS IN IRRIGATED FARMING SYSTEMS: PRELIMINARY INSIGHTS FROM A WATER-SCARCE TERRITORY IN SOUTHWESTERN FRANCE** — 134
SOUTENIR LES TRANSITIONS AGROÉCOLOGIQUES DANS LES SYSTÈMES AGRICOLES IRRIGUÉS: PREMIÈRES PERSPECTIVES D'UN TERRITOIRE DÉFICITAIRE EN EAU AU SUD-OUEST DE LA FRANCE
Guichet Eva, Alletto Lionel, Audouin Elise, and Leenhardt Delphine (France)

R.66.2.06 **TOWARDS MULTISERVICE IRRIGATION FOR AN AGROECOLOGICAL FUTURE** — 136
VERS UNE IRRIGATION MULTISERVICE POUR UN AVENIR AGROÉCOLOGIQUE
Crystele Leauthaud, and Delphine Leenhardt (France)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS

Page No.

Question 66

R.66.2.07 AGROECOLOGICAL REENGINEERING OF IRRIGATED SCHEMES: FROM THEORY TO CASE STUDIES 138
REORGANISATION AGROÉCOLOGIQUE DES PÉRIMÈTRES IRRIGUÉS: DE LA THÉORIE AUX ÉTUDES DE CAS
N. Urruty , E. Dressayre , C. Hello, J. Lecollinet , S. Sauviat , and B. Vennat (France)

R.66.2.08 LESSONS FROM 20 YEARS OF INWEPF: PADDY IRRIGATION AND DRAINAGE SYSTEMS AS FOUNDATIONS OF AGRO-ECOLOGICAL TRANSITION UNDER CLIMATE CHANGE 140
LEÇONS TIRES DE 20 ANS D'INWEPF: LES SYSTÈMES D'IRRIGATION ET DE DRAINAGE DES RIZIÈRES COMME FONDATION DE LA TRANSITION AGRO-ÉCOLOGIQUE DES RIZIÈRES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE
Keigo Noda. (Japan)

R.66.2.09 ENHANCING AGRICULTURAL DRAINAGE RESILIENCE UNDER CLIMATE CHANGE: A CASE STUDY OF INTEGRATED AND SMART DRAINAGE PUMP STATION MANAGEMENT IN BUYEO COUNTY, KOREA 142
AMÉLIORER LA RÉSISTANCE DU DRAINAGE AGRICOLE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : UNE ÉTUDE DE CAS SUR LA GESTION INTÉGRÉE ET INTELLIGENTE D'UNE STATION DE POMPAGE DANS LE COMTÉ DE BUYEO, CORÉE
Kwangya Lee, Yongju Moon, Jukyoung Park, Changkun Shin, Hernwook Lim, Seungjin Maeng, Dongho Jo, Yongjae Lee, and Hyunuk An (Korea)

R.66.2.10 CHARACTERISTICS AND VALUE ANALYSIS OF ANCIENT WEIR PROJECTS 144
CARACTÉRISTIQUES ET ANALYSE DE LA VALEUR DES ANCIENS PROJETS DE DEVERSOIR
Lihui Gao, Bing Li (China)

R.66.2.11 CONTROLLED DRAINAGE AND SUBIRRIGATION FOR AGRO ECOLOGICAL TRANSITION AND CLIMATE RESILIENCE IN BOREAL AGRICULTURE 146
DRAINAGE CONTRÔLÉ ET IRRIGATION SOUTERRAINE POUR LA TRANSITION AGROÉCOLOGIQUE ET LA RÉSISTANCE AU CLIMAT EN AGRICULTURE BORÉALE
Mäkelä M., Myllys M., Nurminen J., and Häggblom O. (Finland)

R.66.2.12 EXPLORING THE RELASHIONSHIPS BEWEEN IRRIGATION AND AGROECOLOGY IN OCCITANIE (FRANCE): THE EXPERIENCE OF THE TAI-OC PROJECT 148
EXPLORER LES RELATIONS ENTRE IRRIGATION ET AGROECOLOGIE EN OCCITANIE (FRANCE): EXPERIENCE DU PROJET TAI-OC
Leenhardt D., Lhuissier L. (France)

R.66.2.13 AGROECOLOGICAL TRANSITION OF IRRIGATED AND DRAINAGED SYSTEMS IN THE YELLOW RIVER BASIN: MULTI-LEVEL CHARACTERISTICS AND PATHWAYS 150
TRANSITION AGROÉCOLOGIQUE DES SYSTÈMES IRRIGUÉS ET DRAINÉS DANS LE BASSIN VERSANT DE JAUNE: CARACTÉRISTIQUES MULTI-NIVEAUX ET TRAJECTOIRES
Jianxin Mu, and Shahbaz Khan (China)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.66.2.14 **HISTORICAL EVOLUTION OF IRRIGATION AND DRAINAGE SYSTEMS IN WORLD IRRIGATION ENGINEERING HERITAGE AND PATHS FOR ENHANCING CONTEMPORARY AGRICULTURAL ECOLOGICAL RESILIENCE** **152**
ÉVOLUTION HISTORIQUE DES SYSTÈMES D'IRRIGATION ET DE DRAINAGE DANS LE PATRIMOINE MONDIAL DU GÉNIE D'IRRIGATION ET VOIES POUR RENFORCER LA RÉSISTANCE ÉCOLOGIQUE AGRICOLE CONTEMPORAINE
Jun Deng, Jiangang Liu (China)

R.66.2.15 **INTEGRATING AGROECOLOGY AND CROP MODELING FOR CLIMATE RESILIENT WATER MANAGEMENT** **154**
INTÉGRATION DE L'AGROÉCOLOGIE ET DE LA MODÉLISATION DES CULTURES POUR UNE GESTION DE L'EAU RÉSISTANTE AU CLIMAT
Paul Abudulai Yelinje, Tsu-Chuan Lee and Su-Chin Chen (Taiwan)

R.66.2.16 **AGROECOLOGY AND IRRIGATION IN AFRICA: SYNERGIES FOR SUSTAINABLE AND CLIMATE-RESILIENT FOOD SYSTEMS** **156**
AGROÉCOLOGIE ET IRRIGATION EN AFRIQUE: SYNERGIES ENTRE DES SYSTÈMES ALIMENTAIRES DURABLES ET RESISTANTS AU CLIMAT
S. Walker and J.J. Anderson (South Africa)

R.66.2.17 **ROLES AND USES OF WATER IN SUSTAINABLE FOOD SYSTEMS: A CASE STUDY OF UNIVERSITY FARMS IN CALIFORNIA** **158**
RÔLES ET USAGES DE L'EAU DANS LES SYSTÈMES ALIMENTAIRES DURABLES: ÉTUDE DE CAS DES FERMES UNIVERSITAIRES EN CALIFORNIE
C. Leauthaud, M. Frimat, H. Lamouchi, G. Ingersoll1, L. Auger, and D. Leenhardt (USA)

R.66.2.18 **IMPACT EVALUATION OF AGRICULTURAL ENVIRONMENT CONSERVATION PROGRAM (AECP) USING WATER-FOOD-ENERGY NEXUS PLATFORM (NEWS) IN KOREA** **160**
ÉVALUATION DE L'IMPACT DU PROGRAMME DE CONSERVATION DE L'ENVIRONNEMENT AGRICOLE (AECP) À L'AIDE DE LA PLATEFORME «LIENS ENTRE EAU-ALIMENTATIONF-ENERGIE» (NEWS) EN CORÉE
Jin-Yong Choi, Pureun Yoon, Maga Kim, Seungoh Hur, and Jeongwoo Son (Republic of Korea)

R.66.2.19 **ECONOMIC AND SOCIAL IMPACTS OF CHANGED WATER USE BEHAVIOUR OF COMMERCIAL WHEAT FARMERS IRRIGATORS TOWARDS CLIMATE VARIABILITY IN SOUTH AFRICA** **163**
IMPACT ÉCONOMIQUE ET SOCIAL DE L'ÉVOLUTION DES COMPORTEMENTS EN MATIÈRE D'UTILISATION DE L'EAU CHEZ LES PRODUCTEURS DE BLÉ COMMERCIAUX IRRIGANTS FACE À LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE EN AFRIQUE DU SUD
Yonas T. Bahta, Markus Monteiro and Henry Jordaan (South Africa)

R.66.2.20 **A NEW GUIDE ON CONTROLLED DRAINAGE: IMPROVING WATER MANAGEMENT, CROP PRODUCTIVITY AND ENVIRONMENTAL OUTCOMES IN BOREAL AGRICULTURE** **165**
NOUVEAU GUIDE SUR LE DRAINAGE CONTRÔLÉ : AMÉLIORATION DE LA GESTION DE L'EAU, DE LA PRODUCTIVITÉ AGRICOLE ET DES RÉSULTATS ENVIRONNEMENTAUX DANS L'AGRICULTURE BORÉALE
Häggblom, O., Haho, A., Mäkelä M., and Luoma T. (Finland)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.66.2.21 ASALEE, A TOOL FOR CO-DESIGNING WATER RESILIENT CROPPING SYSTEM UNDER CLIMATE CHANGE 167
ASALEE, UN OUTIL DE CO-CONCEPTION DE SYSTÈMES DE CULTURE RÉSILSTANTE À L'EAU FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE
Gendre Sophie., Pasquier D. and Marguerie M. (France)

R.66.2.22 CAN WATER STORAGE FOSTER TERRITORIAL AGROECOLOGICAL TRANSITIONS IN A WATER-STRESSED AREA? 168
EST-CE QUE LE STOCKAGE DE L'EAU PEUT ENCOURAGER LES TRANSITIONS AGROÉCOLOGIQUES TERRITORIALES DANS UNE ZONE SOUMISE À UN STRESS HYDRIQUE?
Hugo Charoud, Marielle Montginoul and Marcel Kuper (France)

R.66.2.23 RETHINKING IRRIGATION AND DRAINAGE MODERNIZATION FOR AGROECOLOGICAL TRANSITIONS UNDER CLIMATE CHANGE: LESSONS FROM LAO PDR 170
REPENSER LA MODERNISATION DE L'IRRIGATION ET DU DRAINAGE POUR LES TRANSITIONS AGROÉCOLOGIQUES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE: LEÇONS TIRÉS DE LA RDP DU LAOS
Matthew Mccartney, Fergus Sinclair, Sarah Freed, Michaela Lo, Thatheva Saphangthong ,Somphasith Douangsavanah and Mark Dubois (Sri Lanka)

R.66.2.24 CLIMATE INFORMATION SERVICES TO AGRO-PASTORALIST SMALLHOLDERS IN UGANDA'S SEMI-ARID CATTLE CORRIDOR 172
SERVICES D'INFORMATION CLIMATIQUE À L'INTENTION DES PETITS EXPLOITANTS AGRO-PASTORAUX DU «COULOIR D'ÉLEVAGE» SÉMI-ARIDE DE L'OUGANDA
Wilson Okaka, Wilberforce Okongo and Joseph Rwothumio (Uganda)

R.66.2.25 CLIMATE-DRIVEN SERVICE RESILIENCE IN PRESSURISED IRRIGATION SYSTEMS 174
RÉSISTANCE DES SERVICES FACE AU CLIMAT DANS LES SYSTÈMES D'IRRIGATION SOUS PRESSION
Ferreira A., Rolim J. and Cameira MR. (Portugal)

R.66.2.26 WHICH IRRIGATION DEVELOPMENT PATHWAYS CAN SUPPORT SUSTAINABLE FARMING? A CAMBODIAN CASE STUDY 176
QUELLES STRATÉGIES DE DÉVELOPPEMENT DE L'IRRIGATION PEUVENT SOUTENIR UNE AGRICULTURE DURABLE? UNE ÉTUDE DE CAS MENEE AU CAMBODGE
Titouan Filloux, Myriam Adam, Florent Tivet, Jean-Philippe Venot, and Phirum Or (France)

R.66.2.27 NUCLEAR WINTER AS THE GREATEST CLIMATE CRISIS FOR HUMANITY AND THE ROLE OF IRRIGATION SCIENTISTS 178
L'HIVER NUCLÉAIRE, LA PLUS GRANDE CRISE CLIMATIQUE POUR L'HUMANITÉ ET LE RÔLE DES SCIENTIFIQUES EN IRRIGATION
Haruyuki Fujimaki (Japan)

R.66.2.28 AGROECOLOGY, IRRIGATION AND INSTITUTIONAL PATHWAYS FOR RESILIENT OASIS AGRICULTURE IN TUNISIA 180
AGROÉCOLOGIE, IRRIGATION ET VOIES INSTITUTIONNELLES POUR UNE AGRICULTURE OASIENNE RÉSISTANTE EN TUNISIE
Dr. Laure-Elise Mayard, Jérémie Hédoin, Dr. Fatma Aribi and Nicolas Courtin (France)

NUTRIENT GOVERNANCE FOR AGRO-ECOLOGICAL TRANSITION UNDER FLORIDA'S STATEWIDE BMP PROGRAM

GOUVERNANCE DES NUTRIMENTS POUR LA TRANSITION AGRO-ÉCOLOGIQUE DANS LE CADRE DU PROGRAMME DE MEILLEURES PRATIQUES DE GESTION (BMP) DE L'ÉTAT DE FLORIDE

Michael D. Dukes[1]

ABSTRACT

Agro-ecological transition in irrigated agricultural systems increasingly depends on institutional capacity to translate diverse and evolving scientific evidence into timely, accountable management decisions. This paper examines the University of Florida Institute of Food and Agricultural Sciences (UF/IFAS) Nutrient Management Program as a legislatively mandated, nutrient governance framework that supports agro-ecological transition through Florida's statewide agricultural Best Management Practices (BMP) program administered by the Florida Department of Agriculture and Consumer Services (FDACS) Office of Agricultural Water Policy (OAWP).

Florida's agricultural BMP program is the primary statewide mechanism for reducing nutrient and water impacts from agriculture while maintaining economic viability. Nutrient application rate recommendations developed by UF/IFAS function as the scientific foundation for nutrient BMPs and play a central role in the effectiveness and credibility of the statewide program. Beginning in 2021, the Florida Legislature directed UF/IFAS to evaluate fertilizer application rates, develop nutrient recommendations, and advance site-specific nutrient management across multiple cropping systems and regions, with biannual reporting requirements to legislative leadership.

Rather than presenting crop-specific fertilizer response results, this paper focuses on the institutional architecture developed to meet legislative mandates while aligning scientific outputs with the operational needs of the FDACS OAWP BMP program. The paper emphasizes adaptive governance, data integration, iterative recommendation development, and the linkage between nutrient recommendations and irrigation-driven nutrient transport processes. A case example involving revised phosphorus recommendations illustrates how interim guidance was developed under uncertainty while maintaining accountability to producers, policymakers, and water quality objectives.

The Florida case demonstrates that agro-ecological transition at territorial scales depends not only on agronomic or technological innovation, but on governance systems capable of aligning science, public policy, irrigation management, and on-farm decision making. The governance mechanisms described here offer transferable insights for regions seeking to operationalize nutrient and water management science within complex regulatory and production environments.

Keywords: Agro-ecological transition; economic viability; data integration; water quality; water management.

RESUME

La transition agroécologique dans les systèmes agricoles irrigués dépend de plus en plus de la capacité institutionnelle à traduire des preuves scientifiques diverses et évolutives en décisions de gestion opportunes et responsables. Cet article étudie le programme de gestion des nutriments de l'Institut des sciences alimentaires et agricoles (UF/IFAS) de l'Université

1 University of Florida IFAS, Gainesville, Florida, USA

de Floride en tant que cadre de gouvernance des nutriments d'ordre législatif. qui soutient la transition agro-écologique grâce aux meilleures pratiques de gestion agricole (BMP) de l'État de Floride, programme administré par le Bureau de la politique des eaux agricoles (OAWP) du Département de l'agriculture et des services aux consommateurs de la Floride (FDACS).

Le programme agricole BMP de la Floride est le principal mécanisme à l'échelle de l'État, chargé de réduire les impacts des nutriments et de l'eau de l'agriculture tout en maintenant la viabilité économique. Les recommandations de l'UF/IFAS relatives au taux d'application des nutriments servent d'une base scientifique aux BMP relatives aux nutriments et jouent un rôle central dans l'efficacité et la crédibilité du programme à l'échelle de l'État. À partir de 2021, la législature de la Floride a chargé l'UF/IFAS d'évaluer les taux d'application des engrais, d'élaborer des recommandations en matière de nutriments et de faire progresser la gestion des nutriments adaptée aux spécificités de chaque site dans plusieurs systèmes de culture et régions, avec des exigences de rapport semestriel aux responsables législatifs.

Plutôt que de présenter des résultats spécifiques à certaines cultures concernant la réponse aux engrais, cet article met l'accent sur l'architecture institutionnelle mise en place pour répondre aux exigences législatives, tout en alignant les résultats scientifiques avec les besoins opérationnels du programme BMP du FDACS-OAWP. L'article met l'accent sur la gouvernance adaptative, l'intégration des données, le développement itératif de recommandations et le lien entre les recommandations faites concernant les nutriments et les processus de transport des nutriments induits par l'irrigation. Une étude de cas portant sur la révision des recommandations relatives au phosphore illustre la manière dont des directives provisoires ont été mises en place dans un contexte d'incertitude, tout en garantissant la responsabilité envers les producteurs et les décideurs politiques tout en respectant des objectifs de qualité de l'eau.

Le cas de la Floride démontre que la transition agro-écologique aux échelles territoriales dépend non seulement de l'innovation agronomique ou technologique, mais aussi de systèmes de gouvernance capables d'harmoniser la science, les politiques publiques, la gestion de l'irrigation et la prise de décision au niveau des exploitations. Les mécanismes de gouvernance décrits ici offrent des perspectives transférables aux régions recherchant à opérationnaliser la science de la gestion des nutriments et de l'eau au sein d'environnements réglementaires et de production complexes.

Mots-clés : Transition agroécologique; Viabilité économique; Intégration des données; Qualité de l'eau; Gestion de l'eau.

WATER-PROFIT DECOUPLING: AGROECOLOGICAL TRANSITION IN CAP BON

DÉCOUPLAGE EAU-BENEFICE: TRANSITION AGROÉCOLOGIQUE AU CAP BON

Yosr Abid[1], Cathal O'Donoghue[2] and Mehdi Khouadja[3]

ABSTRACT

Mediterranean agriculture is reaching a structural threshold under sustained drought. The dominant adaptation responses — improved drip uniformity, mulching, deficit irrigation — concentrate on the efficiency of water application within existing perennial production systems. These responses remain necessary, but where the binding constraint becomes absolute water availability rather than application efficiency, a complementary lever emerges: a *traditional-to-adaptive transition* that replaces a water-intensive value chain with a climate-adapted one. This paper develops a biosystem microsimulation to ask whether, on a documented Mediterranean farm where the established citrus value chain has failed, a transition to an olive–aloe vera value chain managed under agroecological practices — manual weed control, on-farm compost, biocontrol, no synthetic fertiliser — can decouple water demand from long-term profitability while improving environmental outcomes.

The microsimulation is calibrated on a 7-hectare smallholding in Cap Bon, Tunisia, where the orange grove (6 800 m³/ha/yr irrigation demand) failed in 2023 and was replaced in 2025 with an olive–aloe vera intercrop. The model integrates a six-stage pipeline — input, pre-processing, deterministic year-by-year modelling, economic calculation, four-pool carbon accounting, scenario analysis — over 2015–2054, driven by observed climate and CMIP6 SSP2-4.5 projections.

Three convergent paybacks emerge. **Water decoupling is immediate**: whole-farm demand falls 91 percent, and water intensity per unit of revenue falls 72-fold (from 2 900–10 800 to ~41 m³/k€).[1] **Carbon payback occurs in year 5** (2030, +187 t CO_2e cumulative by 2054). **Economic payback occurs in year 9** (2034, +€256k cumulative cash flow over the no-transition counterfactual). The value-chain transition alone — even under conventional management — closes a €388k gap; the agroecological management layer adds a further €244k. Monetary and environmental profitability are achieved together. Economic figures reflect raw aloe leaf sales — a conservative lower bound; downstream gel processing, to be modelled in future work, would raise farm-gate value substantially.

Keywords: traditional-to-adaptive transition; value-chain transition; agroecological transition; water-profit decoupling; biosystem microsimulation; Mediterranean drought; Cap Bon.[1] Original calculations in Tunisian Dinar (TND); EUR figures use a reference exchange rate of 3.4 TND ≈ €1 (rough mid-2025 average).

1 Researcher and Consultant in Innovation and Sustainable Agricultural Systems; Co-Founder, My Aloe Olea, Tunisia. Email: yosr.abid@myaloeolea.bio

2 Professor and Established Chair of Social and Public Policy, University of Galway, Ireland. Email: cathal.odonoghue@universityofgalway.ie

3 Finance Expert and Economic Viability Lead; Co-Founder, My Aloe Olea, Tunisia. Email: mehdi.khouadja@myaloeolea.bio

RESUME

L'agriculture méditerranéenne arrive à un seuil structurel sous l'effet de sécheresses persistantes. Les réponses d'adaptation dominantes — amélioration de l'uniformité goutte-à-goutte, paillage, irrigation déficitaire — se concentrent sur l'efficacité de l'application de l'eau au sein des systèmes de production pérennes existants. Ces réponses restent nécessaires, mais là où la contrainte contraignante devient la disponibilité absolue de l'eau plutôt que son efficacité d'application, un levier complémentaire émerge : une transition vers un modèle adaptatif qui remplace une chaîne de valeur intensive en eau par une chaîne adaptée au climat. Cet article développe une microsimulation de biosystèmes pour demander si, dans une ferme méditerranéenne documentée où la chaîne de valeur des agrumes établie a échoué, une transition vers une chaîne de valeur olive–aloe vera gérée selon des pratiques agroécologiques — contrôle manuel des mauvaises herbes, compost à la ferme, biocontrôle, absence d›engrais de synthèse — permet de dissocier la demande en eau de la rentabilité à long terme, tout en améliorant les résultats environnementaux.

La microsimulation est calibrée sur une petite exploitation de 7 hectares à Cap Bon, en Tunisie, où l'orangeraie (besoin en irrigation de 6 800 m³/ha/an) a échoué en 2023 et a été remplacé en 2025 par une culture mixte d'olive–aloe vera. Le modèle intègre un processus en six étapes — intrants, prétraitement, modélisation déterministe annuelle, calcul économique**,** comptabilité du carbone à quatre réservoirs, analyse de scénarios — couvrant la période de 2015-2054, basé sur les données climatiques observées et les projections CMIP6 SSP2-4.5. Trois retours convergents émergent. Le **découplage de l'eau est immédiat** : la demande globale de l'exploitation agricole chute de 91%, et l'intensité hydrique par unité de revenu tombe de 72 fois (passant de 2 900–10 800 à ~41 m³/k€).[1] La **retour du carbone se trouve en 5ème année** (2030, +187 t CO_2e cumulé d'ici 2054**). Le retour économique survient en 9ème année** (2034, +256 000 € de cash-flow cumulé par rapport au scénario de l'hypothèse sans transition). La transition de la chaîne de valeur à elle seule — même dans le cadre d'une gestion conventionnelle — comble un écart de 388000 €; la couche de gestion agroécologique ajoute 244k € supplémentaires. La rentabilité monétaire et environnementale est réalisée ensemble. Les chiffres économiques reflètent les ventes de feuilles d'aloès brutes — une limite inférieure prudente ; le traitement du gel en aval, à modéliser dans des travaux futurs, augmenterait considérablement la valeur totale à la ferme.

Mots-clés : Transition du modèle traditionnel vers un modèle adaptatif; Transition de la chaîne de valeur; Transition agroécologique; Découplage eau et bénéfice; Microsimulation des biosystèmes; Sécheresse en Méditerranée; Cap Bon. 1 Calculs initiaux en dinars tunisiens (TND); les montants en EUR utilisent un taux de change de référence de 3,4 TND ≈ 1 € (moyenne approximative prévue pour la mi-2025).

PAYMENTS FOR ENVIRONMENTAL SERVICES TO SUPPORT AN IRRIGATED AGROECOLOGICAL PRODUCTION: THE CASE OF THE CRAU AQUIFER IN FRANCE

PAIEMENTS AUX SERVICES ENVIRONNEMENTAUX POUR SOUTENIR LA PRODUCTION AGROÉCOLOGIQUE IRRIGUÉE : LE CAS DE L'AQUIFÈRE DE LA CRAU EN FRANCE

S. Morardet[1], M. Montginoul[1], M. Ben Salah1, T. Guérin[1]

ABSTRACT

The Crau plain, in South-Eastern France, is a unique area where gravity irrigation of hay meadows provides two thirds of the groundwater recharge used for drinking water, industrial and agricultural purposes. In order to preserve this environmental service, the manager of Crau Aquifers (SYMCRAU) set up a pilot program of payment for environmental services (PES) in 2021, involving 26 farmers. Our assessment of this program combines a literature review and semi-structured interviews with beneficiary and non-beneficiary farmers as well as institutional actors. The analysis focused on compliance with PES efficiency and effectiveness criteria, and addressed the specific challenges identified for the application of PES to aquifers. Results reveal that aid is concentrated among the largest farms, calling into question the fairness and efficiency of the scheme. As the PSE aims to support existing practices, the risk of a windfall effect is difficult to rule out and the changes in practices observed remain limited, compromising the additionality criterion. The monitoring based mainly on declarations, and the absence of real sanctions, encouraging opportunistic behavior, weaken the conditionality of the scheme. Recommendations for improving the scheme include a better targeting of beneficiaries, aid allocation criteria better suited to the region, and the use of measurable performance indicators. Local stakeholders are considering various solutions to ensure the sustainability of funding and its extension to a larger number of farmers, either via drinking water bills or via local authorities' contributions to the upgrading of irrigation canals.

Keywords: Gravity irrigation; drinking water; pilot program; stakeholders; irrigation canals.

RESUME

La plaine de la Crau, situé au sud-est de la France, constitue un territoire unique où l'irrigation gravitaire des prairies naturelles fournit les deux tiers de la réalimentation d'eau souterraine utilisée pour l'eau potable, à des fins industrielles et agricoles. Afin de préserver ce service environnemental, le gestionnaire des aquifères de la Crau (SYMCRAU) a mis en place un programme pilote de paiement des services environnementaux (PES) en 2021, impliquant 26 agriculteurs. Notre évaluation de ce programme associe une revue de littérature et des entretiens semi-structurés avec des agriculteurs bénéficiaires et non bénéficiaires ainsi qu'avec des acteurs institutionnels. L'analyse a porté sur la conformité avec des critères d'efficience et d'efficacité des PES, et a abordé les défis spécifiques identifiés pour l'application des PES aux aquifères. Les résultats révèlent une concentration des aides dans les plus grandes exploitations, ce qui remet en question l'équité et l'efficience du programme. Alors que, le PES vise à soutenir les pratiques existantes, le risque d'un effet d'aubaine est difficile à exclure et les changements de pratiques observés restent limités, ce qui compromet le critère additionnel. Le suivi, qui repose principalement sur des déclarations, et l'absence de sanctions réelles et encouragent les comportements opportunistes, affaiblissent la conditionnalité du programme. Les recommandations faites pour améliorer le programme

1 G-EAU, Univ Montpellier, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France, sylvie.morardet@inrae.fr

comprennent un meilleur ciblage des bénéficiaires, des critères d'allocation de l'aide mieux adaptés à la région et l'utilisation des indicateurs de performance mesurables. Les parties prenantes locales envisagent différentes solutions pour garantir la pérennité du financement et son extension à un plus grand nombre d'agriculteurs, soit par des factures d'eau potable, soit par des contributions des autorités locales à l'amélioration des canaux d'irrigation.

Mots-clés : Irrigation gravitaire; Eau potable; Programme pilote; Partie prenante; Canaux d'irrigation.

A CHARTER FOR FLEXIBLE FRUGAL FLOURISHING IRRIGATION IN A WARMING WORLD

UNE CHARTE POUR UNE IRRIGATION SOUPLE, ECONOME ET PROSPERE DANS UN MONDE EN RECHAUFFEMENT

Bruce Lankford[1]

ABSTRACT

The paper proposes a Charter for flexible frugal flourishing irrigation in a pressure-pot warming world. Via this Charter, the paper explores the future of irrigation management and governance. By 'pressure-pot warming world', irrigation will have to deliver more food from less water because it faces a more dynamic, hotter world with stiffer water competition. By 'flexible', irrigation will have to be better suited to changes in water availability in a dynamic climate – both dryness and wetness. By 'frugal', irrigation will have to consume less water per hectare, system and catchment when needed. By 'flourishing', irrigation should protect or boost crop production and other water uses and benefits over the baseline of many of today's irrigation systems. To meet and succeed in this challenging environment, irrigation needs a better understanding and management of water control. In simple terms, water control is the ability to hold, direct, place and apportion water over time and space across different scales. Refining this definition, the paper proposes 'integrated irrigation water control'. Building on this definition, the Charter is presented as a framework with four main parts; 1) context, 2) aim and 8-axis definition of water control; 3) 10 principles, and 4) researched and applied types and pathways of irrigated systems. Positing this Charter, the paper brings additional detail on irrigation and blue water depletion debates.

Keywords: irrigation management and governance; water availability; irrigation needs; catchment; irrigated systems.

RESUME

L'article propose une Charte pour une irrigation souple, économe et prospère adaptée à un monde qui se réchauffe et subit des pressions croissantes. A travers de cette Charte, l'article explore l'avenir de la gestion et de la gouvernance de l'irrigation. En «réchauffant le monde par des marmites à pression», l'irrigation devra produire plus d'alimentation avec moins d'eau, face à un monde plus dynamique et plus chaud avec une concurrence hydrique plus forte. Le terme «souple» implique que l'irrigation devra mieux adaptée aux changements de la disponibilité de l'eau dans un climat dynamique – à la fois sécheresse et humidité. Le terme «économe» indique que l'irrigation devra consommer moins d'eau par hectare, par système et par bassin versant lorsqu'il sera nécessaire. Le terme «prospère» constate que l'irrigation devrait protéger ou stimuler la production agricole et d'autres utilisations et avantages de l'eau par rapport à la base de nombreux systèmes d'irrigation actuels. Pour relever le défi d'environnement difficile, l'irrigation exige une meilleure compréhension et gestion du contrôle de l'eau. En termes simples, le contrôle de l'eau est la capacité à retenir, diriger, placer et répartir l'eau dans le temps et dans l'espace, à différentes échelles. En affinant cette définition, l'article propose une gestion intégrée de l'eau d'irrigation». S'appuyant sur cette définition, la Charte est présentée comme un cadre composé de quatre parties principales : 1) le contexte, 2) l'objectif et 8 axes de définition de la gestion de l'eau; 3) 10 principes, et 4) types et voies de systèmes irrigués étudiés et appliqués. En présentant cette charte, l'article apporte des détails supplémentaires sur les débats relatifs à l'irrigation et à l'épuisement des ressources en «eau bleue».

Mots-clés : Gestion et gouvernance de l'irrigation; Disponibilité de l'eau; Besoins en irrigation; Bassin versant; Systèmes irrigués.

1 Emeritus Professor of Water and Irrigation Policy, University of East Anglia

SUPPORTING AGROECOLOGICAL TRANSITIONS IN IRRIGATED FARMING SYSTEMS: PRELIMINARY INSIGHTS FROM A WATER-SCARCE TERRITORY IN SOUTHWESTERN FRANCE

SOUTENIR LES TRANSITIONS AGROÉCOLOGIQUES DANS LES SYSTÈMES AGRICOLES IRRIGUÉS : PREMIÈRES PERSPECTIVES D'UN TERRITOIRE DÉFICITAIRE EN EAU AU SUD-OUEST DE LA FRANCE

Guichet Eva[1], Alletto Lionel[2], Audouin Elise[3], Leenhardt Delphine[4]

ABSTRACT

Climate change increasingly threatens irrigated agriculture through growing water scarcity, calling for systemic transitions. Agroecology may offer promising pathways to increase the sustainability of irrigated agriculture while reducing pressure on water resources. However, agroecological transitions involve substantial uncertainties and risks for farmers, making support a key enabling factor. Yet, little is known about how agroecology is implemented in irrigated farms and how irrigators are supported in this process. This study investigates in irrigated farms how agroecology is implemented, how farmers perceive links between irrigation and agroecology, and how support contributes to agroecological transitions. It is based on semi-structured interviews with irrigators (n=21) and support service staff (n=20) in southwestern France. Preliminary findings rely on an in-depth analysis of a subset of farmers' interviews, triangulated with insights from the broader interview corpus, while interviews with support service staff are still under analysis. They suggest that agroecology is progressing in irrigated farms, although implementation levels vary considerably among farms. Farmers perceive multiple and sometimes contradictory links between irrigation and agroecology. However, the articulation between irrigation and agroecology remains limited in practice and mostly exploratory. Agroecology-contributing practices are mainly perceived as improving soil water dynamics and reducing irrigation needs, while irrigation is viewed both as a lever facilitating agroecological transitions and as a lock-in factor reinforcing economic dependence and system simplification. Irrigation changes appear relatively stabilised and constraints-reactive, whereas agroecological changes tend to follow longer and iterative trajectories. Support plays a key role in enabling agroecological transitions, particularly by supporting experimentation, learning and decision-making. However, preliminary findings suggest that support mostly address irrigation and agroecology separately, leaving farmers with limited guidance to jointly rethink irrigation and agroecological redesign. These findings highlight the need for more integrated and systemic support approaches to better articulate water management and agroecological transitions in irrigated farms.

Keywords: Climate change; agroecological transition; irrigated farms; irrigation and agroecology; water management.

RESUME

Le changement climatique menace de plus en plus l'agriculture irriguée en raison de la rareté croissante de l'eau exigeant ainsi des transitions systémiques. L'agroécologie

1 G-EAU, Univ Montpellier, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France, Rives & Eaux du Sud-Ouest, 65004 Tarbes Cedex, France Email: e.guichet@riveseteaux.fr / eva.guichet@inrae.fr

2 Université de Toulouse, INRAE, UMR AGIR, Castanet-Tolosan, France Email: lionel.alletto@inrae.fr

3 Rives & Eaux du Sud-Ouest, 65004 Tarbes Cedex, France Email: e.audouin@riveseteaux.fr

4 G-EAU, Univ Montpellier, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France Email: delphine.leenhardt@inrae.fr

peut offrir des voies prometteuses pour rehausser la durabilité de l'agriculture irriguée tout en réduisant la pression sur les ressources en eau. Cependant, les transitions agroécologiques impliquent des incertitudes et des risques importants destinés aux agriculteurs, ce qui fait du soutien un élément favorable. Cependant, on sait peu de choses sur la façon dont l'agroécologie est mise en œuvre dans les exploitations irriguées et sur la façon dont les irrigateurs sont soutenus dans ce processus. Cette étude examine la mise en œuvre de l'agroécologie dans les exploitations irriguées, la perception que les agriculteurs possèdent concernant des liens entre irrigation et agroécologie, ainsi que la contribution du soutien aux transitions agroécologiques. Elle se base sur des entretiens semi-structurés menés auprès des irrigants (n=21) et du personnel de services généraux (n=20) au sud-ouest de la France. Les résultats préliminaires s'appuient sur une analyse approfondie d'un sous-ensemble d'entretiens menés auprès d'agriculteurs combinés aux perspectives tirées de l'ensemble d'entretiens plus large, tandis que les entretiens avec le personnel des services généraux sont encore en cours d'analyse. Ils proposent que l'agroécologie progresse au sein des exploitations irriguées, bien que les niveaux de mise en œuvre varient considérablement d'une exploitation à l'autre. Les agriculteurs perçoivent des liens multiples et parfois contradictoires entre l'irrigation et l'agroécologie. Cependant, l'articulation entre irrigation et agroécologie reste limitée en pratique et principalement préliminaire. Les pratiques contribuant à l'agroécologie sont principalement perçues comme améliorant la dynamique hydrique des sols et réduisant les besoins en irrigation, tandis que l'irrigation est considérée à la fois comme un levier facilitant les transitions agroécologiques et comme un facteur de blocage renforçant la dépendance économique et la simplification du système. Les évolutions liées à l'irrigation apparaissent relativement stabilisés et dictées par les contraintes, alors que les changements agroécologiques suivent généralement des trajectoires plus longues et itératives. Le soutien joue un rôle important en permettant des transitions agroécologiques, notamment en soutenant l'expérimentation, l'apprentissage et la prise de décision. Cependant, les résultats préliminaires indiquent que le soutien traite principalement l'irrigation et l'agroécologie séparément, laissant aux agriculteurs une orientation limitée pour repenser conjointement l'irrigation et la refonte agroécologique. Ces résultats soulignent la nécessité d'avoir des approches de soutien plus intégrées et systémiques pour mieux articuler la gestion de l'eau et les transitions agroécologiques dans les exploitations irriguées.

Mots-clés : Changement climatique; Transition agroécologique; Exploitations irriguées; Irrigation et agroécologie; Gestion de l'eau.

TOWARDS MULTISERVICE IRRIGATION FOR AN AGROECOLOGICAL FUTURE

VERS UNE IRRIGATION MULTISERVICE POUR UN AVENIR AGROÉCOLOGIQUE

Crystele Leauthaud [1] [2,3] [4*5] and Delphine Leenhardt [1]

ABSTRACT

This perspective paper examines the persistent disconnect between agroecology and irrigation science despite their shared objective of building sustainable food systems. The authors argue that irrigation has traditionally been treated as a technical mechanism for increasing productivity and water-use efficiency, while agroecology has focused on holistic ecological and social transformation of food systems. This separation has limited opportunities to redesign irrigation systems in ways that support biodiversity, soil health, ecosystem functions and social equity. The paper proposes the concept of "multiservice irrigation," defined as irrigation designed not only to support crop production but also to generate multiple ecosystem services essential for sustainable food production. The framework integrates agroecological principles with irrigation planning and management through attention to irrigation infrastructure, water governance, technological innovation, ecological processes and stakeholder participation. The authors emphasize that irrigation profoundly affects landscapes, ecological processes and social organization, and therefore should be evaluated beyond narrow productivity metrics. They identify six frontier research themes necessary for operationalizing multiservice irrigation: designing field-scale systems, analysing irrigated agroecological farms and transformation pathways, redesigning hydraulic infrastructure, supporting stakeholders during agroecological transitions, exploring interactions among irrigation, climate change and hydrology, and reforming public policy. The perspective ultimately calls for a paradigm shift in water management and food system planning. By reconciling irrigation science and agroecology, the multiservice irrigation framework seeks to enhance resilience, environmental sustainability, climate adaptation and equitable access to resources while maintaining agricultural productivity. The full published paper can be found with the reference Leauthaud & Leenhardt (2025).

Keywords: biodiversity; soil health; agroecological transitions; multiservice irrigation framework; agricultural productivity.

RESUME

Cet article de réflexion examine le décalage persistant entre l'agroécologie et la science de l'irrigation, malgré leur objectif commun d'établir des systèmes alimentaires durables. Les auteurs constatent que l'irrigation a traditionnellement été considérée comme un mécanisme technique visant à accroître la productivité et l'efficacité de l'utilisation de l'eau, tandis que l'agroécologie s'est concentrée sur une transformation holistique, à la fois écologique et sociale, des systèmes alimentaires. Cette division a limité les possibilités de repenser les

1 G-EAU, Univ Montpellier, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France.
2 CIRAD,UMRG-EAU, Montpellier, France.
3 University of California Agriculture and Natural Resources (ANR), Davis, CA, USA.
4 Center for Agroecology, University of California, Santa Cruz, CA, USA.
5 Corresponding author: C Leauthaud, UC Santa Cruz, Department of Environmental Studies, 1156 High Street, Santa Cruz, CA 95064, USA. e-mail: crystele.leauthaud@cirad.fr

systèmes d'irrigation de manière à favoriser la biodiversité, la santé des sols, les fonctions écosystémiques et l'équité sociale. Le document propose le concept d'« irrigation multiservices », définie comme une irrigation conçue non seulement pour soutenir la production agricole, mais aussi pour générer de services multiples écosystémiques essentiels à une production alimentaire durable. Ce cadre intègre les principes agroécologiques à la planification et à la gestion de l'irrigation en accordant une attention particulière aux infrastructures d'irrigation, à la gouvernance de l'eau, à l'innovation technologique, aux processus écologiques et à la participation des parties prenantes. Les auteurs mettent l'accent sur le fait que l'irrigation exerce un impact profond sur les paysages, les processus écologiques et l'organisation sociale, et qu'elle doit donc être évaluée au-delà des simples indicateurs de productivité. Ils identifient six thèmes de recherche de pointe nécessaires à la mise en œuvre opérationnelle de l'irrigation multiservice : la conception de systèmes à l'échelle de la parcelle, l'analyse des exploitations agroécologiques irriguées et des voies de transformation, la refonte des infrastructures hydrauliques, le soutient des parties prenantes aux transitions agroécologiques, l'étude des interactions entre l'irrigation, le changement climatique et l'hydrologie, ainsi que la réforme des politiques publiques. Finalement, cet article de réflexion appelle à un changement de paradigme en ce qui concerne la gestion de l'eau et la planification des systèmes alimentaires. En conciliant la science de l'irrigation et l'agroécologie, le cadre de l'irrigation multiservices vise à renforcer la résistance, la durabilité environnementale, l'adaptation au climat et l'accès équitable aux ressources, tout en maintenant la productivité agricole. L'article définitif publié se trouve sous la référence Leauthaud & Leenhardt (2025).

Mots-clés : Biodiversité; Santé des sols; Transitions agroécologiques; Cadre d'irrigation multiservice; Productivité agricole.

AGROECOLOGICAL REENGINEERING OF IRRIGATED SCHEMES: FROM THEORY TO CASE STUDIES

REORGANISATION AGROÉCOLOGIQUE DES PÉRIMÈTRES IRRIGUÉS : DE LA THÉORIE AUX ÉTUDES DE CAS

N. Urruty[1], E. Dressayre[2], C. Hello[2], J. Lecollinet[1], S. Sauviat[1], B. Vennat[2]

ABSTRACT

Irrigated agriculture remains a cornerstone of global food security (20% of cultivated land that produce 40% of total food). However, large-scale collective irrigation schemes are most often characterized by intensive agricultural practices and their associated drawbacks, such as biodiversity reduction, soil degradation, water pollution and greenhouse gas emissions. Among the alternative ways to reconcile environmental, sustainability and production goals, agroecology is now receiving increasing attention by emphasizing the application of ecological concepts and principles to the design and management of agricultural systems. However, recent work by COSTEA[3] has shown that few agroecological innovations are present in large-scale irrigation schemes, which could be partly explained by the inflexibility of the associated hydro-agricultural infrastructures and their management. To explore this avenue, a study conducted by BRLi & SCP and commissioned by COSTEA aimed to examine various reengineering options to promote the adoption of agroecological principles in large-scale irrigated areas. A framework (multi-input analysis grid) was established to analyze these irrigated areas according to various agroecological criteria. The adopted agroecological principles are based on an integrated approach which considers the interactions between water, energy and food. This grid was applied to various collective irrigation projects in Senegal and Cambodia to assess the level of commitment to agroecology. Results of this study revealed that: i) agroecology principles are often cited in design and rehabilitation studies but they rarely cover all the dimensions mentioned above, ii) the shift from gravity-fed to modern irrigation infrastructures are highly limited by various factors (e.g. availability of water resources, budget constraints, technical skills of users and maintenance services…), which leave little room for technical innovation, and iii) the proposed changes are multifaceted and therefore require long time for concertation and adaptation.

Keywords: Irrigated agriculture; agroecological principles; water resources; budget constraints; technical innovation.

RESUME

L'agriculture irriguée reste la première pierre de la sécurité alimentaire mondiale (20% des terres cultivées produisent 40% de l'alimentation totale). Cependant, les périmètres irrigués collectifs à grande échelle sont le plus souvent caractérisés par des pratiques agricoles intensives et leurs inconvénients associés, tels que la réduction de la biodiversité, la dégradation des sols, la pollution de l'eau et les émissions de gaz à effet de serre. Parmi les moyens alternatifs pour concilier les objectifs environnementaux, de durabilité et de production, l'agroécologie reçoit aujourd'hui une attention croissante en mettant l'accent sur l'application des concepts et principes écologiques à la conception et à la gestion des systèmes agricoles. Cependant, des travaux récents menés par le COSTEA ont montré que peu d'innovations agroécologiques existent dans les grands périmètres irrigués, ce qui

1 Société du Canal de Provence, LE THOLONET, France
2 BRL Ingénierie, NÎMES, France
3 Comité Scientifique et Technique de l'Eau Agricole

pourrait s'expliquer en partie par la rigidité des infrastructures hydro-agricoles associées et de leur gestion. Pour explorer cette voie, une étude menée par BRLi & SCP et commandée par COSTEA, a visé à examiner diverses options de réorganisation afin de promouvoir l'adoption des principes agroécologiques dans les zones irriguées à grande échelle. Un cadre d'analyse (grille d'analyse d'intrants multiples) a été mis en place pour analyser ces surfaces irriguées selon différents critères agroécologiques. Les principes agroécologiques retenus sont basés sur une approche intégrée qui prend en compte les interactions entre l'eau, l'énergie et l'alimentation. Cette grille a été appliquée à divers projets d'irrigation collective au Sénégal et au Cambodge pour évaluer le niveau d'engagement en faveur de l'agroécologie. Les résultats obtenus de cette étude ont révélé que : i) les principes de l'agroécologie sont souvent cités dans les études de conception et de réhabilitation, mais ils couvrent rarement toutes les dimensions susmentionnées, ii) le passage des infrastructures d'irrigation gravitaires aux infrastructures modernes est fortement limité par divers facteurs (par exemple, disponibilité des ressources en eau, contraintes budgétaires, habiletés techniques des usagers et des services de maintenance...), qui laissent peu d'espace à l'innovation technique, et iii) les changements proposés sont multidimensionnels et nécessitent donc beaucoup de temps pour la concertation et l'adaptation.

Mots-clés : Agriculture irriguée; Principes agroécologiques; Ressources en eau; Contraintes budgétaires; Innovation technique.

LESSONS FROM 20 YEARS OF INWEPF: PADDY IRRIGATION AND DRAINAGE SYSTEMS AS FOUNDATIONS OF AGRO-ECOLOGICAL TRANSITION UNDER CLIMATE CHANGE

LEÇONS TIRES DE 20 ANS D'INWEPF : LES SYSTÈMES D'IRRIGATION ET DE DRAINAGE DES RIZIÈRES COMME FONDATION DE LA TRANSITION AGRO-ÉCOLOGIQUE DES RIZIÈRES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Keigo Noda[1].

ABSTRACT

Under climate change, paddy irrigation and drainage systems are increasingly expected to contribute not only to agricultural production but also to ecosystem sustainability and rural resilience, exposing the limitations of conventional, efficiency-oriented approaches to water management. While water use efficiency has long been emphasized as a key performance indicator in irrigation planning and evaluation, such a single-dimensional approach often fails to capture the broader ecological and social functions inherent in paddy irrigation and drainage systems, tending to undervalue paddy farming due to its high water volume requirement and low relative economic gross value added (GVA). In particular, the roles of water storage, groundwater recharge, biodiversity conservation, and landscape management have long been present in paddy-based agricultural systems but remain insufficiently recognized or systematically evaluated within efficiency-oriented frameworks. This paper reviews lessons from 20 years of activities of the International Network on Water and Ecosystem in Paddy Fields (INWEPF), with a specific focus on how paddy irrigation and drainage systems have evolved to support agro-ecological transition under climate change. Rather than treating the agro-ecological transition as the introduction of entirely new practices or infrastructures, this review adopts the view that it can be advanced by reinterpreting and revaluing ecological and hydrological functions already embedded in existing irrigation and drainage systems. Drawing on symposium proceedings, working group reports, and country case studies accumulated between 2004 and 2024, the review traces a gradual conceptual and practical shift from recognizing the multifunctionality of paddy fields toward managing irrigation and drainage systems as nature-based solutions (NbS) that generate ecosystem services at field, irrigation-system, and landscape scales. The review identifies four major phases in the evolution of INWEPF activities: the initial phase emphasizing the multifunctionality of paddy fields; a shift toward water-saving practices and integrated water resources management (IWRM); an emphasis on climate adaptation and resilience, incorporating traditional irrigation and landscape-based flood management; and recent explicit alignment with the Sustainable Development Goals (SDGs). Beyond technical outcomes, the paper highlights partnership (SDG 17) as a critical institutional condition underpinning the scaling of agro-ecological practices across diverse contexts.

Keywords: paddy irrigation and drainage systems; ecosystem services; multifunctionality of paddy fields; agro-ecological practices; flood management.

RESUME

Dans le contexte du changement climatique, il est, de plus en plus, attendu que les systèmes d'irrigation et de drainage des rizières contribuent non seulement à la production agricole, mais aussi à la durabilité des écosystèmes et à la résilience rurale, mettant ainsi en lumière

1 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 1135841, Japan, Email: nodakeigo@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

les limites des approches conventionnelles axées sur l'efficacité en matière de gestion de l'eau. Alors que depuis longtemps l'accent était mis sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau comme un indicateur clé de la performance dans la planification et l'évaluation de l'irrigation, une telle approche unidimensionnelle ne parvient pas à saisir les fonctions écologiques et sociales plus larges inhérentes aux systèmes d'irrigation et de drainage des rizières. Cette approche tend ainsi à sous-évaluer la riziculture en raison de ses besoins élevés en volume d'eau et de sa faible valeur ajoutée brute (VAB) économique relative. En particulier, le stockage de l'eau, la recharge des eaux souterraines, la conservation de la biodiversité et la gestion des paysages ont longtemps joué un rôle important dans les systèmes rizicoles mais restent insuffisamment reconnus ou systématiquement évalués dans des cadres orientés vers l'efficacité. Cet article passe en revue les leçons tirées de 20 années d'activités menées par le Réseau international pour l'eau et l'écosystème dans les rizières (INWEPF), avec un accent particulier sur la façon dont les systèmes d'irrigation et de drainage des rizières ont évolué pour soutenir la transition agro-écologique face au changement climatique. Plutôt que de traiter la transition agro-écologique comme l'introduction de pratiques ou d'infrastructures entièrement nouvelles, cette revue adopte le point de vue qu'elle peut être avancée grâce à une réinterprétation et une revalorisation des fonctions écologiques et hydrologiques déjà intégrées dans les systèmes d'irrigation et de drainage existants. En s'appuyant sur les actes du symposium, les rapports des groupes de travail et les études de cas par pays recueilles entre 2004 et 2024, la revue retrace une évolution conceptuelle et pratique progressive, passant de la reconnaissance de la multifonctionnalité des rizières à la gestion des systèmes d'irrigation et de drainage en tant que solutions fondées sur la nature (NbS) qui génèrent des services écosystémiques à l'échelle de la parcelle, du système d'irrigation et du paysage.

L'étude identifie quatre grandes phases dans l'évolution des activités de l'INWEPF : la phase initiale mettant l'accent sur la multifonctionnalité des rizières; une transition vers des pratiques d'économie d'eau et la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE); un accent sur l'adaptation au climat et la résistance, l'intégration de l'irrigation traditionnelle et de la gestion des inondations basée sur le paysage; et l'alignement explicite récent avec les Objectifs de développement durable (ODD). Au-delà des résultats techniques, le document met l'accent sur le partenariat (ODD 17) comme une condition institutionnelle essentielle pour mettre à l'échelle des pratiques agroécologiques dans divers contextes.

Mots-clés : Systèmes d'irrigation et de drainage des rizières; Services écosystémiques; Multifonctionnalité des rizières; Pratiques agroécologiques; Gestion des inondations.

ENHANCING AGRICULTURAL DRAINAGE RESILIENCE UNDER CLIMATE CHANGE: A CASE STUDY OF INTEGRATED AND SMART DRAINAGE PUMP STATION MANAGEMENT IN BUYEO COUNTY, KOREA

AMÉLIORER LA RÉSISTANCE DU DRAINAGE AGRICOLE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : UNE ÉTUDE DE CAS SUR LA GESTION INTÉGRÉE ET INTELLIGENTE D'UNE STATION DE POMPAGE DANS LE COMTÉ DE BUYEO, CORÉE

Kwangya Lee[1,*], Yongju Moon[2], Jukyoung Park[3], Changkun Shin[4], Hernwook Lim[5], Seungjin Maeng[6], Dongho Jo[7], Yongjae Lee[8], and Hyunuk An[9]

ABSTRACT

Climate change has increased the frequency and intensity of extreme rainfall events, resulting in greater flood risks in low-lying agricultural regions. In Korea, many agricultural drainage systems were designed under outdated hydrological conditions and are no longer capable of effectively managing current rainfall patterns. Buyeo County, characterized by extensive paddy fields, flat topography, and clay-rich soils with low permeability, has experienced repeated farmland inundation and crop damage over the past decade despite the presence of multiple drainage pump stations. This study investigated the major causes of agricultural flooding in Buyeo County and proposed a smart and integrated drainage management framework to improve resilience under climate change. An integrated assessment was conducted using historical flood records, rainfall data, topographic information, soil drainage characteristics, and operational data from drainage pump stations. The results showed that recent increases in short-duration, high-intensity rainfall frequently exceeded the drainage capacity of existing facilities. In addition, poor natural drainage conditions, insufficient pumping capacity, delayed pump operation, and lack of coordination among neighboring facilities significantly increased flood vulnerability.

Keywords: Climate change; Agricultural flooding; Agricultural drainage; Drainage pump stations; Extreme rainfall; Flood resilience; Smart drainage management.

RESUME

Le changement climatique a augmenté la fréquence et l'intensité des événements de précipitations extrêmes, donnant lieu au risque accru d'inondation dans les

1 Institute of Agricultural Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea Email: leehec7005@gmail.com

2 Water Resources Dept., Saman Corp., Gwacheon-si, Gyeonggi-do 13837, Korea Email: yjmoon@samaneng.com

3 Water Resources Dept., Saman Corp., Gwacheon-si, Gyeonggi-do 13837, Korea Email: jkpark3@samaneng.com

4 Water Resources Dept., Saman Corp., Gwacheon-si, Gyeonggi-do 13837, Korea Email: ckshin@samaneng.com

5 Water Resources Dept., JLSoft, Daejeon 35362, Korea Email: hwlim@jlsoft.co.kr

6 Dept. of Agrl. & Rural Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea Email: maeng@chungbuk.ac.kr

7 Water Resources Dept., Isan Corp., Anyang-si, Gyeonggi-do 14066, Korea Email: letona6@hanmail.com

8 Department of Horticulture, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea Email: zzcvxbcx51@gmail.com

9 Dept. of Agrl. & Rural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea Email: hyunuk@cnu.ac.kr

basses terres agricoles. En Corée, de nombreux systèmes de drainage agricole ont été conçus selon les conditions hydrologiques obsolètes et ne sont plus capables de gérer efficacement les régimes pluviométriques actuels. Le comté de Buyeo, caractérisé par de vastes rizières, une topographie plate et des sols riches en argile à faible perméabilité, a connu des inondations répétées de terres agricoles et des dommages aux cultures au cours de la dernière décennie malgré la présence de plusieurs stations de pompage de drainage. Cette étude a étudié les principales causes des inondations agricoles dans le comté de Buyeo et a proposé un cadre de gestion intelligente et intégrée du drainage afin d'améliorer la résistance face au changement climatique. Une évaluation intégrée a été faite à l'aide de relevés historiques des inondations, de données sur les précipitations, d'informations topographiques, de caractéristiques du drainage des sols et de données opérationnelles provenant de stations de pompage. Les résultats ont montré que l'augmentation récente des précipitations de courte durée et de forte intensité dépassait fréquemment la capacité de drainage des installations existantes. En outre, les mauvaises conditions de drainage naturel, la capacité de pompage insuffisante, le fonctionnement tardif des pompes et le manque de coordination entre les installations voisines ont considérablement augmenté la vulnérabilité aux inondations.

Mots-clés : Changement climatique; Evénements de précipitations extrêmes; Stations de pompage de drainage; Capacité de drainage.

CHARACTERISTICS AND VALUE ANALYSIS OF ANCIENT WEIR PROJECTS

CARACTÉRISTIQUES ET ANALYSE DE LA VALEUR DES ANCIENS PROJETS DE DEVERSOIR

Lihui Gao[1], Bing Li[1]

ABSTRACT

Among China's 42 World Heritage Irrigation Structures, 18 are weir-dominated projects. Ancient weir projects differ significantly from modern barrages and dams. Most are arranged in a curved pattern or obliquely to the river, intentionally extending the weir axis length. While this may seem to consume more labor and construction materials, such layout increases the overflow section and capacity of the weir, effectively reducing the water level above the weir, and simultaneously disperses and transmits the water flow shear force that causes dam failure to the river embankments. Some ancient weirs also utilize naturally formed step-pool systems in rivers to construct weirs on pools, leveraging the energy dissipation effect of deep pools to reduce the impact of floods on the weirs. These construction methods of ancient weir projects can effectively mitigate the impact of floods, enhance engineering resilience, and extend the project life cycle. This not only embodies the wisdom of the ancients but also demonstrates the concept of respecting nature and the unity of man and nature, which is a historical practice of the contemporary "river ethics" concept. From the perspective of modern engineering technology, these practices have scientific theoretical basis and have been widely applied, such as long-axis weirs like "curved weirs" and "duckbill weirs", and the use of artificial step-pool systems for mountain river regulation. In-depth research on these ancient water conservancy projects with multidisciplinary participation to excavate the wisdom of the ancients can not only provide reference for the construction and management of contemporary water conservancy projects but also play an important role in enhancing national cultural confidence.

Keywords: World Heritage Irrigation Structures; ancient weirs; oblique layout; step-pool system; cultural confidence.

RESUME

Parmi les 42 ouvrages d'irrigation du patrimoine mondial de la Chine, 18 sont principalement des projets à déversoirs. Les projets des anciens déversoirs diffèrent considérablement des barrages et des barrages modernes. La plupart sont disposés en courbe ou à l'oblique par rapport à la rivière, prolongeant intentionnellement la longueur de l'axe dues déversoirs. Bien que cela puisse sembler consommer plus de main-d'œuvre et de matériaux de construction, un tel plan augmente la partie déversante du barrage et la capacité du déversoirs, réduisant ainsi efficacement le niveau d'eau au-dessus du déversoir, et disperse et transmet simultanément vers les digues de la rivière, la force de cisaillement de l'écoulement de l'eau qui provoque la rupture du barrage. Certains anciens déversoirs utilisent également des systèmes de gradin-petit réservoir formés naturellement dans les rivières pour construire des déversoirs sur les petits réservoirs, afin d'exploiter l'effet de dissipation d'énergie des petits réservoirs profonds afin de réduire l'impact des inondations sur les déversoirs. Ces méthodes de construction d'anciens projets de déversoirs peuvent atténuer efficacement l'impact des inondations, améliorer la résistance technique et prolonger le cycle de vie du projet. Cela

1 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China Email：lihui.gao@qq.com

exprime non seulement la sagesse des anciens, mais démontre également le concept de respect de la nature et l'unité de l'homme et de la nature, qui était une pratique historique du concept contemporain d'«éthique fluviale». Du point de vue de l'ingénierie moderne, ces pratiques ont une base théorique scientifique et ont été largement appliquées, telles que les déversoirs à axe long comme les «déversoirs à crête courbe» et les **«déversoirs en bec de canard», ainsi que l'utilisation de systèmes artificiels de gradin-petit réservoir pour la régulation des rivières de montagne.** Des recherches approfondies sont menées sur ces anciens projets de conservation de l'eau, avec une participation multidisciplinaire pour mettre en lumière la sagesse des anciens, peuvent non seulement servir de référence pour la construction et la gestion des projets contemporains de conservation de l'eau, mais aussi jouer un rôle important dans le renforcement de la confiance culturelle nationale.

Mots-clés : Ouvrages d'irrigation du patrimoine mondial; Anciens déversoirs; Plan oblique; Système de «gradin-petit réservoir»; Confiance culturelle.

CONTROLLED DRAINAGE AND SUBIRRIGATION FOR AGROECOLOGICAL TRANSITION AND CLIMATE RESILIENCE IN BOREAL AGRICULTURE

DRAINAGE CONTRÔLÉ ET IRRIGATION SOUTERRAINE POUR LA TRANSITION AGROÉCOLOGIQUE ET LA RÉSISTANCE AU CLIMAT EN AGRICULTURE BORÉALE

Mäkelä M.[1], Myllys M.[2], Nurminen J.[3], Häggblom O.[1]

ABSTRACT

Agriculture in boreal regions is increasingly challenged by climate variability, including intensified precipitation patterns, prolonged summer droughts, and changing snowmelt dynamics. In Finland, where an estimated 85% of agricultural land relies on artificial drainage, water management is a key factor influencing both productivity and environmental performance. Traditional drainage systems are primarily designed to remove excess water but are unsuitable for anything else. Controlled drainage (CD) and subirrigation (SI) represent alternative approaches that allow active regulation of groundwater levels, thereby improving hydrological control and environmental outcomes.

This study evaluates the effects of controlled drainage and subirrigation on hydrology, nutrient loading, greenhouse gas emissions, and crop performance using two experimental field sites in Finland. The Jokioinen site represents organic (peat) soils, while the Sievi site represents coarse-textured mineral soils. At Jokioinen, replicated plot-scale experiments compared conventional drainage, controlled drainage, and controlled drainage with intermittent subirrigation. At Sievi, a field-scale system combining controlled drainage and subirrigation using river water was compared to conventional drainage.

Results show that controlled drainage significantly reduces drainage discharge, leading to proportional reductions in nutrient loading. Groundwater levels tables were consistently higher under controlled systems, although strongly influenced by weather conditions. In peat soils, higher groundwater levels reduced carbon dioxide emissions, while yield impacts remained neutral. In mineral soils, subirrigation enhanced soil moisture availability during dry periods, resulting in yield increases of 6–27% in most years and up to 97% in extreme conditions. The results demonstrate that controlled drainage and subirrigation can transform conventional drainage systems into multifunctional water management solutions. These practices support agro ecological transition by reducing environmental pressures while enhancing climate resilience and resource efficiency in boreal agriculture.

Keywords: boreal regions; conventional drainage; controlled drainage; controlled drainage with intermittent subirrigation; groundwater levels.

1 Finnish field drainage association, Simonkatu 12 A 11, 00100 Helsinki, Finland Email: minna.makela@salaojayhdistys.fi

2 Natural Resources Institute Finland, Tietotie 4, 31600 Jokioinen, Finland. Email: merja.myllys@luke.fi

3 Field Drainage Research Association, Simonkatu 12 A 11, 00100 Helsinki, Finland. Email: jyrki.nurminen@salaojayhdistys.fi

1 Finnish field drainage association, Simonkatu 12 A 11, 00100 Helsinki, Finland Email: olle.haggblom@salaojayhdistys.fi

RESUME

L'agriculture dans les régions boréales fait de plus en plus face aux défis de la variabilité du climat, notamment l'intensification des précipitations, les sécheresses prolongées en été et l'évolution de la dynamique de fonte des neiges. En Finlande, où environ 85% des terres agricoles dépendent d'un drainage artificiel, la gestion de l'eau est un facteur clé influençant à la fois la productivité et la performance environnementale. Les systèmes de drainage traditionnels sont principalement conçus pour évacuer l'eau excédentaire, mais sont inadapté à autre chose. Le drainage contrôlé (DC) et l'irrigation souterraine (SI) représentent des approches alternatives permettant une régulation active des niveaux d'eau souterraine, améliorant ainsi le contrôle hydrologique et les résultats environnementaux.

Cette étude évalue les effets exercés par le drainage contrôlé et l'irrigation souterraine sur l'hydrologie, la charge en nutriments, les émissions de gaz à effet de serre et le rendement des cultures en utilisant deux sites expérimentaux en Finlande. Le site de Jokioinen possède des sols organiques (tourbeux), tandis que celui de Sievi possède des sols minéraux à texture grossière. À Jokioinen, des expériences menées à l'échelle de la parcelle ont comparé le drainage conventionnel, le drainage contrôlé et le drainage contrôlé avec une irrigation souterraine intermittente. A Sievi, un système à l'échelle de la parcelle combinant le drainage contrôlé et l'irrigation souterraine en utilisant l'eau de rivière a été comparé au drainage conventionnel.

Les résultats indiquent que le drainage contrôlé réduit considérablement le débit de drainage, donnant lieu à des réductions proportionnelles de la charge en nutriments. Les niveaux des nappes phréatiques étaient systématiquement plus élevés dans les systèmes contrôlés, bien que fortement influencés par les conditions météorologiques. Dans les sols tourbeux, des niveaux plus élevés d'eau souterraine ont réduit les émissions de dioxyde de carbone, sans aucun impact sur le rendement. Dans les sols minéraux, l'irrigation souterraine a amélioré la disponibilité de l'humidité du sol pendant les périodes sèches, donnant lieu aux augmentations de rendement de 6 à 27% la plupart des années, et jusqu'à 97% dans des conditions extrêmes.

Les résultats démontrent que le drainage contrôlé et l'irrigation souterraine peuvent transformer les systèmes de drainage conventionnels en solutions multifonctionnelles relevant de gestion de l'eau. Ces pratiques soutiennent la transition agro-écologique en réduisant les pressions environnementales tout en améliorant la résistance au climat et l'efficacité des ressources dans l'agriculture boréale..

Mots-clés : Régions boréales; Drainage conventionnel; Drainage contrôlé; Drainage contrôlé avec l'irrigation souterraine intermittente; Irrigation souterraine; Niveaux de l'eau souterraine.

EXPLORING THE RELASHIONSHIPS BEWEEN IRRIGATION AND AGROECOLOGY IN OCCITANIE (FRANCE) : THE EXPERIENCE OF THE TAI-OC PROJECT

EXPLORER LES RELATIONS ENTRE IRRIGATION ET AGROECOLOGIE EN OCCITANIE (FRANCE) : EXPERIENCE DU PROJET TAI-OC

Leenhardt D.[1], Lhuissier L.[2]

ABSTRACT

Despite the fact that Irrigation and agroecology are both presented as contributing to climate change adaptation, they fall under different disciplines, communities, policies and discourses and are rarely considered in conjunction with one another. The present communication presents the TAI-OC project which aims to explore the interactions between irrigation and agroecology at several scales, and test the hypothesis that irrigation and agroecology could coexist and reinforce each other in order to improve agricultural systems.

The TAI-OC project is led in Occitanie, a southern region of France, affected by severe water constraints increasing with climate change. Irrigation is implemented by 26% of farmers and water-related challenges concern several cropping systems. We focused on three of them: arable cropping, viticulture, and vegetable growing.

The project adopted a multi-scale, multi-level approach to account for the multi-scale nature of agroecology, with experiments conducted at the field scale, surveys at the farm scale and value-chain scale, and modelling and participatory approaches at the territorial scale.

The present communication gives an overview of the first results of the project which are detailed in several communications in the same conference. It gives a portrait of irrigated agroecological farms, precises the motivations of farmers to agroecological transition and the support they have, and gives insights on the specific role of irrigation. It shows how agroecological practices influence water flow in the soil and can lead to savings in irrigation water, and attests that irrigation can serve the cause of agroecology by enabling crop diversification, producing more biomass returned to the soil, regulating the microclimate, and so on. At the territorial scale, a multi-actor workshop serie was conducted to launch an action plan for the agroecological transition of a water-dependent region, and a modelling approach is being developed to integrate water considerations in food territorial projects.

Keywords: Irrigation and agroecology; climate change adaptation; water-related challenges; agroecological practices; crop diversification.

RESUME

Bien que l'irrigation et l'agroécologie soient toutes deux présentées comme les facteurs contribuant à l'adaptation au changement climatique, ils font partie de différents disciplines, communautés, politiques et discours et sont rarement considérés conjointement. La communication actuelle présente le projet TAI-OC qui vise à explorer les interactions entre l'irrigation et l'agroécologie à plusieurs échelles, et à tester l'hypothèse selon laquelle l'irrigation et l'agroécologie pourraient coexister et se renforcer mutuellement afin d'améliorer les systèmes agricoles.

1 G-EAU, Univ Montpellier, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France

2 Rives & Eaux du Sud Ouest, Tarbes, France

Le projet TAI-OC est mené en Occitanie, région située au sud de la France, touchée par de graves contraintes hydriques qui augmentent avec le changement climatique. L'irrigation est mise en œuvre par 26% des agriculteurs et les défis liés à l'eau concernent plusieurs systèmes de culture. Nous avons mis l'accent sur trois d'entre eux : la culture des terres arables, la viticulture et la culture de légumes.

Le projet a adopté une approche multi-échelles et multi-niveaux pour tenir compte de la nature multi-échelle de l'agroécologie, avec des expériences menées à l'échelle de la parcelle, des enquêtes à l'échelle de l'exploitation agricole et de la chaîne de valeur, ainsi que des approches de modélisation et participatives à l'échelle du territoire.

Cette communication donne un aperçu des premiers résultats obtenus du projet qui sont détaillés dans plusieurs communications de la même conférence. Il donne un portrait des exploitations agroécologiques irriguées, précise les motivations des agriculteurs en ce qui concerne la transition agroécologique et le soutien dont ils disposent, et donne un aperçu du rôle spécifique joué par l'irrigation. Il montre la manière dont les pratiques agroécologiques influencent le débit d'eau dans le sol et peuvent conduire à des économies d'eau d'irrigation, et affirme que l'irrigation peut servir la cause de l'agroécologie en permettant la diversification des cultures, produisant plus de biomasse retournée au sol, régulant le microclimat, entre autres. À l'échelle territoriale, une série d'ateliers multi-acteurs a été organisé pour lancer un plan d'action pour la transition agroécologique d'une région dépendante de l'eau, et une approche de modélisation est en cours d'élaboration pour intégrer les considérations liées à l'eau dans les projets territoriaux alimentaires.

Mots-clés : Irrigation et agroécologie; Adaptation au changement climatique; Défis liés à l'eau; Pratiques agroécologiques; Diversification des cultures.

AGROECOLOGICAL TRANSITION OF IRRIGATED AND DRAINAGED SYSTEMS IN THE YELLOW RIVER BASIN: MULTI-LEVEL CHARACTERISTICS AND PATHWAYS

TRANSITION AGROÉCOLOGIQUE DES SYSTÈMES IRRIGUÉS ET DRAINÉS DANS LE BASSIN VERSANT DE JAUNE : CARACTÉRISTIQUES MULTI-NIVEAUX ET TRAJECTOIRES

Jianxin Mu[1],[2], Shahbaz Khan[1]

ABSTRACT

The Yellow River Basin (YRB) is one of China's most important agricultural regions, supporting extensive irrigated agriculture under conditions of severe water scarcity, ecological degradation, and increasing climate uncertainty. This study examines the characteristics of irrigated and drainaged agroecological systems in the YRB and explores pathways for agroecological transition toward sustainable, resilient, and climate-adaptive agricultural development.

Using a multi-level analytical framework that integrates agroecology, Integrated Water Resources Management (IWRM), and irrigation modernization principles, the study synthesizes scientific literature, policy documents, irrigation district experiences, and basin-scale management practices. At the farm level, irrigated systems are characterized by strong dependence on irrigation, uneven water productivity, intensive agrochemical use, and growing adoption of precision irrigation technologies. At the territorial level, irrigation districts exhibit complex canal–drainage networks, conjunctive use of surface water and groundwater, and increasing challenges associated with salinization, nutrient runoff, and ecological degradation. At the basin level, agricultural development is influenced by interprovincial water allocation mechanisms, ecological flow requirements, and growing pressures from climate change and socio-economic development.

The findings indicate that agroecological transition requires coordinated technological, ecological, and institutional interventions. Key approaches include precision and deficit irrigation, controlled drainage, agricultural drainage water reuse, soil carbon enhancement, crop diversification, digital water allocation systems, and participatory governance mechanisms such as Water User Associations (WUAs). Basin-scale measures, including ecological compensation, ecological flow regulation, climate-adaptive water allocation, and integrated watershed governance, are also essential.

The study demonstrates that sustainable transformation of irrigated and drainaged systems extends beyond engineering modernization and requires the integration of ecological restoration, digital technologies, open science-based monitoring, and governance reforms. The proposed framework offers practical insights for enhancing food security, ecological integrity, and climate resilience in the YRB and provides a useful reference for irrigated river basins facing similar water–energy–food–ecosystem challenges worldwide.

Keywords: Yellow River Basin; agroecological transition; irrigation and drainage; water scarcity; IWRM; climate resilience; sustainable agriculture.

1 UNESCO Regional Office for East Asia, Waijiaogongyu 5-15-3 Jianguomenwai, Chaoyang District, China. Email: j.mu@unesco.org; s.khan@unesco.org.

2 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, A Fuxing Road, Haidian District, Beijing, China. Email: mujx@iwhr.com.

RESUME

Le bassin versant de Jaune (YRB) est l'une des régions agricoles les plus importantes de la Chine, soutenant une agriculture irriguée extensive dans des conditions de grave pénurie d'eau, de dégradation écologique et d'incertitude climatique croissante. Cette étude examine les caractéristiques des systèmes agroécologiques irrigués et drainés dans le YRB et explore les voies de la transition agroécologique vers un développement agricole durable, résistant et adapté au climat.

En utilisant un cadre analytique multi-niveaux intégrant l'agroécologie, la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) et les principes de modernisation de l'irrigation, l'étude synthétise la littérature scientifique, les documents politiques, les expériences menées dans les districts d'irrigation et les pratiques de gestion à l'échelle du bassin. Au niveau de la parcelle, les systèmes irrigués sont caractérisés par une forte dépendance de l'irrigation, de la productivité de l'eau inégale, de l'utilisation agrochimique intensive et de l'adoption croissante des technologies d'irrigation de précision. Au niveau territorial, les districts d'irrigation présentent des réseaux complexes de drainage par canaux, une utilisation conjointe des eaux de surface et souterraines, ainsi que des défis croissants liés à la salinisation, au ruissellement des nutriments et à la dégradation écologique. Au niveau du bassin, le développement agricole est influencé par les mécanismes interprovinciaux d'allocation de l'eau, les exigences de débit écologique et les pressions croissantes liées aux changements climatiques et au développement socio-économique.

Les résultats indiquent que la transition agroécologique exige des interventions technologiques, écologiques et institutionnelles coordonnées. Les approches clés incluent l'irrigation de précision et l'irrigation déficitaire, le drainage contrôlé, la réutilisation des eaux de drainage agricoles, l'amélioration du carbone du sol, la diversification des cultures, les systèmes numériques d'allocation de l'eau et les mécanismes de gouvernance participative tels que les Associations d'Usagers de l'Eau (AUE). Les mesures à l'échelle du bassin, y compris la compensation écologique, la régulation des débits écologiques, l'allocation de l'eau adaptée au climat et la gouvernance intégrée des bassins versants, sont également essentielles.

L'étude démontre que la transformation durable des systèmes irrigués et drainés s'étend au-delà de la modernisation technique et exige l'intégration de la restauration écologique, des technologies numériques, du suivi ouvert basé sur la science et des réformes de la gouvernance. Le cadre proposé offre des perspectives pratiques en ce qui concerne l'amélioration de la sécurité alimentaire, l'intégrité écologique et la résistance au climat dans le YRB et constitue une référence utile pour les bassins versants irrigués confrontés à des défis similaires en matière de lien entre eau-énergie-alimentation-écosystèmes à travers le monde.

Mots-clés : Bassin versant de Jaune; Transition agroécologique; Irrigation et drainage; Pénurie d'eau; GIRE; Résistance au climat; Agriculture durable.

HISTORICAL EVOLUTION OF IRRIGATION AND DRAINAGE SYSTEMS IN WORLD IRRIGATION ENGINEERING HERITAGE AND PATHS FOR ENHANCING CONTEMPORARY AGRICULTURAL ECOLOGICAL RESILIENCE

ÉVOLUTION HISTORIQUE DES SYSTÈMES D'IRRIGATION ET DE DRAINAGE DANS LE PATRIMOINE MONDIAL DU GÉNIE D'IRRIGATION ET VOIES POUR RENFORCER LA RÉSISTANCE ÉCOLOGIQUE AGRICOLE CONTEMPORAINE

Jun Deng [1], Jiangang Liu[2]

ABSTRACT

This paper analyzes the coordinated circulation mode between Turpan Karez's three-dimensional irrigation and drainage system of "vertical shaft — underground channel — open channel — reservoir" and oasis agricultural ecology, interprets the key processes by which ancient people adapted to the arid and high-evaporation climate characteristics of the Turpan Basin, reduced water loss through underground channel water conveyance, and realized efficient utilization of water resources relying on groundwater circulation, confirming the benign interaction between the heritage irrigation and drainage system and the agricultural ecology in arid areas, and highlighting its ecological value of integrated protection of mountains, rivers, forests, farmland, lakes, grasslands and deserts.

At the same time, from the multi-levels of farm, region, industry and food system, it extracts the core resilience characteristics of irrigation and drainage-type agricultural ecosystems in world irrigation engineering heritage, explores the ecological wisdom of "complying with nature and adapting to local conditions" contained in Karez, and focuses on highlighting the in-depth integration of heritage value and contemporary practice: transforming the traditional wisdom of "underground channel water conveyance and water-saving irrigation" of Turpan Karez into a regulation scheme for precision irrigation in contemporary arid and semi-arid agricultural areas to promote the development of regional water-saving agriculture; drawing on its "groundwater-oasis" coordinated symbiosis mode to provide a replicable technical path for agricultural ecological transition in northwest arid areas; relying on the application and protection mechanism of Karez heritage to promote the regional popularization of the concept of irrigation and drainage ecological transition, and realize the living inheritance of heritage techniques through intangible cultural heritage inheritance and technological empowerment.

On this basis, combined with the background of contemporary climate change, it explores practical methods to support agricultural ecological transition, deeply integrates the historical technical experience and management wisdom carried by Karez with the needs of modern ecological transition, provides actionable historical reference and practical guidance for promoting irrigation and drainage systems to empower agricultural ecological transition and enhance the resilience of agriculture in response to climate change, and highlights the contemporary value of world irrigation engineering heritage in contemporary ecological governance.

Keywords : irrigation and drainage system; water loss; ecological value; semi-arid agricultural areas; modern ecological transition.

1 China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR), Department of Water Resources History, A-1, Fuxing Road, Haidian District, Beijing 100038, China Email: dengj@iwhr.com
2 China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR), Department of Water Resources History, A-1, Fuxing Road, Haidian District, Beijing 100038, China Email: jgliu@iwhr.com

RESUME

Cet article analyse le mode de circulation coordonné entre le système d'irrigation et de drainage tridimensionnel de Turpan Karez, le «puits vertical - canal souterrain - canal ouvert - réservoir», et l'écologie agricole des oasis; interprète les processus clés par lesquels les peuples anciens se sont adaptés aux caractéristiques climatiques arides et à forte évaporation du bassin du Turpan, ont réduit la perte d'eau grâce au transport d'eau via des canaux souterrains et ont réalisé une utilisation efficace des ressources en eau reposant sur la circulation des eaux souterraines, confirmant l'interaction bienfaisante entre le système patrimonial d'irrigation et de drainage et l'écologie agricole dans les zones arides tout en soulignant sa valeur écologique de protection intégrée des montagnes, des rivières, des forêts, des terres agricoles, des lacs, des prairies et des déserts.

En même temps, à partir des multiples niveaux de l'exploitation agricole, de la région, de l'industrie et du système alimentaire**,** il extrait les caractéristiques fondamentales de résistance des écosystèmes agricoles de type irrigation et drainage du patrimoine mondial du génie d'irrigation, explore la sagesse écologique de «respecter la nature et s'adapter aux conditions locales» selon Karez, et met l'accent sur l'intégration approfondie de la valeur patrimoniale et des pratiques contemporaines : transformer la sagesse traditionnelle «du transport d'eau via des canaux souterrains et de l'irrigation économe en eau» de Turpan Karez dans un programme de régulation pour l'irrigation de précision dans les zones agricoles arides et semi-arides contemporaines afin de promouvoir le développement d'une agriculture régionale économe en eau; en s'appuyant sur son modèle de symbiose coordonnée «eaux souterraines-oasis» pour fournir une voie technique reproductible pour la transition écologique agricole dans les zones arides du nord-ouest; en s'appuyant sur le mécanisme d'application et de protection du patrimoine Karez pour promouvoir la vulgarisation régionale du concept de transition écologique de l'irrigation et du drainage, assurant ainsi le patrimoine vivant des techniques du patrimoine grâce au patrimoine culturel immatériel et à l'autonomisation technologique.

Sur cette base, en tenant compte du contexte du changement climatique contemporain, il explore des méthodes pratiques pour soutenir la transition agro-écologique, intègre fortement l'expérience technique historique et la sagesse de gestion portées par Karez avec les exigences de la transition écologique moderne, fournit des références historiques exploitables et des conseils pratiques pour promouvoir les systèmes d'irrigation et de drainage afin de favoriser la transition écologique agricole et d'améliorer la résistance de l'agriculture face au changement climatique, et met en évidence la pertinence actuelle du patrimoine mondial du génie d'irrigation dans la gouvernance écologique contemporaine.

Mots clés : Système d'irrigation et de drainage; Perte d'eau; Valeur écologique; Zones agricoles semi-arides; Transition écologique moderne.

INTEGRATING AGROECOLOGY AND CROP MODELING FOR CLIMATE RESILIENT WATER MANAGEMENT

INTÉGRATION DE L'AGROÉCOLOGIE ET DE LA MODÉLISATION DES CULTURES POUR UNE GESTION DE L'EAU RÉSISTANTE AU CLIMAT

Paul Abudulai Yelinje[1] Tsu-Chuan Lee[2] and Su-Chin Chen[3]*

ABSTRACT

Climate change and urbanization intensify agricultural water competition, demanding approaches that reconcile food production with ecological and social resilience. Agroecology offers guiding principles, yet conventional irrigation is often seen as incompatible with agroecological transitions. This study reframes water management as an integrated agroecosystem component, developing and testing a framework that bridges agroecological design with data-driven optimization using AquaCrop at Taiwan's Jiufenggou urban-rural interface. The approach operates at two levels: first, a multi-scalar conceptual model aligns adaptive water management with agroecological tenets from farm-level soil health to territorial polycentric governance and nature-based solutions; second, empirical simulations transition water management from experience-based to climate-aware scheduling, using local ETo data. Localized water productivity (15–20 g/m²) and harvest index (0.43–0.50) were parameterized for silty clay loam, comparing paddy flooding with alternate wetting and drying. Three findings emerged: alternate wetting and drying reduces irrigation water use by 15–22% while maintaining 98 - 99% of yields; a three-tier drought framework based on the Relative Irrigation Supply Index guides adaptive management below 70% flow, 3-day-on, 2-day-off cycles (yield-preservation mode targeting critical growth stages), and below 40%, full yield-preservation mode; socio-hydrological mapping identified 35% of parcels as highly vulnerable to water deficits, enabling targeted resource allocation. Sensors enable model correction and automated alerts while ecological flows sustain biodiversity. Technical solutions alone are insufficient; effective implementation requires multi-stakeholder governance involving farmers, water associations, and planners. This socio-hydrological perspective identifies synergistic policy instruments from living labs to incentive reform. The framework offers a replicable pathway for climate-resilient water management, transforming irrigation into ecosystem stewardship and positioning skilled water management as a cornerstone of an equitable agricultural future.

Keywords: Agroecology, Irrigation, Water Productivity, Climate Adaptation, Socio-hydrology, Nature-based Solutions, Aqua Crop.

RESUME

Le changement climatique et l'urbanisation exacerbent la concurrence pour l'eau dans le secteur agricole, ce qui exige des approches permettant de concilier production alimentaire et résistance écologique et sociale. L'agroécologie propose des

1 International Doctoral Program in Agriculture/Nature-based Solutions Research Center, National Chung Hsing University, Taiwan, No. 145 Xingda Rd., South Dist., Taichung City 402, Taiwan (R.O.C.). Email: pabudulai@yahoo.com or d113030208@nchu.edu.tw

2 Taiwan International Institute for Water Education, Taiwan, No. 130, Sec. 3, Keelung Rd., Taipei 106, Taiwan (R.O.C.). Email: tsuchuan.tiiwe@gmail.com

3 Academy of Circular Economy/Nature-based Solutions Research Center, National Chung Hsing University, Taiwan, No. 145 Xingda Rd., South Dist., Taichung City 402, Taiwan (R.O.C.).*Email: scchen@nchu.edu.tw

principes directeurs, mais l'irrigation conventionnelle est souvent considérée comme incompatible avec les transitions agroécologiques. Cette étude redéfinit la gestion de l'eau en tant que composante intégrée de l'agroécosystème, en développant et en essayant un cadre reliant la conception agroécologique à l'optimisation basée sur les données à l'aide d'AquaCrop, dans l'interface entre zones urbaines et rurales de Jiufenggou, à Taïwan. Cette approche intervient à deux niveaux : d'abord, un modèle conceptuel à échelle multiple aligne la gestion adaptative de l'eau sur les principes agroécologiques, depuis la santé des sols au niveau de l'exploitation agricole jusqu'à la gouvernance polycentrique territoriale et aux solutions fondées sur la nature; d'autre part, des simulations empiriques font évoluer la gestion de l'eau d'une planification fondée sur l'expérience vers une planification tenant compte du climat, à l'aide de données locales d'évapotranspiration de référence (ETo). La productivité locale de l'eau (15–20 g/m²) et l'indice de récolte (0,43–0,50) ont été paramétrés pour un sol limono-argileux-terreau, en comparant l'inondation des rizières à la technique d'humidification et de séchage alternés**.** Trois conclusions y émergent : l'humidification et le séchage alternés réduit la consommation d'eau d'irrigation de 15 à 22% tout en maintenant 98 à 99% des rendements; un cadre de gestion de la sécheresse à trois niveaux, basé sur l'indice d'approvisionnement relatif en irrigation, guide la gestion adaptative en cas de débit inférieur à 70% (cycles de 3 jours d'irrigation suivis de 2 jours d'arrêt, en mode de préservation des rendements ciblant les stades critiques de croissance) et, en dessous de 40%, en mode de préservation totale des rendements; la cartographie socio-hydrologique a identifié 35% des parcelles comme hautement vulnérables aux déficits hydriques, permettant ainsi une allocation ciblée des ressources. Des capteurs permettent la correction des modèles et les alertes automatisées, tandis que les débits écologiques soutiennent la biodiversité. Les solutions techniques seules ne sont pas suffisantes; une mise en œuvre efficace nécessite une gouvernance multipartite impliquant les agriculteurs, les associations de gestion de l'eau et les planificateurs. Cette perspective socio-hydrologique identifie des instruments politiques synergiques, allant des laboratoires vivants à la réforme des incitations. Ce cadre propose une voie reproductible pour une gestion de l'eau résistante au changement climatique, transformant l'irrigation en gestion responsable des écosystèmes et positionnant une gestion de l'eau compétente comme un thème essentiel d'un avenir agricole équitable.

Mots-clés : Agroécologie; Irrigation; Productivité de l'eau; Adaptation au climat; Socio-hydrologie; Solutions fondées sur la nature; AquaCrop.

AGROECOLOGY AND IRRIGATION IN AFRICA: SYNERGIES FOR SUSTAINABLE AND CLIMATE-RESILIENT FOOD SYSTEMS

AGROÉCOLOGIE ET IRRIGATION EN AFRIQUE : SYNERGIES ENTRE DES SYSTÈMES ALIMENTAIRES DURABLES ET RESISTANTS AU CLIMAT

S. Walker[1] and J.J. Anderson[2]

ABSTRACT

Agroecology is increasingly recognised as a pathway towards sustainable, resilient, and equitable food systems. Across much of sub-Saharan Africa, however, agroecological transitions are constrained by highly variable rainfall, recurrent droughts, and limited water availability. Smallholder farming systems are predominantly rainfed, resulting in unstable yields, seasonal food shortages, and limited opportunities for crop diversification and market participation. Simultaneously, climate change is intensifying rainfall variability and increasing the frequency of extreme weather events, further threatening agricultural productivity and rural livelihoods. This paper explores the synergies between agroecology and irrigation, arguing that appropriate water management interventions can serve as critical enablers of agroecological development and are not viewed as separate or competing approaches.

The characteristics and challenges of sub-Saharan African farming systems are reviewed and how agroecological principles can improve resource-use efficiency, biodiversity conservation, soil health, and climate resilience is examined. Attention is given to the role of water as a limiting factor in agroecological production systems. Nature-based solutions such as rainwater harvesting, conservation agriculture, wetland restoration, and soil moisture conservation are discussed alongside technological innovations including low-cost drip irrigation, solar-powered pumping systems, and digital advisory tools. Such interventions can improve water productivity while supporting ecological sustainability and reducing vulnerability to climatic shocks.

South African case studies from the Free State and Western Cape provinces illustrate how supplementary irrigation and rainwater harvesting have contributed to improved crop productivity, enhanced water-use efficiency, increased dietary diversity, and greater resilience to climate variability. The paper further examines the alignment of agroecology-irrigation integration with the African Union's Malabo Declaration and Agenda 2063. It concludes that combining agroecological principles with efficient and context-appropriate irrigation technologies offers a practical pathway for achieving sustainable agricultural intensification, improved food and nutrition security, and enhanced resilience of African agri-food systems under changing climatic conditions.

Keywords: Azroecology, supplementary irrigation, rainwater harvesting, climate resilience, food security, Africa.

RESUME

L'agroécologie apparaît de plus en plus clairement comme une voie vers des systèmes alimentaires durables, résistants et équitables. Cependant, à travers la plus grande partie de l'Afrique subsaharienne, les transitions agroécologiques sont freinées

1 South African Agricultural Research Council - Natural Resources & Engineering, Agrometeorology, Pretoria, South Africa, University of the Free State, Soil, Crop & Climate Sciences, Bloemfontein, South Africa Email: suewalker06@gmail.com WalkerS@arc.agric.za

2 South African Agric. Research Council - Natural Resources & Engineering, Water Science, Bloemfontein, South Africa. Email: AndersonK@arc.agric.za

par une pluviométrie très variable, des sécheresses récurrentes et une disponibilité limitée en eau. Les systèmes agricoles des petits exploitants dépendent largement sur l'agriculture pluviale, ce qui donne lieu aux rendements instables, aux pénuries alimentaires saisonnières et aux possibilités limitées de diversification des cultures et à l'accès aux marchés. Parallèlement, le changement climatique intensifie la variabilité des précipitations et augmente la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes, menaçant encore davantage la productivité agricole et les moyens de subsistance des populations rurales. Cet article explore les synergies existantes entre l'agroécologie et l'irrigation, en soutenant que des interventions appropriées en matière de gestion de l'eau peuvent agir comme des catalyseurs essentiels du développement agroécologique et ne doivent pas être considérées comme des approches distinctes ou concurrentes.

L'étude passe en revue les caractéristiques et les défis des systèmes agricoles d'Afrique subsaharienne, et examine la manière dont les principes agroécologiques peuvent améliorer l'efficacité de l'utilisation des ressources, la conservation de la biodiversité, la santé des sols et la résistance climatique. Une attention particulière est accordée au rôle joué par l'eau en tant que facteur limitant les systèmes de production agroécologiques. Les solutions fondées sur la nature, telles que la collecte des eaux de pluie, l'agriculture de conservation, la restauration des zones humides et la préservation de l'humidité des sols, sont abordées parallèlement à des innovations technologiques, notamment l'irrigation goutte-à-goutte à faible coût, les systèmes de pompage à énergie solaire et les outils numériques consultatifs. De telles interventions peuvent améliorer la productivité de l'eau tout en favorisant la durabilité écologique et en réduisant la vulnérabilité aux chocs climatiques.

Des études de cas sud-africaines menées dans les provinces de l'État libre et du Cap-Occidental illustrent la manière dont l'irrigation d'appoint et la collecte des eaux de pluie ont contribué à améliorer la productivité agricole, à optimiser l'efficacité de l'utilisation de l'eau, à accroître la diversité alimentaire et à renforcer la résistance face à la variabilité climatique. En outre, l'article examine l'adéquation de l'intégration de l'agroécologie et de l'irrigation dans la Déclaration de Malabo et l'Agenda 2063 de l'Union africaine. En conclusion, il est constaté que l'association des principes agroécologiques avec des technologies d'irrigation efficaces et adaptées au contexte offre une voie concrète pour parvenir à une intensification agricole durable, à une meilleure sécurité alimentaire et nutritionnelle, ainsi qu'à une résistance accrue des systèmes agroalimentaires africains face à l'évolution des conditions climatiques.

Mots-clés : Agroécologie; Irrigation d'appoint; Collecte des eaux de pluie; Résistance au climat; Sécurité alimentaire; Afrique.

ROLES AND USES OF WATER IN SUSTAINABLE FOOD SYSTEMS: A CASE STUDY OF UNIVERSITY FARMS IN CALIFORNIA

RÔLES ET USAGES DE L'EAU DANS LES SYSTÈMES ALIMENTAIRES DURABLES : ÉTUDE DE CAS DES FERMES UNIVERSITAIRES EN CALIFORNIE

C. Leauthaud[1,2,3,*], M. Frimat[4], H. Lamouchi[4], G. Ingersoll[1], L. Auger[4], D. Leenhardt[4]

ABSTRACT

This study investigates the role of water within sustainable food systems, by analyzing two university-based agroecological farms in California: the University of California Santa Cruz (UCSC) and the University of California Davis (UCD). Grounded in the broader context of food system transformation and the emergence of agroecology as both a scientific and a social movement, it addresses a key gap in the literature—the integration of water use and management into agroecological assessments. To address this gap, a mixed-methods design integrating qualitative and quantitative approaches was applied to these two case studies selected for their historical significance and institutional engagement with sustainability. This work first provides a descriptive overview of the selected food systems, highlighting their key structural and functional characteristics.

We then report the assessed level of agroecological integration within each system, based on the defined evaluation criteria. Finally, we examine patterns of water use in the studied agricultural contexts. Field observations, semi-structured interviews, and irrigation assessments enabled a comprehensive analysis of food system structures, agroecological practices, and water management across production, distribution, and consumption processes. With regards to the agroecological assessment of each farm, the results reveal that both farms operate localized, community-oriented food systems with a comparable degree agroecological advancement. At both sites, water use at the production level represents the dominant share of total water consumption when analyzing the whole food system. In these farms, water conservation is indirectly supported by agroecological practices such as mulching and crop selection.

There were many agroecological activities that did not explicitly targeting water preservation but nevertheless had positive secondary effects on water use. On the other hand, direct irrigation management remains underdeveloped. In conclusion, the studied university farms demonstrated strong potential as living laboratories for sustainable agriculture. With regards to irrigation, enhancing record-keeping and quantitative measurements as well as system upgrades will be essential next steps to improve water-use in this systems.

Keywords: Sustainable food systems; agroecological integration; agroecological practices; qualitative and quantitative approaches; Water use.

1 University of California Agriculture and Natural Resources (ANR), Davis, United States

2 University of California, Center for Agroecology, Santa Cruz, United States

3 University of California, Santa Cruz, Environmental Studies Department, Santa Cruz, United States

4 G-EAU, Univ Montpellier, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France

* Corresponding author: C Leauthaud, UC Santa Cruz, Department of Environmental Studies, 1156 High Street, Santa Cruz, CA 95064, USA. e-mail: crystele.leauthaud@cirad.fr

RESUME

Cette étude examine le rôle joué par l'eau au sein des systèmes alimentaires durables, en analysant deux fermes agroécologiques universitaires en Californie : celles de l'Université de Californie à Santa Cruz (UCSC) et de l'Université de Californie à Davis (UCD). S'inscrivant dans le contexte plus large de la transformation des systèmes alimentaires et de l'émergence de l'agroécologie en tant que mouvement à la fois scientifique et social, elle comble une lacune majeure dans la littérature : l'intégration de l'usage et de la gestion de l'eau dans les évaluations agroécologiques. Afin d'aborder cet écart, une méthodologie mixte intégrant des approches qualitatives et quantitatives a été appliquée à ces deux études de cas, retenues pour leur importance historique et leur engagement institutionnel en faveur de la durabilité. Ce travail présente tout d'abord une vue d'ensemble descriptive des systèmes alimentaires retenus, en mettant en évidence leurs principales caractéristiques structurelles et fonctionnelles.

Nous rendons ensuite compte du niveau d'intégration agroécologique évalué au sein de chaque système, sur la base des critères d'évaluation définis. Enfin, nous examinons les tendances d'utilisation de l'eau dans les contextes agricoles étudiés. Des observations sur le terrain, des entretiens semi-structurés et des évaluations des systèmes d'irrigation ont permis une analyse approfondie des structures des systèmes alimentaires, des pratiques agroécologiques et de la gestion de l'eau tout au long des processus de production, de distribution et de consommation. Du point de vue de l'évaluation agroécologique de chaque exploitation, les résultats révèlent que les deux exploitations fonctionnent comme des systèmes alimentaires localisés et axés sur la communauté, présentant un niveau comparable d'avancement agroécologique. Sur les deux sites, l'utilisation de l'eau au niveau de la production représente la part prédominante de la consommation totale d'eau lorsque l'on analyse l'ensemble du système alimentaire. Dans ces fermes, la conservation de l'eau est indirectement favorisée par des pratiques agroécologiques telles que le paillage et la sélection des cultures.

De nombreuses activités agroécologiques, bien qu'elles ne visent pas explicitement la préservation de l'eau, ont néanmoins exercé des effets secondaires positifs sur l'utilisation de l'eau. En revanche, la gestion directe de l'irrigation reste peu développée. En conclusion, les fermes universitaires étudiées ont démontré un fort potentiel en tant que laboratoires vivants pour l'agriculture durable. En ce qui concerne l'irrigation, l'amélioration de la tenue des registres et des mesures quantitatives, ainsi que la modernisation des systèmes, constitueront les prochaines étapes essentielles pour optimiser l'utilisation de l'eau au sein de ces systèmes.

Mots-clés : Systèmes alimentaires durables; Intégration agroécologique; Pratiques agroécologiques; Approches qualitatives et quantitatives; Utilisation de l'eau.

IMPACT EVALUATION OF AGRICULTURAL ENVIRONMENT CONSERVATION PROGRAM (AECP) USING WATER-FOOD-ENERGY NEXUS PLATFORM (NEWS) IN KOREA

ÉVALUATION DE L'IMPACT DU PROGRAMME DE CONSERVATION DE L'ENVIRONNEMENT AGRICOLE (AECP) À L'AIDE DE LA PLATEFORME «LIENS ENTRE EAU-ALIMENTATIONF-ENERGIE» (NEWS) EN CORÉE

Jin-Yong Choi [1], Pureun Yoon [2], Maga Kim [3], Seungoh Hur [4], Jeongwoo Son [5]

ABSTRACT

In the 'Agricultural Innovation, Productivity, and Sustainability Report in Korea,' the OECD made various policy recommendations for achieving sustainable agriculture and agricultural innovation, based on an analysis of Korea's agricultural conditions and policies. Agricultural activities are negatively impacting the rural environment during crop cultivation. Crop cultivation activities accompany the degradation of rural environmental resources, including tillage, chemical application, nutrient supply, and water consumption. The Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) of South Korea has implemented the Agricultural Environment Conservation Program (AECP) to conserve natural resources and landscapes in rural areas. The AECP involves two activity folds: village-level and farmer-level activities. Each category includes conservation activities related to the agricultural environment. The AECP includes 5 categories: soil, water, landscape, atmosphere, and heritage & ecology. The soil category includes nutrient management, soil erosion prevention, pesticide reduction, and related activities. The water category includes water quality improvement, non-point pollution source management, agricultural water conservation, etc., and the atmosphere category includes greenhouse gas reduction, axonal odor reduction, etc. The heritage and ecology category include enhancing biodiversity and conserving ecosystems, among other activities. In this study, activities from the soil, ecology, atmosphere, and water categories are selected for quantitative evaluation. The AECP program is a direct payment program to which participants are eligible, and MAFRA has to evaluate the effectiveness of AECP in terms of environmental and economic benefits. Therefore, the platform NEWS (Nexus Environmental Working for Sustainability) based on nexus approach was developed to evaluate the AECP activities effectiveness. The platform NEWS integrates database, models, and UI (User Interface) into a seamless system to provide AECP activity monitoring and evaluation. The database contains digital maps for soil and land ownership parcels and information about the participants, and the APEX model embedded in the platform to calculate water balance, soil and nutrient losses, and GHG emissions. UI also adapted to provide the graphical results. The NEWS has two functions that include AECP implementation monitoring and impact evaluation. The implementation monitoring function enables checking the progress status of participants' activities. The impact evaluation function provides capabilities for the effectiveness of activities in terms of environmental improvements in terms of quality and economic value based on scenarios and activities. The APEX model is used to calculate the water quality of runoff from

1 Professor, Department of Rural System Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea, E-mail: iamchoi@snu.ac.kr
2 Assistant Professor, Department of Regional Construction Engineering, Kongju National University, Yesan 32439, Republic of Korea, E-mail: vnfms3259@kongju.ac.kr
3 Researcher, Department of Rural System Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea, E-mail: mnkim@snu.ac.kr
4 Director, Reclaimed Land Agriculture Center, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea, E-mail: soilssohur@korea.kr
5 Researcher, Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea, E-mail: son094@korea.kr

the farmlands during the application of AECP cultivation activities and provides the results to the economic analysis model for value accounting of the AECP activities. The NEWS successfully analyzed the relationship between various cultivation activities included in the AECP and agricultural resources and quantitatively analyzed the impact of cultivation activities such as water management, fertilizer management, tillage management, and conservation practices. The NEWS platform was applied to 59 villages participating in the AECP implementation for data collection, program monitoring, and impact evaluation, and scenarios were analyzed for comparison. The NEWS platform demonstrated how the database and model-based system can be applied for governmental policy implementation and evaluation in an agricultural direct payment program, adapting the water-food-energy nexus approach. As such, the water-food-energy nexus studies are expected to serve as foundational data to support a policy decision-making tool by comprehensively analyzing and quantitatively evaluating the impacts of climate change and agricultural cultivation activities on resources and between resources.

Keywords: Agricultural Environment Conservation, Water-Food-Energy Nexus, NEWS platform, Agricultural Program Evaluation.

RESUME

Selon son «Rapport sur l'innovation, la productivité et la durabilité agricoles en Corée», l'OCDE a formulé diverses recommandations politiques visant à réaliser une agriculture durable et à favoriser l'innovation agricole, sur la base d'une analyse des conditions et des politiques agricoles coréennes. Les activités agricoles exercent un impact négatif sur l'environnement rural lors de la culture des plantes. Ces activités agricoles entraînent une dégradation des ressources environnementales rurales, notamment en raison du travail du sol, de l'épandage de produits chimiques, de l'apport de nutriments et de la consommation d'eau. Le ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales (MAFRA) de Corée du Sud a mis en œuvre le Programme de conservation de l'environnement agricole (AECP) afin de préserver les ressources naturelles et les paysages des zones rurales. L'AECP comprend deux volets d'activités : celles menées au niveau des villages et celles menées au niveau des agriculteurs. Chaque catégorie comprend des activités de conservation liées à l'environnement agricole. L'AECP comprend 5 catégories : les sols, l'eau, les paysages, l'atmosphère, ainsi que le patrimoine et l'écologie. La catégorie «sols» couvre la gestion des nutriments, la prévention de l'érosion des sols, la réduction d'usages des pesticides et les activités y relatives. La catégorie «eau» inclut l'amélioration de la qualité de l'eau, la gestion des sources de pollution diffuses, la conservation de l'eau à des fins agricoles, etc., tandis que la catégorie «atmosphère» comprend la réduction des gaz à effet de serre, la réduction des nuisances olfactives, etc. La catégorie «Patrimoine et écologie» se compose, entre autres, du renforcement de la biodiversité et de la conservation des écosystèmes. Dans cette étude, les activités issues des catégories «Sol», «Écologie», «Atmosphère» et «Eau» sont retenues pour faire l'objet d'une évaluation quantitative. Le programme AECP est un programme de paiements directs auquel les participants sont admissibles, et le MAFRA doit évaluer l'efficacité de l'AECP en termes d'avantages environnementaux et économiques. Par conséquent, la plateforme NEWS (Nexus Environmental Working for Sustainability), fondée sur l'approche «lien», a été développée pour évaluer l'efficacité des activités de l'AECP. La plateforme NEWS intègre une base de données, des modèles et une interface utilisateur (UI) au sein d'un système homogène afin d'assurer le suivi et l'évaluation des activités de l'AECP. La base de données se compose des cartes numériques des parcelles foncières et des informations relatives aux participants, tandis que le modèle APEX intégré à la plateforme permet de calculer le bilan hydrique, les pertes de sol et de nutriments, ainsi que les émissions de gaz à effet de serre. L'interface utilisateur a également été adaptée pour fournir les résultats sous forme graphique. Le NEWS dispose de deux fonctions : le suivi de la mise en œuvre de l'AECP et l'évaluation d'impact. La fonction de suivi de la mise en œuvre permet de vérifier

l'état d'avancement des activités des participants. La fonction d'évaluation d'impact permet d'analyser l'efficacité des activités en ce qui concerne les améliorations environnementales, tant sur le plan de la qualité que de la valeur économique, en se basant sur de scénarios et d'activités. Le modèle APEX est utilisé pour calculer la qualité de l'eau de ruissellement provenant des terres agricoles pendant la mise en œuvre des activités agricoles de l'AECP et fournit les résultats au modèle d'analyse économique pour la comptabilisation de la valeur des activités de l'AECP. Le système NEWS a permis d'analyser avec succès la relation entre les différentes activités agricoles incluses dans l'AECP et les ressources agricoles, et d'analyser quantitativement l'impact des activités agricoles telles que la gestion de l'eau, la gestion des engrais, la gestion du travail du sol et les pratiques de conservation. La plateforme NEWS a été mise en œuvre dans 59 villages participant à la mise en œuvre de l'AECP à des fins de collecte de données, de suivi du programme et d'évaluation d'impact, et des scénarios ont été analysés à des fins de comparaison. La plateforme NEWS a démontré la manière dont la base de données et le système basé sur des modèles peuvent être appliqués à la mise en œuvre et à l'évaluation des politiques gouvernementales dans le cadre d'un programme de paiements directs agrcoles, en adaptant l'approche du lien entre eau-alimentation-énergie. À ce titre, les études sur le lien entre eau-alimentation-énergie devraient servir de données fondamentales pour soutenir un outil d'aide à la décision politique, en analysant de manière exhaustive et en évaluant quantitativement les impacts du changement climatique et des activités agricoles sur les ressources, ainsi que des interactions entre ces ressources.

Mots-clés : Conservation de l'environnement agricole; Lien entre eau-alimentation-énergie; Plateforme NEWS; Évaluation de programme agricole.

ECONOMIC AND SOCIAL IMPACTS OF CHANGED WATER USE BEHAVIOUR OF COMMERCIAL WHEAT FARMERS IRRIGATORS TOWARDS CLIMATE VARIABILITY IN SOUTH AFRICA

IMPACT ÉCONOMIQUE ET SOCIAL DE L'ÉVOLUTION DES COMPORTEMENTS EN MATIÈRE D'UTILISATION DE L'EAU CHEZ LES PRODUCTEURS DE BLÉ COMMERCIAUX IRRIGANTS FACE À LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE EN AFRIQUE DU SUD

Yonas T. Bahta[1*], Markus Monteiro[1] and Henry Jordaan[1]

ABSTRACT

Effective water management and technology adoption are essential for sustainable water management and a catalyst for SDGs 6 (combating climate variability) and 2 (ending hunger and poverty), aligning with the African Union CAADP Strategy and Action Plan: 2026-2035. As water scarcity worsens in South Africa, efficient freshwater management is a critical policy issue. Inefficient water use is partly due to human behaviour, which is not fully understood in South African agriculture. This study addresses a knowledge gap by highlighting the impact of human behaviuor on water use and management. It developed an integrated framework and socioeconomic indicators to assess the economic and social impacts of changes in water-use behaviour among wheat farmers in the Hartbeespoort irrigation scheme, South Africa.

To achieve the objective, a survey, Social Accounting Matrix, secondary data, extended Theory of Planned Behaviour, Structural Equation Model, AquaCrop model, and partial equilibrium analysis were applied. Psychological and contextual factors influence adaptation to climate variability. Attitudes drive intentions to adopt adaptive practices, while institutional and legal support strengthen social norms that encourage adaptation. Perceived risks arising from pressures such as load shedding and tariffs affect intentions and increase perceived behavioural control.

Technical factors reinforce intention, indicating that access to technical resources enables adaptive behaviour. These imply that farmers adopt strategies when they perceive risks as serious, have the technical means to act, and receive institutional reinforcement.

The AquaCrop and partial equilibrium model results show minimal yield impact under partial adaptation but significant increases under full adaptation, including increased wheat output, higher labour remuneration in South Africa, and significantly higher household income in the Northwest province, as well as institutional incomes. These findings confirm that, under the right psychological and structural conditions, full adaptation enhances productivity and delivers widespread socioeconomic benefits, making a compelling case for investment in long-term climate resilience.

Keywords: Hartbeespoort irrigation scheme; AquaCrop; institutional and legal support; technical resources; household income.

RESUME

Une gestion efficace de l'eau et l'adoption de technologies sont essentielles pour une gestion durable de l'eau et constituent un catalyseur pour les Objectifs de développement durable -

1 Department of Agricultural Economics, University of the Free State, 205 Nelson Mandela Drive, Agriculture Building, P.O. Box 39, Internal Box 58, Bloemfontein 9300, South Africa, MonteiroMO@ufs.ac.za (M.M), Henry Jordaan (H.J)

* Correspondence: Bahtay@ufs.ac.za

ODD n° 6 (lutte contre la variabilité climatique) et n° 2 (élimination de la faim et de la pauvreté) - conformément à la stratégie et au plan d'action du CAADP de l'Union africaine pour la période 2026-2035. Alors que la pénurie d'eau s'aggrave en Afrique du Sud, la gestion efficace de l'eau douce devient un enjeu politique crucial. L'utilisation inefficace de l'eau est en partie due au comportement humain, un aspect encore mal compris dans le secteur agricole sud-africain. Cette étude comble une lacune dans les connaissances en mettant l'accent sur l'impact du comportement humain sur l'utilisation et la gestion de l'eau. Elle a élaboré un cadre intégré et des indicateurs socio-économiques pour évaluer les impacts économiques et sociaux des changements de comportement en matière d'utilisation de l'eau chez les producteurs de blé du périmètre irrigué de Hartbeespoort, en Afrique du Sud.

Afin de réaliser cet objectif, on a utilisé différents méthodes et outils tels qu'une enquête, une matrice de comptabilité sociale, des données secondaires, une version étendue de la théorie du comportement planifié, un modèle d'équations structurelles, le modèle AquaCrop et une analyse d'équilibre partiel. L'adaptation à la variabilité climatique est influencée par des facteurs psychologiques et contextuels. Les attitudes déterminent les intentions d'adopter des pratiques d'adaptation, tandis que le soutien institutionnel et juridique renforce les normes sociales qui encouragent l'adaptation. Les risques perçus découlant de pressions telles que les délestages et les tarifs affectent les intentions et renforcent le sentiment de contrôle d comportement. Les facteurs techniques renforcent ces intentions, ce qui indique que l'accès aux ressources techniques favorise l'adoption de comportements adaptatifs. Cela implique que les agriculteurs adoptent des stratégies lorsqu'ils perçoivent les risques comme graves, disposent des moyens techniques pour agir et bénéficient d'un soutien institutionnel.

Les résultats du modèle AquaCrop et du modèle d'équilibre partiel montrent un impact minime sur les rendements en cas d'adaptation partielle, mais des augmentations significatives en cas d'adaptation totale, y compris une hausse de la production de blé, une augmentation de la rémunération de la main-d'œuvre en Afrique du Sud et une hausse significative des revenus des ménages dans la province du Nord-Ouest, ainsi que des revenus des institutions. Ces résultats confirment que dans le cadre des conditions psychologiques et structurelles favorables, une adaptation complète améliore la productivité et donne lieu aux avantages socio-économiques répandus, ce qui réunit des arguments irréfutables en faveur de l'investissement dans la résistance climatique à long terme.

Mots-clés : Périmètre irrigué de Hartbeespoort; AquaCrop; Soutien institutionnel et juridique; Ressources techniques; Revenu des ménages.

A NEW GUIDE ON CONTROLLED DRAINAGE: IMPROVING WATER MANAGEMENT, CROP PRODUCTIVITY AND ENVIRONMENTAL OUTCOMES IN BOREAL AGRICULTURE

NOUVEAU GUIDE SUR LE DRAINAGE CONTRÔLÉ : AMÉLIORATION DE LA GESTION DE L'EAU, DE LA PRODUCTIVITÉ AGRICOLE ET DES RÉSULTATS ENVIRONNEMENTAUX DANS L'AGRICULTURE BORÉALE

Häggblom[1], O., Haho[2], A., [1]Mäkelä M., Luoma T[3].

ABSTRACT

Controlled drainage (CD) and subsurface irrigation (SI) have gained increasing attention in Finland as multifunctional water management practices capable of improving crop productivity while simultaneously reducing environmental pressures. In boreal agriculture, these practices are particularly relevant due to short growing seasons, high winter and spring runoff, and increasing risks of summer drought under climate change. Finland, located at the northern limit of large-scale field crop production, has a long tradition of artificial drainage: approximately 85 % of agricultural land requires drainage to remain productive, with subsurface drainage covering an estimated 60–70 % of the cultivated area.

This paper presents and analyses a newly published Finnish Guide on Controlled Drainage and Subsurface Irrigation, developed by the Association for Nature Management Education Luoko ry in collaboration with the Finnish Field Drainage Association. Rather than introducing new experimental results, the paper focuses on the guide's development process, structure, and content, as well as its role as a practical decision-support tool for farmers, drainage designers, advisors, and policymakers. The guide synthesises decades of national and international research together with Finnish field experience across mineral soils, peat soils, and acid sulfate soils—three soil groups with distinct hydrological behaviour and environmental sensitivity.

The paper—and the guide itself—aim to translate scientific knowledge into practical recommendations, integrate agronomic and environmental objectives, and emphasise the importance of site-specific conditions in the planning of controlled drainage. Particular attention is given to groundwater-level and runoff regulation as a means to reduce nutrient losses, mitigate greenhouse gas emissions from cultivated peat soils, and improve resilience to both excess water and drought. The relevance of the guide beyond Finland is also discussed, highlighting its applicability to boreal and temperate regions facing similar climatic challenges.

The paper concludes that practice-oriented guidelines play a crucial role in bridging the gap between research and implementation, and that the Finnish guide provides a transferable framework for climate-resilient agricultural water management.

Keywords: controlled drainage; subsurface irrigation; boreal agriculture; agricultural water management; climate adaptation; peat soils; acid sulfate soils.

RESUME

Le drainage contrôlé (DC) et l'irrigation souterraine (IS) attirent plus d'attention en Finlande en tant que pratiques multifonctionnelles de gestion de l'eau, capables d'améliorer la productivité agricole tout en réduisant les pressions sur l'environnement. Dans le contexte de l'agriculture

1 Finnish Field Drainage Association, Simonkatu 12 A 11, 00100 Helsinki, Finland
2 Association for Nature Management Education Luoko ry, Simonkatu 12 A 11, 00100 Helsinki, Finland
3 Helsinki University, Faculty of Agriculture and Forestry, Latokartanonkaari 5 ja 7, P.O. Box 27, Finland

boréale, ces pratiques sont particulièrement pertinentes en raison de la brièveté des saisons de croissance, des ruissellements importants en hiver et au printemps, ainsi que des risques croissants de sécheresse estivale liés au changement climatique. La Finlande, située à l'extrémité nord de la culture de plein champ à grande échelle, possède une longue tradition de drainage artificiel : environ 85% des terres agricoles nécessitent un drainage pour rester productives, le drainage souterrain couvrant, selon les estimations, 60 à 70% de la superficie cultivée.

Cet article présente et analyse un guide finlandais récemment publié sur le drainage contrôlé et l'irrigation souterraine, élaboré par l'Association de l'éducation sur la gestion de la nature « Luoko ry » en collaboration avec l'Association finlandaise sur le drainage des terres agricoles. Plutôt que de présenter de nouveaux résultats expérimentaux, cet article met l'accent sur le processus d'élaboration, la structure et le contenu du guide, ainsi que sur son rôle en tant qu'outil pratique d'aide à la décision à l'intention des agriculteurs, des concepteurs de systèmes de drainage, des conseillers et des décideurs politiques. Ce guide synthétise des décennies de recherche nationale et internationale, ainsi que l'expérience finlandaise menée sur le terrain concernant les sols minéraux, les sols tourbeux et les sols sulfatés acides — trois groupes de sols présentant un comportement hydrologique et une sensibilité environnementale distinctes.

Cet article — tout comme le guide lui-même — vise à traduire les connaissances scientifiques en recommandations pratiques, à intégrer les objectifs agronomiques et environnementaux, et à souligner l'importance des conditions spécifiques à chaque site dans la planification d'un drainage contrôlé. Une attention particulière est accordée à la régulation du niveau des eaux souterraines et du ruissellement afin de réduire les pertes en nutriments, d'atténuer les émissions de gaz à effet de serre provenant des sols tourbeux cultivés et d'améliorer la résistance face à l'excès d'eau et à la sécheresse. La pertinence du guide au-delà de la Finlande est également abordée, en mettant l'accent sur son applicabilité aux régions boréales et tempérées confrontées à des défis climatiques similaires. L'article conclut que les lignes directrices axées sur la pratique jouent un rôle essentiel pour combler l'écart entre la recherche et la mise en œuvre, et que le guide finlandais fournit un cadre transmissible pour une gestion de l'eau agricole résistante climatique.

Mots-clés : Drainage contrôlé; Irrigation souterraine; Agriculture boréale; Gestion de l'eau agricole; Adaptation au climat; Sols tourbeux; Sols sulfatés acides.

ASALEE, A TOOL FOR CO-DESIGNING WATER RESILIENT CROPPING SYSTEM UNDER CLIMATE CHANGE

ASALEE, UN OUTIL DE CO-CONCEPTION DE SYSTÈMES DE CULTURE RÉSILSTANTE À L'EAU FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Gendre Sophie[1]., Pasquier D.[2] and Marguerie M.[3]

ABSTRACT

Climate change is profoundly reshaping agricultural production systems worldwide by altering precipitation regimes, increasing the frequency and intensity of droughts, and aggravating crop water stress.

In this context, the decision-support tool ASALEE, developed by ARVALIS, provides an innovative framework for comparing crop rotation strategies in relation to water resource availability. ASALEE integrates a water balance model, plant phenology models, crop-specific water-response functions, irrigation rules, soil characteristics, and historical or projected climatic data (including scenarios from DRIAS), coupled with an economic assessment module enabling simulation of crop margins under 500 price scenarios.

Overall, the ASALEE tool represents a powerful platform for integrating biophysical modeling, economic analysis, and participatory design to support the co-development of water-resilient cropping systems in a context of accelerating climate change.

Keywords: Climate change; soil characteristics; historical climatic data; biophysical modeling; economic analysis.

RESUME

Le changement climatique transforme profondément les systèmes de production agricole à l'échelle mondiale en modifiant les régimes pluviométriques, en augmentant la fréquence et l'intensité des sécheresses et en aggravant le stress hydrique des cultures.

Dans ce contexte, l'outil d'aide à la décision ASALEE, développé par ARVALIS, offre un cadre innovant pour comparer les stratégies de rotation des cultures à l'égard de la disponibilité des ressources en eau. ASALEE intègre un modèle de bilan hydrique, des modèles de phénologie végétale, des fonctions de réponse à l'eau spécifiques aux cultures, des règles d'irrigation, des caractéristiques des sols et des données climatiques historiques ou projetées (y compris des scénarios issus de DRIAS), associés à un module d'évaluation économique assurant la simulation des marges des cultures selon 500 scénarios de prix. Dans l'ensemble, l'outil ASALEE constitue une plateforme puissante permettant d'intégrer la modélisation biophysique, l'analyse économique et la conception participative afin de soutenir le co-développement de systèmes de culture résistante à l'eau dans un contexte de changement climatique persistant.

Mots clés : Changement climatique; Caracteristiques des sols; Données climatiques historiques; Modélisation biophysique; Analyse économique.

1 Arvalis, 110 chemin de la côte vieille 31450 Baziège, France Email: s.gendre@arvalis.fr
2 Arvalis, Boigneville, France Email: d.pasquier@arvalis.fr
3 Arvalis, Gréoux-les-Bains, France Email: m.marguerie@arvalis.fr

CAN WATER STORAGE FOSTER TERRITORIAL AGROECOLOGICAL TRANSITIONS IN A WATER-STRESSED AREA?

EST-CE QUE LE STOCKAGE DE L'EAU PEUT ENCOURAGER LES TRANSITIONS AGROÉCOLOGIQUES TERRITORIALES DANS UNE ZONE SOUMISE À UN STRESS HYDRIQUE?

Hugo Charoud[1], Marielle Montginoul[2] and Marcel Kuper[3]

ABSTRACT

The relationship between agroecological transitions and the sharing of water is central for irrigated territories, as water access is a core element of farm productivity and resilience. This makes the equitable sharing of water a major driver of both agricultural dynamics and agroecological transitions of the larger territory, especially as climate change negatively impacts water needs and access.

To address these challenges, "substitution" reservoirs are widely considered in countries like France. These highly contested forms of storage are heterogeneous in terms of size, type of water inflow, governance and intended use. They are built to procure water during high-flow periods (typically autumn and winter) either to substitute for withdrawals during lowflow periods, to provide security against potential droughts, or to increase the volume of water available for irrigated agriculture.

The objective of this paper is to understand how various storage projects affect the dynamics of agroecological transitions in irrigated agricultural territories, using the Drôme Valley (France) as case study. It is a prominent irrigated area where storage development and agroecological transition dynamics are both pronounced. Public actors and a segment of the local civil society share an ambition to create an agroecological territory, whether through local agricultural policies or watershedscale watermanagement policies. We show that these infrastructures have heterogeneous impacts on agricultural dynamics. If larger storage projects tend to promote the preservation of highly capitalized and water dependent farms, small-scale reservoir have allowed to sustain agroecological transition dynamic in the regions. This study offers insights on how to create an institutional framework that enables the development of storage facilities to support the agroecological transition.

Keywords: Water storage; farm productivity; agricultural dynamics; agroecological transitions; small-scale reservoir.

RESUME

La relation entre les transitions agroécologiques et le partage de l'eau est cruciale pour les territoires irrigués, car l'accès à l'eau est un élément essentiel de la productivité et de la résistance des exploitations agricoles. Cela fait du partage équitable de l'eau une force majeure tant de la dynamique agricole que des transitions agroécologiques à l'échelle du territoire dans son ensemble, d'autant plus que le changement climatique exerce un impact négatif sur les besoins en eau et l'accès à celle-ci.

1 G-EAU, Univ Montpellier, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France, Email: hugo.charoud@inrae.fr

2 G-EAU, Univ Montpellier, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France, Email: Marielle.montginoul@inrae.fr

3 G-EAU, Univ Montpellier, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France, Email: Marcel.kuper@cirad.fr

Afin de relever ces défis, les réservoirs de «substitution» sont largement tenus en compte dans les pays comme la France. Ces formes de stockage très controversées sont hétérogènes en termes de taille, de type d'apport en eau, de gouvernance et d'utilisation prévue. Elles sont construites pour capter de l'eau pendant les périodes de débit élevé (généralement l'automne et l'hiver), soit pour compenser les prélèvements effectués pendant les périodes de faible débit, soit pour offrir une sécurité contre l'éventuelles sécheresses, soit encore pour augmenter le volume d'eau disponible pour l'agriculture irriguée.

Cet article vise à comprendre la manière dont divers projets de stockage exercent des impacts sur la dynamique des transitions agroécologiques dans les territoires agricoles irrigués, en prenant en compte l'étude de cas menée dans la vallée de Drôme (France). Il s'agit d'une zone irriguée importante où le développement des infrastructures de stockage et la dynamique de transition agroécologique sont tous deux marqués. Les acteurs publics et une partie de la société civile locale partagent l'ambition de créer un territoire agroécologique, que ce soit par le biais de politiques agricoles locales ou de politiques de gestion de l'eau à l'échelle du bassin versant.

Nous montrons que ces infrastructures exercent des impacts hétérogènes sur les dynamiques agricoles. Si les grands projets de stockage tendent à encourager la préservation d'exploitations agricoles fortement capitalisées et dépendantes de l'eau, les réservoirs à petite échelle ont permis de soutenir la dynamique de transition agroécologique dans ces régions. Cette étude fournit un aperçu sur la manière de créer un cadre institutionnel permettant le développement d'infrastructures de stockage favorisant la transition agroécologique.

Mots-clés : Stockage de l'eau; Productivité agricole; Dynamiques agricoles; Transitions agroécologiques; Réservoirs à petite échelle.

RETHINKING IRRIGATION AND DRAINAGE MODERNIZATION FOR AGROECOLOGICAL TRANSITIONS UNDER CLIMATE CHANGE: LESSONS FROM LAO PDR

REPENSER LA MODERNISATION DE L'IRRIGATION ET DU DRAINAGE POUR LES TRANSITIONS AGROÉCOLOGIQUES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : LEÇONS TIRÉS DE LA RDP DU LAOS

Matthew Mccartney[1], Fergus Sinclair[2,3] Sarah Freed[4], Michaela Lo[5], Thatheva Saphangthong[6], Somphasith Douangsavanah[7] and Mark Dubois[8]

ABSTRACT

Agroecology is increasingly promoted as a pathway toward more resilient and sustainable food systems, yet irrigation and drainage have rarely been treated as central to agroecological transition. This paper examines how the 13 HLPE agroecological principles can reshape irrigation modernization in Lao PDR, which has been central to rice self-sufficiency and rural development but now faces mounting technical, financial, institutional, and environmental challenges including water user groups (WUGs) not functioning effectively. The analysis shows that modernization should be understood not simply as infrastructure rehabilitation or expansion, but as a broader rethinking of how water is governed, delivered, and integrated into agroecosystems under climate change. This paper highlights, in Lao PDR, the need to distinguish between small, community-based upland systems and larger, pump-dependent lowland schemes, because they face different hydrological, economic, and governance challenges. Across both upland and lowland schemes, inadequate water management, associated with inadequate operation and maintenance remains a major cause of under-utilization and poor performance. In the upland schemes modernization depends on storage, watershed condition, and locally adapted management; in the lowland schemes, it depends more on improving pumping efficiency, financial viability, and ecological performance in larger canal systems. Reinterpreting irrigation through the HLPE principles shows that a more coherent modernization agenda must go beyond efficiency to include recycling, biodiversity, soil and water stewardship, diversification, participation, fairness, and stronger land and natural resource governance. The paper argues that irrigation and drainage are not peripheral to agroecological transition, but central to building climate resilience from productive and biodiverse landscapes, promoted by inclusive rural development in line with the current Lao PDR food system transformation and agroecology action plans.

Keywords: Agroecology; climate change; water user groups (WUGs); environmental challenges; climate resilience; canal systems.

RESUME

L'agroécologie est de plus en plus présentée comme une voie vers des systèmes alimentaires plus résistants et durables, mais l'irrigation et le drainage ont rarement été considérés comme des éléments centraux de la transition agroécologique. Cet article examine la manière dont

1 International Water Management Institute, 127, Sunil Mawatha, Battaramulla, Colombo, Sri Lanka, Email:m.mccartney@cgiar.org
2 School of Natural and Environmental Sciences, Bangor University, UK Email: f.l.sinclair@bangor.ac.uk
3 Transformative Partnership Platform on Agroecology, Nairobi, Kenya
4 Independent consultant, Nairobi, Kenya. Email: sarahjfreed@gmail.com
5 Durrell Institute of Conservation and Ecology, Univ. of Kent, Canterbury, UK Email: M.Lo@kent.ac.uk
6 Department of Land Administration and Management, Vientiane, Lao PDR Email: thatheva@gmail.com
7 International Water Management Institute, Vientiane, Lao PDR Email: S.Douangsavanh@cgiar.org
8 International Water Management Institute, Vientiane, Lao PDR Email: m.dubois@cgiar.org

les 13 principes agroécologiques du HLPE peuvent redéfinir la modernisation de l'irrigation en République démocratique populaire du Laos, qui a joué un rôle central dans l'autosuffisance rizicole et le développement rural, mais qui aujourd'hui fait face à des défis techniques, financiers, institutionnels et environnementaux croissants, notamment le dysfonctionnement des groupes d'usagers de l'eau (WUG). L'analyse montre que la modernisation ne doit pas être perçue uniquement comme la réhabilitation ou l'extension des infrastructures, mais comme une refonte plus large de la manière dont l'eau est gérée, distribuée et intégrée dans les agroécosystèmes dans le contexte du changement climatique. Cet article souligne que dans la RDP du lao, la nécessité est ressentie de distinguer les petits systèmes communautaires des hautes terres des grands périmètres des basses terres dépendant du pompage, car ils sont confrontés à des défis hydrologiques, économiques et de gouvernance différents. Tant dans les systèmes d'irrigation de hautes terres et de basses terres, une gestion insuffisante de l'eau, associée à une exploitation et à un entretien inadéquats, reste une cause majeure de sous-utilisation et de mauvaises performances. Dans les systèmes de hautes terres, la modernisation dépend du stockage, de l'état des bassins versants et d'une gestion adaptée aux conditions locales; dans les systèmes de basses terres, elle dépend davantage de l'amélioration de l'efficacité du pompage, de la viabilité financière et des performances écologiques dans les grands systèmes de canaux. Une réinterprétation de l'irrigation à la lumière des principes du HLPE montre qu'un programme de modernisation plus cohérent doit aller au-delà de l'efficacité pour intégrer le recyclage, la biodiversité, la gestion responsable des sols et de l'eau, la diversification, la participation, l'équité ainsi qu'une gouvernance renforcée des terres et des ressources naturelles. Cet article soutient le fait que l'irrigation et le drainage ne sont pas des éléments périphériques de la transition agroécologique, mais qu'ils sont essentiels pour le renforcement de la résistance climatique grâce à des paysages productifs et riches en biodiversité, favorisés par un développement rural inclusif, conformément à la transformation actuelle du système alimentaire de la RDP du Laos et aux plans d'action en matière d'agroécologie.

Mots-clés : Agroécologie; Changement climatique; Groupes d'usagers de l'eau (GUE); Défis environnementaux; Résistance climatique; Systèmes de canaux.

CLIMATE INFORMATION SERVICES TO AGRO-PASTORALIST SMALLHOLDERS IN UGANDA'S SEMI-ARID CATTLE CORRIDOR

SERVICES D'INFORMATION CLIMATIQUE À L'INTENTION DES PETITS EXPLOITANTS AGRO-PASTORAUX DU «COULOIR D'ÉLEVAGE» SÉMI-ARIDE DE L'OUGANDA

Wilson Okaka[1], Wilberforce Okongo[2] and Joseph Rwothumio[3]

ABSTRACT

Uganda's Cattle Corridor spans 29 districts and supports approximately 60–70% of the national cattle herd and nearly 40% of cereal production. The region receives 500–800 mm of annual rainfall and experiences 3–5 drought episodes per decade, alongside temperature increases of 0.8–1.2°C since 1960. Despite increasing climate risks, only 35–45% of agro-pastoralist smallholders consistently access Climate Information Services (CIS), including seasonal forecasts, ten-day advisories, and early warning alerts. Climate variability contributes to annual crop losses of 15–30% and pasture deficits of 20–40%, while irrigation adoption remains low at 18–25%. This study assessed the effectiveness of CIS in promoting irrigation adoption, agro ecological transition, and climate resilience. Guided by Diffusion of Innovation Theory and a Theory of Change framework, the study employed a systematic literature review of 120 studies published between 2010 and 2025, analysis of 15 policy documents, and evidence from Uganda–Netherlands–Kenya pilot partnerships involving 1,200 households. Integrated interventions included solar-powered irrigation, drip irrigation kits, drought-tolerant seeds, climate advisories, and index-based insurance delivered through Public–Private–Community Partnerships. Results indicate that CIS-enabled irrigation increased dry-season crop yields by 35%, pasture biomass by 28%, and household incomes by 32%. Women-led groups achieved 40% higher loan repayment rates, while localized climate advisories improved planting accuracy by 25%. Soil organic carbon increased by 0.4%, and overgrazing declined by 18%. However, maintenance financing, forecast localization, and watershed governance remain challenges. The study concludes that integrated CIS–irrigation packages significantly strengthen climate resilience, improve water productivity, and accelerate agro ecological transformation in Uganda's semi-arid cattle corridor. Scaling localized forecasting systems, strengthening policy coherence, promoting gender-responsive financing, and institutionalizing Public–Private–Community Partnerships are essential for sustainable climate-smart agricultural development.

Keywords: agro ecological transition; climate resilience; annual crop losses; agro ecological transformation; water productivity.

RESUME

Le «couloir d'élevage» ougandais s'étend sur 29 districts et abrite environ 60 à 70% du cheptel national ainsi que près de 40% de la production céréalière. La région reçoit entre 500 et 800 mm de précipitations annuelles et connaît 3 à 5 épisodes de sécheresse par décennie, parallèlement à une hausse de température de 0,8 à 1,2 °C depuis 1960. En dépit d'une augmentation des risques climatiques,

1 School of Education, Kyambogo University, P.O. Box 1, Kyambogo, Uganda, Email: wokaka65@gmail.com

2 School of Education, EPM Department, Kyambogo University, Kyambogo, Uganda, Email: jrwothumio@kyu.ac.ug

3 School of Education, EPM Department, Kyambogo University, Kyambogo, Uganda, Email: okongo2000@gmail.com

seuls 35 à 45% des petits exploitants agro-pastoraux ont un accès régulier aux services d'information climatique (CIS), notamment aux prévisions saisonnières, aux bulletins à dix jours et aux alertes précoces. La variabilité climatique cause des pertes annuelles de récoltes de 15 à 30% et des déficits de pâturages de 20 à 40%, tandis que l'adoption de l'irrigation reste faible, entre 18 et 25%. Cette étude a évalué l'efficacité des CIS dans la promotion de l'adoption de l'irrigation, de la transition agroécologique et de la résistance climatique. S'appuyant sur la théorie de la diffusion de l'innovation et un cadre de «théorie du changement», l'étude a utilisé une revue systématique de la littérature portant sur 120 études publiées entre 2010 et 2025, l'analyse de 15 documents d'orientation, ainsi que des données provenant de partenariats pilotes entre l'Ouganda, les Pays-Bas et le Kenya impliquant 1 200 ménages. Les interventions intégrées comprenaient l'irrigation à énergie solaire, des kits d'irrigation goutte-à-goutte, des semences résistantes à la sécheresse, des conseils climatiques et une assurance indexée, mis en œuvre dans le cadre de partenariats entre les secteurs public, privé et communautaire. Les résultats indiquent que l'irrigation facilitée par le CIS a permis d'augmenter de 35% les rendements agricoles pendant la saison sèche, de 28% la biomasse des pâturages et de 32% les revenus des ménages. Les groupes dirigés par des femmes ont affiché des taux de remboursement des prêts supérieurs de 40%, tandis que les conseils climatiques localisés ont amélioré la précision des semis de 25%. Le taux de carbone organique du sol a augmenté de 0,4% et le surpâturage a diminué de 18%. Cependant, le financement de l'entretien, la localisation des prévisions et la gouvernance des bassins versants restent des défis à relever. L'étude conclut que les programmes intégrés associant le CIS et l'irrigation renforcent considérablement la résistance climatique, améliorent la productivité de l'eau et accélèrent la transformation agroécologique dans le couloir d'élevage semi-aride de l'Ouganda. La mise en échelle des systèmes de prévisions localisées, le renforcement de la cohérence des politiques, la promotion d'un financement tenant compte des questions de genre et l'institutionnalisation des partenariats public-privé-communautaire sont essentiels pour un développement agricole durable et adapté au climat.

Mots-clés : Transition agroécologique; Résistance au climat; Pertes de cultures annuelles; Transformation agroécologique; Productivité de l'eau.

CLIMATE-DRIVEN SERVICE RESILIENCE IN PRESSURISED IRRIGATION SYSTEMS

RÉSISTANCE DES SERVICES FACE AU CLIMAT DANS LES SYSTÈMES D'IRRIGATION SOUS PRESSION

Ferreira A[1]., Rolim J. [2] and Cameira MR. [3]

ABSTRACT

Pressurised collective irrigation systems (CIS) in Mediterranean regions are increasingly exposed to climate-driven stress arising from reduced water availability, higher irrigation demand, and more concentrated peak demand. This work develops a performance-based approach for assessing service-level resilience in reservoir-fed, pressurised CIS, focusing on conveyance and distribution performance, as well as pumping and energy resilience. The framework is applied to the Minutos CIS in southern Portugal under a business-as-usual adaptation pathway, considering RCP4.5 and RCP8.5 for the 2041–2070 and 2071–2100. Climate-driven changes in irrigation demand are translated into hydraulic operating conditions and evaluated through hydraulic modelling of pressure adequacy at hydrants under peak-demand conditions. Service resilience is quantified performance-based indicators, then normalised onto a common 0–1 resilience scale.

Results show that, under current conditions, the system satisfies pressure requirements across most hydrants. However, future increases in irrigation demand become increasingly critical under peak-demand conditions, particularly under late-century RCP8.5. In this scenario, approximately 20% of hydrants experience pressure failures, although the most severe impacts are concentrated in a smaller subset of hydrants. At these critical locations, pressure-failure frequency may exceed 52%, while, in the most constrained cases, failures occur in all simulated hydrant-opening events, with mean pressure deficits reaching 17–20 m. Energy resilience also weakens, with energy use increasing to 1,059 kWh ha^{-1}. Normalised results show a decline in hydraulic service resilience from 0.76 to 0.48, while pumping and energy resilience decreases from 0.71 to 0.57. The integrated conveyance–energy score falls to 0.52, indicating reduced hydraulic and energy safety margins rather than system-wide failure.

Keywords: resilience assessment, pressurised systems, service reliability, water-energy nexus, demand flexibility.

RESUME

Les systèmes d'irrigation collectifs (CIS) sous pression des régions méditerranéennes sont de plus en plus exposés à des contraintes liées au climat, résultant d'une disponibilité en eau réduite, d'une demande d'irrigation plus élevée et d'une demande maximum concentrée**.** Ce travail développe une approche basée sur la performance pour évaluer la résistance au niveau du service dans les CIS sous pression alimentés par des réservoirs, en mettant l'accent sur les performances de transport et de distribution, ainsi que sur la résistance en matière de pompage et d'énergie. Le cadre est appliqué au CIS de Minutos, au sud du Portugal, selon une trajectoire d'adaptation «activités habituelles», en tenant compte des scénarios RCP4.5 et RCP8.5 pour les périodes 2041–2070 et 2071–2100. Les changements de la demande en irrigation induits par le climat sont traduits en conditions d'exploitation hydrauliques et

1 LEAF, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa (ISA/UL), Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisbon, Portugal. Email: aferreira@isa.ulisboa.pt
2 LEAF and Associated Laboratory TERRA, ISA/UL. Email: joaorolim@isa.ulisboa.pt
3 LEAF and Associated Laboratory TERRA, ISA/UL. Email: roscameira@isa.ulisboa.pt

évalués par une modélisation hydraulique de l'adéquation de la pression sur les prises d'eau dans les conditions de demande maximum. La résistance du service est quantifiée à l'aide des indicateurs basés sur les performances, puis normalisée sur une échelle de résistance commune de 0 à 1.

Les résultats montrent que, dans les conditions actuelles, le réseau répond aux exigences de pression pour la plupart des prises d'eau. Cependant, les augmentations futures de la demande d'irrigation deviennent de plus en plus critiques dans la période de demande maximum, en particulier dans le scénario RCP8.5 prévu pour la fin du siècle. Dans le cadre de ce scénario, environ 20% des prises d'eau subissent des défaillances de pression, bien que les impacts les plus graves se concentrent sur un sous-ensemble plus restreint de prises d'eau. À ces emplacements critiques, la fréquence des défaillances de pression peut dépasser 52%, tandis que, dans les cas les plus contraints, des défaillances surviennent lors de toutes les simulations d'ouverture de prises d'eau, avec des déficits de pression moyens atteignant 17 à 20 m. La résistance s'affaiblit également, la consommation d'énergie augmentant à réaliser 1 059 kWh ha^{-1}. Les résultats normalisés indiquent une baisse de la résistance du service hydraulique, qui passe de 0,76 à 0,48, tandis que la résistance du pompage et de l'énergie diminue de 0,71 à 0,57. Le plan intégré «transport-énergie» tombe à 0,52, ce qui indique une réduction des marges de sécurité hydrauliques et énergétiques plutôt qu'une défaillance à l'échelle du système.

Mots-Cles : Evaluation de la Résistance; Systèmes sous pression; Fiabilité du service; Liens entre Eau-Energie; Flexibilité de la demande.

WHICH IRRIGATION DEVELOPMENT PATHWAYS CAN SUPPORT SUSTAINABLE FARMING? A CAMBODIAN CASE STUDY

QUELLES STRATÉGIES DE DÉVELOPPEMENT DE L'IRRIGATION PEUVENT SOUTENIR UNE AGRICULTURE DURABLE ? UNE ÉTUDE DE CAS MENEE AU CAMBODGE

Titouan Filloux [1,2], Myriam Adam [1,3,4,5], Florent Tivet [6,7,8], Jean-Philippe Venot [2], Phirum Or [9]

ABSTRACT

The development of irrigation is widely regarded as a key lever for agriculture and rural development, while also being a cornerstone of Green Revolution trajectories that are now associated with economic concerns (below-expected profitability, indebtedness), social concerns (inequities & health issues) and environmental concerns (soil and water quality degradation, loss of biodiversity). Rice farming has long been a core component of irrigated agriculture development policies in Southeast Asia since the 1960s. In Cambodia, water-based intensification and related practices (double or triple cropping seasons, High Yielding Varieties, use of synthetic inputs, mechanization) have emerged relatively recently (circa the late 1990s). This article draws on an empirical case study from an irrigated rice-growing scheme in Battambang province, north-west Cambodia, that has gone through several stages of rehabilitation since the 2010s, and where numerous initiatives promoting sustainable agriculture and collective water management are taking place. We examined how irrigation development in a formerly rainfed area has shaped agricultural trajectories and influenced the prospects for adopting more sustainable farming practices.

The results show that the simultaneous development of irrigation infrastructure and the related structuring of value chains has reinforced a Green Revolution model of agriculture. The shift from rain-fed subsistence farming to high-input/high-output irrigated systems has substantially increased productivity, while also generating growing concerns about sustainability of farmers' livelihoods. Recent initiatives promoting sustainable rice growing and collective water management, designed to address key constraints faced by farmers, were initially well received, but have not yet triggered a significant reorientation of agricultural trajectories. We argue that irrigation development requires a paradigm shift from infrastructure-led approaches toward resilience, sustainability and agroecology-oriented approaches, to avoid locking agriculture into unsustainable and destructive pathways.

Keywords: environmental concerns; loss of biodiversity; sustainable agriculture; water-based intensification; agroecology-oriented approaches.

1 Cirad, UMR AGAP Institute, Montpellier, France
2 UMR G-EAU, IRD, University of Montpellier, Montpellier, France
3 UMR AGAP Institute, Univ Montpellier, Cirad, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France
4 Faculty of Agriculture and Food Processing, National University of Battambang,Battambang, Cambodia
5 Mekong Institute - Can Tho University, Can Tho, VIETNAM
6 Cambodian Conservation Agriculture Research for Development Centre,Department of Agricultural Land Resources and Fertilizer Management, General Directorate of Agriculture, MAFF, Phnom Penh, Cambodia
7 AIDA, University of Montpellier, CIRAD, Montpellier, France
8 CIRAD, UPR AIDA, Phnom Penh, Cambodia
9 Ecosystem Services and Land Use Research Centre (ECOLAND), Royal University of agriculture, Phnom Penh2696, Cambodia

RESUME

Le développement de l'irrigation est généralement reconnu comme un principal moyen pour l'agriculture et le développement rural, tout en constituant un thème essentiel des trajectoires de la Révolution verte, désormais associées à des préoccupations économiques (rentabilité inférieure aux attentes, endettement), sociales (inégalités et problèmes de santé) et environnementales (dégradation de la qualité des sols et de l'eau, perte de biodiversité). Depuis les années 1960, la riziculture constitue un élément clé des politiques de développement de l'agriculture irriguée en Asie du sud-est. Au Cambodge, l'intensification basée sur l'eau et les pratiques qui y sont liées (double ou triple saisons de culture, variétés à haut rendement, utilisation d'intrants synthétiques, mécanisation) sont apparues relativement récemment (vers la fin des années 1990). Cet article s'appuie sur une étude de cas empirique menée sur un projet de riziculture irriguée dans la province de Battambang, au nord-ouest du Cambodge, qui a connu plusieurs phases de réhabilitation depuis les années 2010 et a fait l'objet de nombreuses initiatives visant à promouvoir l'agriculture durable et la gestion collective de l'eau. Nous avons examiné la manière dont le développement de l'irrigation dans une zone auparavant pluviale a façonné les trajectoires agricoles et influencé les perspectives d'adoption de pratiques agricoles plus durables.

Les résultats montrent que le développement simultané des infrastructures d'irrigation et la structuration des chaînes de valeur ont renforcé le modèle agricole issu de la «Révolution verte». Le passage d'une agriculture de subsistance pluviale à des systèmes irrigués à forts intrants et à haut rendement a considérablement accru la productivité, tout en suscitant des inquiétudes croissantes quant à la durabilité des moyens de subsistance des agriculteurs. Des initiatives récentes visant à promouvoir une riziculture durable et une gestion collective de l'eau, conçues pour remédier aux principales contraintes auxquelles sont confrontés les agriculteurs, ont d'abord été bien accueillies, mais n'ont pas encore donné lieu à l'réorientation significative des trajectoires agricoles. Nous constatons que le développement de l'irrigation nécessite un changement de paradigme, passant d'approches axées sur les infrastructures à des approches orientées vers la résistance, la durabilité et l'agroécologie, afin d'éviter d'enfermer l'agriculture dans des voies non durables et destructrices.

Mots-clés : Préoccupations environnementales; Perte de biodiversité; Agriculture durable; Intensification basée sur l'irrigation; Approches axées sur l'agroécologie.

NUCLEAR WINTER AS THE GREATEST CLIMATE CRISIS FOR HUMANITY AND THE ROLE OF IRRIGATION SCIENTISTS

L'HIVER NUCLÉAIRE, LA PLUS GRANDE CRISE CLIMATIQUE POUR L'HUMANITÉ ET LE RÔLE DES SCIENTIFIQUES EN IRRIGATION

Haruyuki Fujimaki[1]

ABSTRACT

Nuclear winter, caused after a large number of nuclear detonations and subsequent massive fires which inject huge amounts of soot into the stratosphere and blocking solar radiation is the greatest climate crisis humanity is facing. Although the probability of occurrence may be as small as once in thousand years, the expected death toll would be 100 times greater than that of natural disasters. To cope with the most severe famine ever recorded, nations in high-latitude regions need to stockpile food supplies. A recommended stockpile of wheat, soybeans, sugar, and cooking oil—sufficient to meet the energy and protein requirements for one year—costs approximately 460 USD per person in Japan. Implementing a rolling stock and consumption system significantly reduces costs and minimizes food waste. But even with a successful rolling stock and consumption strategy, a three-year stockpile may be the maximum financially sustainable, whereas a nuclear winter could last up to a decade. Even under a nuclear winter, crops may be cultivated in low-latitude and dry regions by shifting from tropical to temperate crops and by growing winter crops during summer. Such a rapid shift in crop cultivation requires bold international cooperation. If trade remains possible, a part of the population in temperate regions could be fed with food produced in tropical drylands. Irrigation may play a key role in alleviating the crisis, as precipitation is also predicted to be significantly reduced in tropical drylands under a nuclear winter. Fossil groundwater should be conserved for the crisis, and equipment for digging wells, pumping water, delivering it through pipelines, and irrigating with high water-use efficiency should also be stockpiled. Water harvesting and saving technologies should be further developed, even if they are not economically feasible during peacetime.

Keywords: nuclear detonations; natural disasters; tropical drylands; Water harvesting; winter crops; international cooperation.

RESUME

L'hiver nucléaire, provoqué par un grand nombre d'explosions nucléaires suivies d'incendies massifs qui injectent d'énormes quantités de suie dans la stratosphère et bloquent le rayonnement solaire, constitue la plus grave crise climatique à laquelle l'humanité est confrontée. Bien que la probabilité qu'il se produise soit aussi faible qu'une fois tous les mille ans, le nombre de victimes attendu serait 100 fois supérieur à celui des catastrophes naturelles. Pour faire face à la famine la plus grave jamais enregistrée, les pays situés dans les régions de hautes latitudes doivent constituer des réserves alimentaires. Les réserves recommandées de blé, de soja, de sucre et d'huile de cuisson — suffisantes pour couvrir les besoins énergétiques et protéiques pendant d'une année — coûtent environ 460 USD par personne au Japon. La mise en place d'un système de stockage et de consommation permet de réduire considérablement les coûts et de minimiser le gaspillage alimentaire.

Mais même avec une stratégie efficace de stockage et de consommation, une réserve couvrant trois ans représente peut-être la limite financièrement viable, alors qu'un hiver nucléaire pourrait durer jusqu'à une décennie. Même en cas d'hiver nucléaire, il est possible de cultiver des plantes dans les régions sèches de basses latitudes en passant des cultures tropicales aux cultures tempérées et en cultivant des cultures hivernales pendant l'été. Une telle transition

1 Arid Land Research Center, Tottori Uiversity, Japan Email: fujimaki@tottori-u.ac.jp

rapide dans les pratiques agricoles nécessite une coopération internationale audacieuse. Si les échanges commerciaux restent possibles, une partie de la population des régions tempérées pourrait être nourrie grâce à des denrées produites dans les zones tropicales sèches. L'irrigation pourrait jouer un rôle clé dans l'atténuation de la crise, car on prévoit également une réduction significative des précipitations dans les zones tropicales sèches en cas d'hiver nucléaire. Les eaux souterraines fossiles doivent être préservées en prévision de la crise, et il convient également de constituer des stocks de matériel permettant de creuser des puits, de pomper l'eau, de l'acheminer par des canalisations et d'irriguer avec une grande efficacité hydrique. Les technologies de collecte et d'économie d'eau doivent être développées davantage, même si elles ne sont pas économiquement viables en temps de paix.

Mots-clés : Explosions nucléaires; Catastrophes naturelles; Zones tropicales sèches; Collecte de l'eau; Cultures hivernales; Coopération internationale.

AGROECOLOGY, IRRIGATION AND INSTITUTIONAL PATHWAYS FOR RESILIENT OASIS AGRICULTURE IN TUNISIA

AGROÉCOLOGIE, IRRIGATION ET VOIES INSTITUTIONNELLES POUR UNE AGRICULTURE OASIENNE RÉSISTANTE EN TUNISIE

Dr. Laure-Elise Mayard[1], Jérémie Hédoin[2], Dr. Fatma Aribi[3] and Nicolas Courtin[4]

ABSTRACT

The oases of southern Tunisia are a vital part of the agricultural and food systems of the country, notably for date production, and they support local economic, social, environmental and cultural life. These unique agroecosystems face major threats, such as climate change, loss in quality and quantity of the North-Western Sahara Aquifer System, and desertification. They require agriculture to evolve and present both efficiency and sustainability. Two dominant agricultural models are often present and opposed: traditional and modern oases, with distinct practices, performances, and trade-offs, raising critical sustainability challenges.

With the need for sustainability, agroecology provides a relevant technical, analytical and governance framework to guide the study of agricultural systems and environmental health. As a paradigm, it encourages synergies between agricultural practices and ecosystem processes, enhancing the regenerative capacity of ecosystems and their resilience, and improving long-term sustainability of resource use.

This article proposes a comparative analysis of traditional and modern oasis systems through the 13 agroecological principles defined by the HLPE (2019). The results highlight that neither model is inherently sustainable: traditional systems face constraints in productivity and water management, whereas modern systems intensify pressure on water resources and weaken ecological balances. Both models therefore require targeted transformations to better align with agroecological principles.

Focusing on water as a transversal and crucial element of oasis agroecosystems, the analysis illustrates the importance of appropriate institutional settings to facilitate agroecological practices. This is visible especially with water governance and a non-renewable fossil aquifer system, where sustainable uses need to be embedded and directed by institutions. The governmental PIHOS project highlighted opportunities in adaptive, bottom-up governance to support sustainable oasis development.

The article offers an example of institutional and governance settings as enabling environment to promote agroecology and sustainability in the oases of southern Tunisia, tackling agroecosystems relying on non-renewable groundwater.

Keywords: agricultural and food systems; sustainable oasis development; agricultural systems; environmental health; water management; water resources; ecological balances.

RESUME

Les oasis du sud de la Tunisie constituent un élément essentiel des systèmes agricoles et alimentaires du pays, notamment pour la production de dattes, et elles soutiennent la vie économique, sociale, environnementale et culturelle locale. Ces agroécosystèmes uniques font face à des menaces majeures, telles que le changement climatique, la dégradation de la

1 Hydroconseil, Avignon, France, mayard@hydroconseil.com
2 Independent Consultant, Malons et Elze, France, jhedoin@yahoo.fr
3 Economy and Rural Societies Laboratory (LR16IRA05), Arid Regions Institute of Medenine, University of Gabès, Medenine 4119, Tunisia; fatmaribi@gmail.com
4 Hydroconseil, Avignon, France, courtin@hydroconseil.com

qualité et la diminution du volume du système aquifère du nord-ouest du Sahara, ainsi que la désertification. Ils exigent une évolution de l'agriculture qui allie efficacité et durabilité. Deux modèles agricoles dominants coexistent souvent et s'opposent : les oasis traditionnelles et modernes, avec des pratiques, des performances et des compromis distincts, ce qui soulève des défis majeurs en matière de durabilité.

Face à ce besoin de durabilité, l'agroécologie offre un cadre technique, analytique et de gouvernances pertinentes pour orienter l'étude des systèmes agricoles et de la santé environnementale. En tant que paradigme, elle favorise les synergies entre les pratiques agricoles et les processus écosystémiques, renforçant ainsi la capacité de régénération des écosystèmes et leur résistance, tout en améliorant la durabilité à long terme de l'utilisation des ressources.

Cet article propose une analyse comparative des systèmes oasiens traditionnels et modernes à la lumière des 13 principes agroécologiques définis par le HLPE (2019). Les résultats mettent en évidence qu'aucun des deux modèles n'est intrinsèquement durable : les systèmes traditionnels se heurtent à des contraintes en matière de productivité et de gestion de l'eau, tandis que les systèmes modernes accentuent la pression sur les ressources en eau et affaiblissent les équilibres écologiques. Les deux modèles nécessitent donc des transformations ciblées afin de mieux s'aligner sur les principes agroécologiques.

En mettant l'accent sur l'eau en tant qu'élément transversal et crucial des agroécosystèmes des oasis, l'analyse illustre l'importance de cadres institutionnels appropriés pour faciliter les pratiques agroécologiques. Cela est particulièrement visible dans le domaine de la gouvernance de l'eau et dans le cas d'un système aquifère fossile non renouvelable, où les usages durables doivent être intégrées et orientées par les institutions. Le projet gouvernemental PIHOS a mis en évidence les opportunités offertes par une gouvernance adaptative et ascendante pour soutenir le développement durable des oasis.

Cet article présente un exemple de cadre institutionnel et de gouvernance constituant un environnement favorable à la promotion de l'agroécologie et de la durabilité dans les oasis du sud de la Tunisie, en traitant la question des agroécosystèmes dépendant d'eaux souterraines non renouvelables.

Mots-clés : Systèmes agricoles et alimentaires; Développement oasien durable; Systèmes agricoles; Santé environnementale; Gestion de l'eau; Ressources en eau; Equilibres écologiques.

QUESTION 67

INNOVATIVE TECHNOLOGY AND PRACTICES FOR INCREASING WATER USE EFFICIENCY. IRRIGATION MANAGEMENT AND SERVICES, REMOTE SENSING, IRRIGATION EQUIPMENT, ... WHERE DO WE STAND?

TECHNOLOGIES ET PRATIQUES INNOVANTES POUR ACCROÎTRE L'EFFICACITÉ DE L'UTILISATION DE L'EAU : GESTION ET SERVICES D'IRRIGATION, TÉLÉDÉTECTION, MATÉRIEL D'IRRIGATION,... OÙ EN SOMMES-NOUS ?

GENERAL REPORTER / RAPPORTEUR GÉNÉRAL

Maher Salman (FAO)

PANEL OF EXPERTS / GROUPE D'EXPERTS

Dr. Bruno Cheviron (France)

Prof.Dr. Gilles Belaud (France)

Dr. Wang Zhen (China)

Dr. Eva Pek (FAO)

Dr. Vivek Kapadia (India)

Prof. Kuo-Wei Liao (Chinese Taipei)

Prof. Miguel Ángel Moreno Hidalgo (Spain)

Engr. Prof. Henry Igbadun (Nigeria)

Prof. Mykhailo Romashchenko (Ukraine)

Prof.Dr. Nutchanart Sriwongsitanon (Thailand)

Prof. Guido D'Urso (Italy)

QUESTION 67:

INNOVATIVE TECHNOLOGY AND PRACTICES FOR INCREASING WATER USE EFFICIENCY. IRRIGATION MANAGEMENT AND SERVICES, REMOTE SENSING, IRRIGATION EQUIPMENT, ... WHERE DO WE STAND?

GENERAL REPORT

Maher Salman (FAO)*
General Reporter

1. INTRODUCTION

Question 67 asks where irrigation stands with respect to innovative technology and practices for increasing water use efficiency, across irrigation management and services, remote sensing and irrigation equipment. The Question is articulated around two complementary scales. Sub-Question 67.1 addresses the plot and farm levels, where irrigation practices and technologies reflect individual skills, objectives, and decisions, and asks how these can be evaluated and improved. Sub-Question 67.2 addresses the territorial scale, where irrigation water management is jointly influenced by agricultural, economic, environmental and regulatory drivers, and asks how the decision-making process can be explained and improved.

The two sub-questions, therefore, trace a single trajectory, from the individual decision at the field edge to the collective decision at scheme, basin, and national levels. The 117 contributions analysed for this report (64 under Q.67.1 and 53 under Q.67.2), from authors and study areas in at least 35 countries (Figure 1), allow a comprehensive answer to the "where do we stand?" of the Question title. Read together, they show a discipline in transition: observation tools that were experimental a decade ago are now operational infrastructure, while the binding constraints on water use efficiency are increasingly institutional, economic and human rather than purely technical.

This report follows the structure of the Question. Section 2 offers a quantitative portrait of the contributions. Section 3 presents the response to Sub-Question 67.1, and Section 4 the response to Sub-Question 67.2, in each case organized by the analytical themes that emerge from the papers rather than paper-by-paper. Every contribution is cited by its R-number at least once. Section 5 draws the transversal reading: convergences, trade-offs, and a four-level reading of the innovations presented; and Section 6 concludes with a synthetic answer to the Question and the recommendations that follow from it.

2. PORTRAIT OF THE CONTRIBUTIONS

The contributions span a wide geographical and methodological range. Contributions originate from Europe (with a strong presence of the host country, France, particularly on territorial water services and Earth Observation), East, South-East and South Asia (China, Thailand, Taiwan, Korea, Japan, Malaysia, Indonesia, India, Pakistan, Nepal, Bangladesh), the Middle East and North Africa (Iran, Jordan, Saudi Arabia, Algeria, Morocco, Tunisia, Türkiye, Egypt), Sub-Saharan Africa (Mali, Senegal, Rwanda, Zimbabwe, South Africa), and the Americas (United States, Canada).

* Senior Land & Water Officer | Agricultural Water Management Team Lead, Adaptation Fund Unit Coordinator, Land and Water Division (NSL) | FAO-UN, Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy, Tel: +39 06 570 54718, E-mail: Maher.Salman@fao.org

117 Papers analysed | 35 Countries with mapped study areas | 101 Study sites on the map

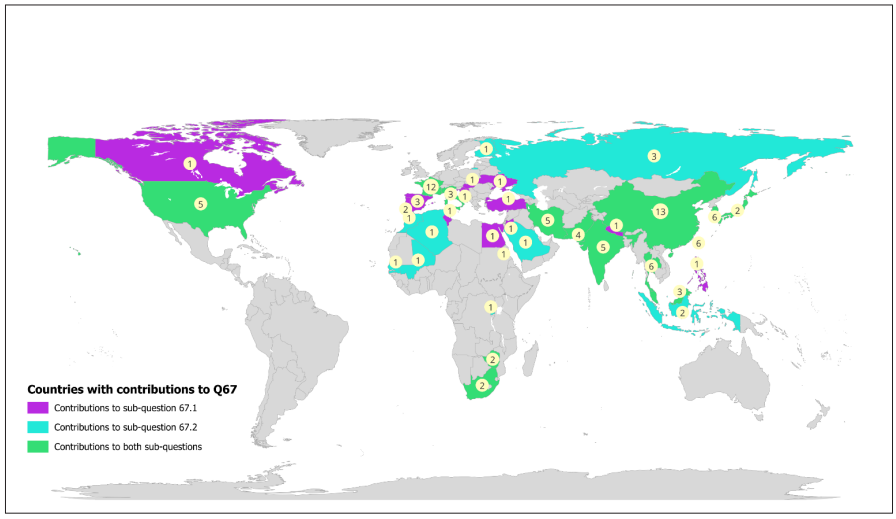


Figure 1. Geography of the contributions to Question 67. Countries are shaded by coverage: contributions to Sub-Question 67.1 (12 countries), to Sub-Question 67.2 (9), or to both (14). Numbers give the papers with study areas in each country. Contributions with global, multi-regional or conceptual scope are not mapped. Representation is at country level; study areas are sub-national and are described in the text.

Methodologically, the single most visible feature across the papers is the maturity of Earth Observation and data-driven approaches: roughly half of all contributions rely on satellite or Unmanned aerial vehicle (UAV) observation, and machine-learning components appear across both sub-questions, from field-scale evapotranspiration and soil moisture retrieval to reservoir storage prediction, flood-loss estimation and basin-scale water accounting. It is noticeable that machine-learning algorithms tends to substitute more and more physically based algorithms which have set the standard for many years. However, comparative analyses of the two approaches are missing, as well as considerations about the transferability of ML approaches in different contexts and even different time frames within the same study area, diversely from physically based approaches which are transferable by definition.

A second, equally significant feature is the weight of institutional, economic and social analysis, which is no longer confined to a residual category but constitutes a coherent body of evidence in both sub-questions.

The geography of Figure 1 calls for two reading notes. The strong French presence largely reflects the host country and should not be read as a thematic signal. More substantively, regional priorities differ in ways that shape the evidence: integration and modernization of water services dominate in Europe, adoption within collective rice systems in South and South-East Asia, scarcity, groundwater stress and salinity in the Middle East and North Africa, and operational information in large, data-constrained systems in Sub-Saharan Africa. Similar technologies appear across the whole map, but the outcomes described depend heavily on the context in which they are applied.

2.1 Key messages at a glance

Six messages summarise the contributions; each is developed in the body of the report.

1. **Observation has become infrastructure:** Satellite-based monitoring of evapotranspiration, irrigated areas and water productivity is now operational at farm and territorial scales, no longer experimental (e.g. R.67.1.01, R.67.1.06, R.67.1.26; R.67.2.02, R.67.2.48, R.67.2.50, R.67.2.53).
2. **Management is shifting from reactive to proactive:** Forecasting (seasonal, sub-seasonal and event-based) enters operational decision chains at every scale (R.67.1.48, R.67.1.53, R.67.1.18; R.67.2.01, R.67.2.05, R.67.2.03).
3. **Technology alone does not save water:** Without institutions, incentives and allocation management that transmit scarcity to users, field-scale efficiency gains do not translate into basin-scale savings (R.67.1.11, R.67.1.16, R.67.1.57, R.67.1.58, R.67.1.63; R.67.2.16, R.67.2.20, R.67.2.37, R.67.2.43).
4. **Co-creation and trust-building drive adoption:** Where tools are designed with their users, namely farmers, water user organisations, irrigation authorities, they are used; where they are delivered, they are abandoned (R.67.1.22, R.67.1.54, R.67.1.61; R.67.2.02, R.67.2.17, R.67.2.18, R.67.2.23).
5. **Economic instruments make scarcity visible:** Volumetric charging, metering institutions and satellite-managed water fees change irrigation behaviour where infrastructure alone does not (R.67.1.35; R.67.2.43, R.67.2.48, R.67.2.07).
6. **Equity and smallholders remain largely unaddressed:** Available technologies are poorly matched to small and marginal farming systems, and the benefit–burden distribution of water services is rarely addressed (R.67.1.33, R.67.1.63; R.67.2.20, R.67.2.21, R.67.2.40).

The six messages compose a single reading grid, used throughout this report. Irrigation decisions. either individual or territorial, are produced along a chain that observes the system, projects its evolution, decides, acts, and accounts for the outcome (Figure 2). The contributions cover every link of this chain: observation and projection are its most mature layers, execution is emerging, and accounting is the thinnest. Around the chain stands governance, with the institutions, incentives and rules that condition every link, and the central finding of this report is that this frame, more than any single link, now determines whether water use efficiency actually improves.

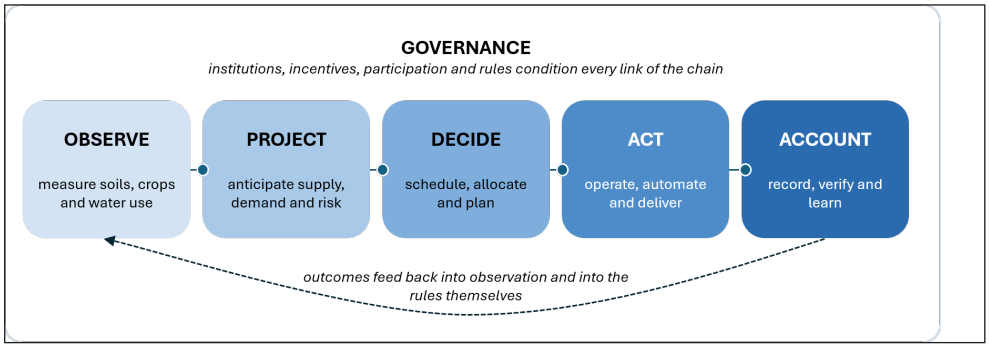


Figure 2. The five-stage decision chain emerging from the contributions, with governance as the cross-cutting frame. Whether observation changes decisions, and whether accounting changes the rules, depends on institutions, incentives and participation

3. SUB-QUESTION 67.1 - IRRIGATION PRACTICES AND TECHNOLOGIES AT THE PLOT AND FARM LEVELS: HOW CAN THESE BE EVALUATED AND IMPROVED?

Farm-level irrigation can now be evaluated with unprecedented precision at falling cost, and the documented route to improving it runs as much through prices, institutions and tools that fit farmers as through the technologies themselves.

3.1 Overview

Sixty-four papers were analysed under Sub-Question 67.1. The contributions respond to both dimensions of the mandate (i.e. evaluate and improve): a first group of papers builds the measurement and evaluation base (sensing, remote sensing, performance assessment), a second group turns measurement into decisions (scheduling tools, decision-support systems, digital platforms), a third improves the practices and the hardware themselves, and a fourth examines the human, institutional and economic conditions under which any of this is adopted.

Table 1. Thematic clusters of the contributions to Sub-Question 67.1, with their main function and the papers assigned to each.

Thematic cluster	Main function	Papers (R-numbers)	Count
A. Sensing and field metrology (soil, plant, salinity)	Makes field conditions measurable at decreasing cost	R.67.1.02, .10, .30, .33, .37, .38, .55, .60	8
B. Remote sensing and ET at plot/farm scale	Quantifies actual water consumption and productivity from space	R.67.1.01, .03, .06, .26, .31, .36, .66	7
C. Scheduling, DSS and farm-level platforms	Turns measurements and forecasts into schedules and recommendations	R.67.1.11, .13, .15, .22, .43, .46, .48, .56, .62, .67	10
D. Agronomic practices and deficit strategies	Improves the practices themselves (e.g. timing, deficit, establishment, inputs)	R.67.1.17, .19, .21, .25, .28, .39, .40, .52, .65	9
E. Conveyance, equipment and system engineering	Improves application, conveyance and control hardware and its operation	R.67.1.05, .12, .23, .27, .29, .32, .34, .41, .45, .49, .50, .63, .64	13
F. Adoption, institutions, economics and risk management at farm level	Addresses the people, incentives and institutions behind adoption	R.67.1.04, .14, .16, .18, .20, .24, .35, .42, .44, .47, .51, .53, .54, .57, .58, .59, .61	17

3.2 Evaluating: measurement as the foundation

Any evaluation of irrigation practices rests on measurement, and on this front the contributions are reassuring that measuring is becoming the easy part. At the point scale, contributions examine the conversion of sensor ion readings into saturated-extract electrical conductivity across soil textures (R.67.1.02), the behaviour and protection of low-cost capacitive moisture sensors (R.67.1.33), broadband electrical impedance spectroscopy as a physics-based route to simultaneous estimation of moisture, salinity and porosity (R.67.1.60), and a decade of operational experience with plant-based sensors (e.g. dendrometers and sap-flow) in Mediterranean orchards and vineyards, with reported water savings of 20–25% against comparable drip equipment (R.67.1.30). Sensor networks are validated against reference

methods in commercial vineyards (R.67.1.10), and one paper argues that metrology itself is the blind spot of decision chains in agricultural water management, since measurement errors propagate silently into both direct triggers and model-based decisions (R.67.1.37).

At the field and scheme scales, remote sensing carries the evaluation burden. An operational Google-Earth-Engine (GEE) implementation of SEBAL maps evapotranspiration and water productivity over 226,600 ha of the Eastern Nile Delta and identifies 41,443 ha of low-productivity land where interventions would yield the largest savings (R.67.1.01). Deep-learning super-resolution of Sentinel-2 imagery mitigates the mixed-pixel problem in small paddy plots and brings evapotranspiration (ET) estimation errors down to 0.40–0.58 mm/day against lysimeters (R.67.1.03). The OpenET framework is validated against eddy covariance and soil-moisture depletion in deficit-irrigated alfalfa, verifying consumptive-use reductions of 40–50% during summer cut-off (R.67.1.06). Earth Observation combined with smart metering spatialises hydrant-level volumes over an 80,000 ha service area in Provence (R.67.1.26); NDVI time series document dry-seeding-with-delayed-flooding trials in Portuguese rice (R.67.1.31); UAV hyperspectral imagery supports coupled water–nitrogen diagnosis in chili (R.67.1.38); and spectral, machine-learning (ML) and physical modelling are integrated for maize monitoring in Hungary (R.67.1.66). Salinity, the other face of irrigation performance, is mapped from point to field scale with locally calibrated satellite models (R.67.1.55).

Evaluation is also institutional, and one field study makes the point better than any argument. On 100 farmer-managed farms in the Jordan Valley, measured emission uniformity shows hydraulically adequate systems coexisting with systematic over- and under-irrigation, because scheduling follows experience rather than computed requirements (R.67.1.57). A meta-analysis reaches a compatible conclusion from the literature, asking bluntly whether irrigation decision-support systems are useful at all and finding improved water productivity in 57% of documented cases, probably an upper bound given publication bias (R.67.1.11). Measurement, in short, is ahead of practice, and this is a gap the rest of this report returns to repeatedly.

3.3 Improving: from measurement to decision

Decision-support and scheduling tools translate the measurement base into practice. Some of the more mature ones have moved past recommendation altogether: they execute the irrigation, record what happened and adjust the next one (R.67.1.22, .56). Operational platforms are documented at commercial scale: HIDRIX, an on-demand irrigation and fertigation management system, couples short-term forecasting of crop water needs with autonomous fertigation execution and full traceability, reporting 15.8% average irrigation reduction and 21.2% water-productivity gains across pilot farms (R.67.1.22); iFarm, a smart irrigation management platform designed to improve water use efficiency, economic performance, and climate resilience at the farm level, in Thailand combines IoT control, forecasts and satellite information across 18 pilot farms, with payback estimated at 2.27 months (R.67.1.56). Digital-twin architectures integrate hydraulic simulation, sensors and crop modelling at plot scale (R.67.1.43). Seasonal forecasts (ECMWF SEAS5) are evaluated for early estimation of crop cycles and irrigation requirements in Mediterranean maize (R.67.1.48); scheduling tools available to prairie producers are compared in rotation trials (R.67.1.46); AquaCrop-based strategies for representing water-harvesting techniques are systematised (R.67.1.62); and the Optirrig model is calibrated and validated for potato in semi-arid Tunisia, quantifying yield–quota trade-offs under limited supply (R.67.1.67). A plan for a multi-scale hydro-spatial application, IrrigAble, addresses the persistent gap between disparate data streams and usable dashboards (R.67.1.15), while surrogate modelling with physics-informed neural networks is shown to be the only architecture class that remains reliable outside the training distribution for water-reuse treatment control (R.67.1.13).

3.4 Improving: practices and equipment

A substantial group of papers improves the practices themselves. Deficit and regulated-deficit strategies are given operational form: stage-based soil-water thresholds for citrus, directly measurable with in-field sensors (R.67.1.19); contrasted irrigation regimes for grain sorghum under rain shelters (R.67.1.39); drip irrigation of maize on low-permeability clay soils, where capillary-potential thresholds are established but atmospheric drought limits attainable yields (R.67.1.25). Subsurface drip irrigation of sugarcane in Zimbabwe saves 30% of water while raising cane yield from 150 to 188 t/ha (R.67.1.17). Alternate wetting (AWD) and drying and direct-seeded rice are examined both as scaling propositions for South Asia (R.67.1.65) and, critically, through the structural barriers that block AWD in gravity-fed systems, where collective decision authority is mismatched with individual incentives (R.67.1.58). Precision application of livestock effluents through linear-move systems (R.67.1.21), a fruit-waste-based superabsorbent polymer tested on wheat, tomato and okra (R.67.1.40), and greenhouse-gas accounting of the rice–wheat system of Punjab (R.67.1.28) complete the agronomic picture. At the interface between agronomy and system design, a coupled hydraulic–soil–crop model quantifies how drip hydraulic uniformity interacts with initial soil-salinity variability at the subunit level, recommending a design uniformity of 83% under severe salinity (R.67.1.52).

Equipment and conveyance engineering remain a vigorous field, spanning the full delivery chain: self-flushing anti-clogging emitters for sediment-laden water (R.67.1.45); a high-precision integrated measurement-and-control gate with ultrasonic layered velocimetry and ±2% flow error (R.67.1.49); computer-vision assessment of vegetation blockage in channels (R.67.1.50); UAV orthoimagery for updating canal geospatial inventories (R.67.1.29); optimisation of rotational irrigation in Taiwan's Houli canal system (R.67.1.12) and of pressure regulation in pressurised networks (R.67.1.34); coupled macroscopic–hydrodynamic scheduling that solves the "volume satisfied but level insufficient" problem (R.67.1.23); simulation-based multi-objective gate operation in a Korean district (R.67.1.32); IoT-supported redesign of gravity surface irrigation in the Crau (R.67.1.64); underground pipelines for local distribution in Punjab and Gujarat (R.67.1.63); large-scale watercourse lining, laser levelling and solar drip programmes in Pakistani Punjab, with conveyance efficiency raised from 49% to 68% (R.67.1.05); canal automation in India's NLBC modernisation (R.67.1.41); and a plug-and-play irrigation management system built on hydraulic digital twins, reporting 10–25% water savings (R.67.1.27). A pattern runs through the list: the largest reported gains come where hardware is paired with measurement and a supportive institutional context, the lining programmes deployed alongside laser levelling and monitoring (R.67.1.05), the digital twins behind the plug-and-play system (R.67.1.27), and the pipelines of Punjab and Gujarat, whose contrasting fortunes owe more to institutions than to engineering (R.67.1.63), rather than from hardware alone.

3.5 The conditions of adoption

The final theme concerns the people and institutions who decide. Volumetric water charging in two exceptional Japanese districts reduces annual water use by roughly 20–40%, with the strongest effects at peak demand and among larger farms (R.67.1.35). National and multi-scale reviews trace adoption status, barriers and roadmaps in Malaysia (R.67.1.42) and Nepal, where the "data-to-decision gap" is identified as the binding constraint (R.67.1.44); digital-twin irrigation districts are surveyed as China's emerging management paradigm (R.67.1.47); groundwater management information systems in Pakistani Punjab are presented as governance enablers for the Punjab Water Act (R.67.1.59). Participatory structures are documented from the Marun-Jarahi basin in Iran, where county-level co-decision on cropping plans and releases improved efficiency and trust after the 2021 drought (R.67.1.54), from Taiwanese irrigation areas (R.67.1.24), and from a Philippine river irrigation system where MASSCOTE-based diagnosis with farmers surfaced both openness to AWD and the social

tolerance of unauthorised offtakes (R.67.1.61). Success conditions for connected technologies in collective networks are shown to depend less on the technology than on its insertion into coherent socio-technical strategies (R.67.1.14). Climate-smart technology portfolios are reviewed for resilient agriculture (R.67.1.04), whether modernization can offset climate-driven demand growth is tested for Türkiye, with the warning that field-scale savings are not basin-scale savings without allocation management (R.67.1.16), and typhoon-induced multi-crop loss prediction (R.67.1.20), drought-index lag analysis (R.67.1.18), ML-plus-system-dynamics reservoir operation (R.67.1.53) and watershed-scale paddy water balance (R.67.1.51) extend farm-level decision-making toward risk and drought management.

3.6 Answering Sub-Question 67.1

How can plot- and farm-level practices and technologies be evaluated and improved? On the evidence of these contributions, evaluation is no longer the constraint: soil, plant and salinity states can be measured in the field at decreasing cost (R.67.1.02, .30, .33, .60), evapotranspiration and water productivity can be quantified from space at the scale of individual plots (R.67.1.01, .03, .06), and the performance of both practices and decision-support tools can itself be audited (R.67.1.11, .57). Improvement follows two documented routes: quantified interventions, namely deficit thresholds, subsurface drip, conveyance modernization, precision equipment, whose water and yield effects are quantified across many of the papers; and, decisively, interventions on the decision environment itself, since the papers converge on the finding that individual skills and objectives evoked by the sub-question respond to prices (R.67.1.35), to collective arrangements (R.67.1.54, .58, .61) and to the fit between tools and real farming systems (R.67.1.14, .44) at least as much as to the technologies made available.

4. SUB-QUESTION 67.2 — AT THE TERRITORIAL SCALE, HOW CAN THE DECISION-MAKING PROCESS BE EXPLAINED AND IMPROVED?

Territorial decisions are explained by the interplay of agricultural, economic, environmental and regulatory drivers, and are improved where shared data infrastructures, allocation mechanisms and participatory arrangements advance together.

4.1 Overview

Fifty-three papers were received under Sub-Question 67.2. The contributions respond to both dimensions of the mandate (i.e. explain and improve) and divide naturally along them. A first group of contributions explains the territorial decision context: the trajectories of the resource under climate change, the actual patterns of demand and use, and the actors and institutions whose interplay produces decisions. A second group improves the decision process itself: through decision-support platforms and digital infrastructure, through allocation mechanisms and economic instruments, and through enabling infrastructure.

4.2 Explaining the decision context

4.2.1 The resource and its trajectories

Territorial decisions start from projections of the resource. Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)-driven hydrological modelling projects runoff shifts in the Mae Klong basin of Thailand, with wetter late rainy seasons and drier dry seasons (R.67.2.03) and documents a statistically significant long-term decline of precipitation and per-capita availability, from about 1,500 m³ in 1962 to below 450 m³, in Algeria (R.67.2.10). Drought-stage segmentation with XGBoost (Extreme Gradient Boosting) prediction supports staged reservoir response in monsoon Korea (R.67.2.05); bivariate regional frequency analysis

provides design rainfall for agricultural drainage in Korea (R.67.2.41); satellite-precipitation bias correction improves monsoon representation in the Phetchaburi basin (R.67.2.35); and long-term remote-sensing trend analysis tracks hydro-climatic and land-use change in the transboundary Kok basin, including heavy-metal contamination (R.67.2.29). Risk is also structural: coastal flood modelling coupled with water-quality data quantifies flood-induced salinity risk in Indonesian coastal irrigation (R.67.2.12); coupled drainage simulation and gate–pump scheduling reduces waterlogging exceedance in China's plain river networks (R.67.2.14); and repurposing boreal drainage infrastructure with harvesting reservoirs is optimised for emerging Nordic droughts (R.67.2.44).

Table 2. Thematic clusters of the contributions to Sub-Question 67.2, with their main function and the papers assigned to each.

Thematic Cluster	Main function	Papers (R-numbers)	Count
A. Understanding The Resource And Its Trajectories	Projects availability, drought and flood risk under climate change	R.67.2.03, .05, .10, .12, .14, .29, .35, .41, .44	9
B. Observing Demand And Use (Eo, Water Accounting)	Makes territorial water demand and consumption visible	R.67.2.19, .31, .33, .36, .42, .45, .50, .51	8
C. Understanding Actors And Institutions	Explains why territorial decisions are what they are	R.67.2.06, .08, .13, .20, .21, .27, .28, .37, .40	9
D. Decision-Support Platforms And Digital Infrastructure	Gives all actors a shared, operational picture of the resource	R.67.2.01, .02, .09, .11, .17, .18, .22, .23, .25, .32, .39, .53	12
E. Allocation Mechanisms And Economic Instruments	Transmits scarcity to decisions through rules, prices and fees	R.67.2.04, .07, .16, .26, .30, .34, .43, .47, .48, .52	10
F. Infrastructure As An Enabler	Expands what territorial decisions can physically achieve	R.67.2.15, .24, .38, .46, .49	5

4.2.2 Observing demand and use

A second precondition of territorial decision-making is knowing what is actually irrigated and consumed. AI delineation of paddy fields from high-resolution ortho-imagery feeds water-demand estimation in Taiwan (R.67.2.19); an open-data approach (CAWET) estimates territorial irrigation demand for lavender in southern France (R.67.2.42); multi-source mapping links soil water and carbon from plot to watershed in Mediterranean perennial crops (R.67.2.31); remote sensing monitors the technical condition of drained lands (R.67.2.33); MODIS-based evapotranspiration yields regional water-use-efficiency coefficients of 0.35–0.72 on the Lower Volga (R.67.2.45); CNN-based (Convolutional Neural Network) ET forecasting reaches R^2 = 0.90 at a Pakistani research farm (R.67.2.36); a two-decade evolution of remote sensing in Thailand culminates in nationwide Water Accounting Plus across 25 basins (R.67.2.50); and economic water productivity is assessed across Thailand's 22 basins, showing that increased dry-season allocation does not automatically increase economic productivity (R.67.2.51).

4.2.3 Actors, institutions and the anatomy of decisions

The papers under this cluster are rich in explanations of why territorial decisions are what they are. The Crau case dissects nested scales and institutional fragmentation in a hydrosystem where gravity irrigation provides 70% of aquifer recharge, so that "inefficient" irrigation sustains drinking water for 300,000 people (R.67.2.08). Interview-based analysis in California shows that available sensing technologies are structurally mismatched with small-farm systems

(R.67.2.20). Japanese land-improvement districts are shown to carry unrecognised flood-regulation burdens as ecosystem services of irrigation canals under urbanisation (R.67.2.21). Multi-scale reviews of Malaysian irrigation governance identify institutional fragmentation and weak data interoperability as binding constraints (R.67.2.27). Conceptual contributions reframe IMT/PIM (Irrigation Management Transfer/Participatory Irrigation Management) towards basin-scale, polycentric governance and warn about the rebound effect of efficiency gains (R.67.2.37) and propose explainable-AI architectures to bridge the "crisis of decidability" between analysis and action (R.67.2.28). Stakeholder-oriented economic analysis is presented as a design tool for agroecological and irrigation transition projects (R.67.2.06); cluster-matrix tools frame strategic planning of irrigated interfluves (R.67.2.13); and smallholder irrigation is documented as de-facto social security in Zimbabwe's Chivi district (R.67.2.40).

4.3 Improving the decision process

4.3.1 Platforms and digital decision infrastructure

The largest group of contributions builds territorial decision-support systems. Basin-scale hydrological simulators support anticipatory drought governance with six-month horizons (WatSim, R.67.2.01). The co-created IPON (Irrigation Performante de l'Office du Niger) tool computes eleven irrigation-performance indicators for the 142,000 ha Office du Niger from WaPOR and delivery data, with documented institutional ownership, "trust-building before tool-building" (R.67.2.02). National platforms integrate AI, IoT and digital twins at very large scale in India (R.67.2.09); machine learning estimates field-scale soil moisture across Europe without in-situ sensors on every field (Soil Vision, R.67.2.11); a geospatial application supports national irrigation planning in Rwanda under data constraints (R.67.2.17); a web platform bridges water accounting and the WEFE nexus with participatory scenario simulation in Morocco (R.67.2.18); smart water networks with 68,000 delivery points deploy smart metering, digital twins and AI in Provence (REImu, R.67.2.22); physics-informed machine learning resolves morphodynamic conflicts in an Indonesian basin through a shared digital twin (R.67.2.32); AI and data governance are combined in Saudi Arabia's national irrigation database and irrigation calculator in 29 cities (R.67.2.39); Earth-Observation product portfolios serve multi-level decisions from plot to basin in Italy (R.67.2.53); adaptive AI-driven frameworks are designed for wetland–agriculture systems (R.67.2.25); and a synthesis review of remote sensing for irrigation management identifies co-creation deficits as the main adoption barrier (R.67.2.23).

4.3.2 Allocation mechanisms and economic instruments

The second lever is allocation. Modelling of metering institutions in South Africa shows that only direct volumetric metering makes the shadow value of water explicit and shifts irrigators from area reduction to deficit irrigation (R.67.2.43). Four modes of social-capital participation (i.e. concession operation, "farmland irrigation+", water-rights trading and green finance) are analysed in Chinese modern irrigation districts (R.67.2.07). Multi-objective optimisation coordinates water and cropping structure in a Sichuan district (R.67.2.30) and water–land regulation strategies are derived for the Yellow River basin from a WEEF (water-ecology-energy-food) system-dynamics analysis (R.67.2.26) and from climate-resilience diagnostics (R.67.2.34). Satellite-managed water fees improve identification of users and fee recovery in the Senegal valley (MOSIS, R.67.2.48); a proactive water-sobriety policy on the Carpentras canal is reviewed as a lever for territorial reallocation, together with its limits under climate change (R.67.2.52); territorial life-cycle assessment compares infrastructure and diversification scenarios in Provence on eco-efficiency grounds (R.67.2.04); modernisation of the Hetao Irrigation District of the Yellow River Basin is read as a transition with explicit trade-offs between water saving, cash-crop expansion and salinisation risk (R.67.2.16); and an integrated irrigation-reform diagnosis for a Malaysian granary with 17% efficiency derives hydrologically triggered allocation rules (R.67.2.47).

4.3.3 Infrastructure as an enabler

Territorial decisions are ultimately constrained by physical systems. Geosynthetic cementitious composite mats rehabilitate canals within days, with a documented 96% seepage reduction in California and winter installation in Hungary (R.67.2.15); water-saving rice strategies are simulated with QGIS-SWAP-Paddy (a spatialized version of SWAP model, integrated with a module simulating channel-network percolation) and coupled to MODFLOW-6 in Italy's Lomellina, where alternate wetting and drying promotes earlier groundwater recharge while easing peak demand (R.67.2.24); photovoltaic canal covers in Iran are shown to largely cut evaporation while generating power, with a 10.7-year payback (R.67.2.38); recharge-basin development converts purchased farmland into groundwater storage under SGMA (Sustainable Groundwater Management Act of 2014) in California (R.67.2.46); and UAV-based aerial survey coupled with HEC-RAS hydraulic modelling provides rapid hydraulic assessment of a 26 km Indian canal, locating severe aggradation and overtopping risk (R.67.2.49).

4.4 Answering Sub-Question 67.2

How can the territorial decision-making process be explained and improved? On this question, the picture that emerges is of a process shaped by four drivers: agricultural drivers (cropping structures and their water demand, R.67.2.19, .30, .42), economic drivers (water pricing, fee recovery, productivity differentials, R.67.2.43, .48, .51), environmental drivers (climate trajectories, salinity, recharge and ecosystem functions, R.67.2.03, .08, .10, .12, .21), and regulatory drivers (allocation rules, institutional mandates and their fragmentation, R.67.2.27, .37, .46, .47). It improves the process along three complementary levers that the papers document with operational evidence: shared and trusted information infrastructures that give all actors the same picture of the resource (R.67.2.01, .02, .18, .22, .50, .53); allocation and economic mechanisms that transmit scarcity to decisions (R.67.2.07, .43, .48, .52); and participatory arrangements that convert information into accepted decisions (R.67.2.02, .18, .23). The contributions that combine all three levers are precisely those reporting sustained institutional uptake.

5. CONVERGENCES AND TRADE-OFFS

5.1 Convergences

Three convergences cross the two sub-questions can be dervide.

- **First,** Earth Observation has completed its transition from research to operations: the same WaPOR, Sentinel, Landsat and OpenET product families appear in farm-scale scheduling and in national water accounting alike.
- **Second,** co-creation, as the joint design of tools and rules with their end users from the outset, rather than their transfer after development, is repeatedly identified, independently, on four continents, as the decisive adoption factor (R.67.1.22, R.67.1.54, R.67.1.61; R.67.2.02, R.67.2.17, R.67.2.18, R.67.2.23).
- **Third,** anticipation is replacing reaction as the organising principle of water management, from weekly ET forecasts to six-month drought horizons.

The convergence is structural as much as thematic: both sub-questions describe the decision chain of Figure 2, read at two scales. What the farm observes in soils and plants, the territory observes in irrigated areas and aquifers; farm-level scheduling has its counterpart in allocation and planning, automated field control in reservoir and network operations, and the irrigator's traceable records in territorial water accounting, fee recovery and audits. Governance conditions every stage at both scales, from collective delivery rules to allocation and data policy.

5.2 Trade-offs

Papers from both sub-questions demonstrate, with data, that efficiency gains at one scale do not automatically materialise at the next: field-scale savings diminish at basin scale without allocation management (R.67.1.16), technically adequate micro-irrigation coexists with mis-scheduling (R.67.1.57), efficiency gains can rebound into expanded demand (R.67.2.37, R.67.2.16), and metering regimes (not emitters) determine whether scarcity reaches the irrigator's objective function (R.67.2.43, R.67.1.35).

A second one concerns who is served: the technology offer is calibrated on well-resourced farms, while small and marginal systems remain outside its design assumptions (R.67.2.20, R.67.1.33, R.67.1.63).

5.3 From enabling to transformative innovation

The contributions can be placed on a four-level scale that distinguishes novelty from transformation. The classification proposed below is a 'reading device' not a judgement of individual papers.

Table 3. A four-level scale of the innovations presented, from enabling to transformative. The classification is proposed as a reading device, not as a judgement of individual papers.

Level	Characteristics	Examples from the papers
1. Enabling	Improves measurement or a single technical component	R.67.1.33, .45, .49, .60; R.67.2.36, .41
2. Integrated	Combines several information streams into decision support	R.67.1.15, .43, .48; R.67.2.11, .18
3. Operational	Changes real-time management or executes decisions	R.67.1.22, .27, .56; R.67.2.01, .22
4. Transformative (institutional)	Changes who decide, how water is allocated or how performance is verified	R.67.1.35, .54; R.67.2.02, .07, .43, .48

The scale is not a ranking of technical sophistication. A sophisticated tool remains an enabling innovation if it never reaches a real decision, while a comparatively simple institutional change, such as a volumetric tariff or a co-decided cropping plan, can be transformative if it durably changes water-use behaviour.

6. CONCLUDING REMARKS

Where do we stand? On the evidence of these contributions: observation and prediction have become operational infrastructure; the decision-support layer is being built at every scale, from the field to the nation; and the binding constraint on water use efficiency has shifted from measurement to governance, to the institutions, incentives and relationships that determine whether what is measured changes what is decided.

Sub-Question 67.1 shows that farm-level practice can now be evaluated with unprecedented precision and improved with documented, quantified interventions. Sub-Question 67.2 shows that territorial decision-making can be explained, and, therefore, improved, when data infrastructures, allocation mechanisms and participatory arrangements advance together. The direction the papers point to is consistent: technology and institutions designed together, tools built with their users, and management that anticipates rather than reacts.

Four questions run through the papers without ever being answered: who pays, who owns the data, what happens when the technology fails, and who is served. Together with the trade-offs of Section 5, the following directions emerge:

1. **Report efficiency claims at more than one scale:** Several contributions show that plot-level savings do not equal basin-level savings; papers claiming water savings should state the scale of the claim and, where possible, the end of the "saved" water (R.67.1.16; R.67.2.16, .37, .43).
2. **Design for adoption from the outset:** Too often, tools are first developed on technical criteria and only afterwards disseminated to farmers and water managers through training and demonstrations. The papers show that this sequence rarely works: sustained uptake is reported where end users help shape the tool from the start, deciding what it should do and how it fits their actual decisions, and adoption fails where they are only trained on a finished product (R.67.1.22, .54, .61; R.67.2.02, .17, .18, .23).
3. **Pair every digital platform with an institutional and financial sustainability plan:** The long-term operation of the many platforms presented (data continuity, maintenance, staffing beyond the project phase) is the least documented dimension of the papers. Contributions that integrate economic analysis, such as R.67.1.56 with explicit payback and adoption-rate figures, show that it can be done.
4. **Settle data ownership and interoperability early:** As irrigation becomes data-intensive, who owns the data, who maintains access to it and how systems talk to each other determine whether platforms outlive their projects. Weak interoperability is already identified as a binding constraint on governance (R.67.2.27), and national data-governance arrangements are only beginning to emerge (R.67.2.39).
5. **Plan for failure as well as for performance:** Automated irrigation and AI-assisted allocation need fallback procedures, clear override responsibilities and honest communication of uncertainty. The abstracts leave these questions almost untouched.
6. **Pay attention to measurement quality:** Decision tools are only as good as the data that feed them, yet measurement accuracy is rarely checked or reported; errors propagate silently into every downstream decision. Standards and routine error reporting deserve explicit attention (R.67.1.33, .37, .57).
7. **Design for smallholders, not only for well-equipped farms:** Available irrigation technologies are largely calibrated on well-resourced farming systems; small and marginal farms should be brought inside the design assumptions from the start, rather than being expected to adapt to tools built for others (R.67.1.63; R.67.2.20, .40).
8. **Value all the services that irrigation water provides:** Irrigation infrastructure often delivers services beyond crop production (aquifer recharge, flood regulation, ecosystem support). Territorial allocation debates should assess "efficiency" against this full set of functions, not against crop water use/productivity alone (R.67.2.08, .21, .24, .46).

If the contributions point to one destination, it is accountability: an irrigation sector able to state what water was available, how it was used, why decisions were taken, and what should change next time.

ACKNOWLEDGEMENTS

The General Reporter gratefully acknowledges the authors of the 117 contributions analysed under Question 67, whose work forms the substance of this report; the members of the Panel of Experts, for their support in reviewing the submissions and shaping the analysis; and the ICID Central Office, for its assistance with communications and the timely transmission of all documents.

QUESTION 67:

TECHNOLOGIES ET PRATIQUES INNOVANTES POUR ACCROÎTRE L'EFFICACITÉ DE L'UTILISATION DE L'EAU : GESTION ET SERVICES D'IRRIGATION, TÉLÉDÉTECTION, MATÉRIEL D'IRRIGATION,... OÙ EN SOMMES-NOUS ?

RAPPORT GÉNÉRAL

Rapporteur Général
Maher Salman (FAO)*

1. INTRODUCTION

La Question 67 fait le point sur la situation de l'irrigation à l'égard des technologies et des pratiques innovantes visant à accroître l'efficacité de l'utilisation de l'eau en ce qui concerne la gestion et les services d'irrigation, la télédétection et les équipements d'irrigation. Cette Question s'articule autour de deux échelles complémentaires. La sous-question 67.1 porte sur les parcelles et les exploitations agricoles, où les pratiques et technologies d'irrigation reflètent les compétences, les objectifs et les décisions individuels, et examine la manière dont ceux-ci peuvent être évalués et améliorés. La sous-question 67.2 traite l'échelle territoriale, où la gestion de l'eau d'irrigation est influencée conjointement par des facteurs agricoles, économiques, environnementaux et réglementaires, et cherche à comprendre la manière dont le processus de prise de décision peut être expliqué et amélioré.

Les deux sous-questions, par conséquent, tracent une trajectoire unique, de la prise de décision individuelle au niveau de la parcelle jusqu'à la prise de décision collective à l'échelle du périmètre irrigué, du bassin versant et du pays. Les 117 contributions analysées pour ce rapport (64 sous Q.67.1 et 53 sous Q.67.2), provenant d'auteurs et de zones d'étude répartis dans au moins 35 pays (Figure 1), permettent d'apporter une réponse complète à la question « où en sommes-nous? » posée au titre de la Question. L'ensemble de ces travaux révèle une discipline en pleine transition : des outils d'observation qui étaient expérimentaux il y a dix ans constituent désormais des infrastructures opérationnelles, tandis que les contraintes majeures pesant sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau sont de plus en plus d'ordre institutionnel, économique et humain, plutôt que purement technique.

Ce rapport suit la structure de la Question. La section 2 offre un portrait quantitatif des contributions. La section 3 présente la réponse à la sous-question 67.1 et la section 4 celle à la sous-question 67.2 ; dans les deux cas, le contenu est organisé selon les thèmes analytiques qui se dégagent des documents plutôt que par document. Chaque contribution est citée par son numéro R au moins une fois. La section 5 propose une lecture transversale : convergences, compromis et analyse à quatre niveaux des innovations présentées; et la section 6 se conclut par une réponse synthétique à la question posée ainsi que par les recommandations faites qui en découlent.

* Senior Land & Water Officer | Agricultural Water Management Team Lead, Adaptation Fund Unit Coordinator, Land and Water Division (NSL) | FAO-UN, Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy, Tel: +39 06 570 54718, E-mail: Maher.Salman@fao.org

117 Rapports Analysés | 35 Pays Avec Des Zones D'étude Cartographiées | 101 Sites D'étude Sur La Carte

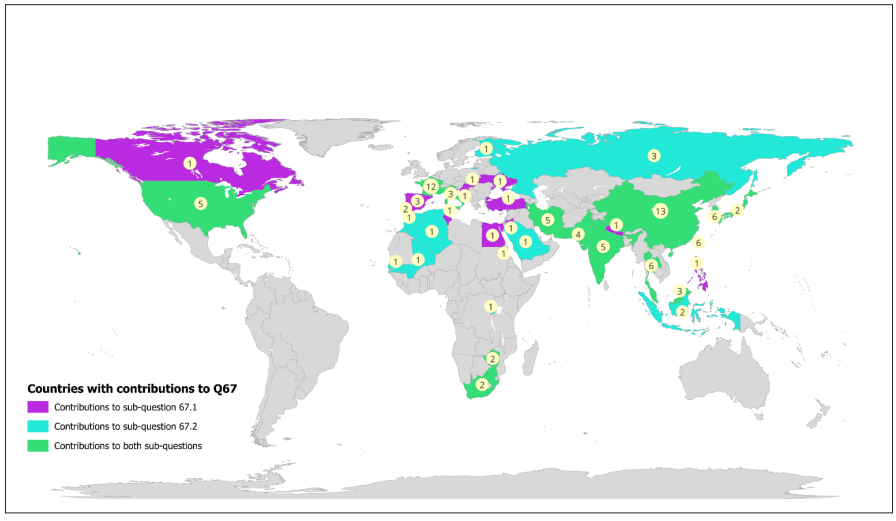


Figure 1. Répartition géographique des contributions à la question 67. Les pays sont indiqués en grisé par couverture : contributions à la sous-question 67.1 (12 pays), à la sous-question 67.2 (9) ou aux deux (14). Les chiffres indiquent le nombre d'études menées dans chaque pays. Les contributions de portée mondiale, multirégionale ou conceptuelle ne sont pas représentées sur la carte. La représentation se fait au niveau du pays; les zones d'étude sont sous-nationales et sont décrites dans le texte.

2. PORTRAIT DES CONTRIBUTIONS

Les contributions couvrent un large éventail géographique et méthodologique. Elles proviennent d'Europe (avec une forte présence du pays hôte, la France, notamment concernant les services d'eau à l'échelle territoriale et l'observation de la Terre), d'Asie orientale, du Sud-Est et du Sud (Chine, Thaïlande, Taïwan, Corée, Japon, Malaisie, Indonésie, Inde, Pakistan, Népal, Bangladesh), du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord (Iran, Jordanie, Arabie saoudite, Algérie, Maroc, Tunisie, Turquie, Égypte), d'Afrique subsaharienne (Mali, Sénégal, Rwanda, Zimbabwe, Afrique du Sud) et des Amériques (États-Unis, Canada).

Sur le plan méthodologique, la caractéristique la plus visible dans l'ensemble des documents est la maturité de l'observation de la Terre et des approches fondées sur les données : environ la moitié de toutes les contributions reposent sur l'observation par satellite ou par véhicule aérien sans pilote (UAV), et des composants d'apprentissage automatique apparaissent dans les deux sous-questions, allant de l'estimation de l'évapotranspiration à l'échelle de la parcelle et de la récupération de l'humidité du sol jusqu'à la prédiction du stockage en réservoirs, à l'estimation des pertes dues aux inondations et à la comptabilité de l'eau à l'échelle du bassin. Il est à noter que les algorithmes d'apprentissage automatique ont tendance à se substituer de plus en plus aux algorithmes basés sur des données physiques, qui sont la norme depuis de nombreuses années. Cependant, les analyses comparatives des deux approches sont absentes, ainsi que des réflexions sur la transmissibilité des approches d'apprentissage automatique dans différents contextes et même dans différentes périodes

au sein du même domaine d'étude, contrairement aux approches basées sur la physique qui sont transmissibles par définition.

Une deuxième caractéristique, tout aussi importante, réside dans l'importance de l'analyse institutionnelle, économique et sociale, qui ne se limite plus à une catégorie résiduelle mais constitue un ensemble cohérent de preuves dans les deux sous-questions.

La répartition géographique présentée à la figure 1 nécessite deux remarques de lecture. La forte présence française reflète essentiellement celle du pays hôte et ne doit pas être interprétée comme un choix thématique délibéré. Plus fondamentalement, les priorités régionales diffèrent selon les éléments de preuve : l'intégration et la modernisation des services d'eau dominent en Europe, l'adoption au sein des systèmes rizicoles collectifs en Asie du Sud et du Sud-Est; la pénurie, le stress hydrique et la salinité au Moyen-Orient et en Afrique du Nord, et les informations opérationnelles dans de grands systèmes d'Afrique subsaharienne confrontés à un manque de données. Des technologies similaires apparaissent dans toutes les régions, mais les résultats décrits dépendent fortement du contexte dans lequel elles sont appliquées.

2.1 Vue d'ensemble des messages clés

Six messages résument les contributions; chacun est développé dans le corps du rapport.

1. Observation en tant qu'une infrastructure : la surveillance par satellite de l'évapotranspiration, des surfaces irriguées et de la productivité de l'eau est désormais opérationnelle à l'échelle de l'exploitation agricole et du territoire, et et non plus expérimental (par ex. R.67.1.01, R.67.1.06, R.67.1.26 ; R.67.2.02, R.67.2.48, R.67.2.50, R.67.2.53).
2. Evolution de la gestion d'une approche réactive à une approche proactive : la prévision (saisonnière, sub-saisonnière et liée à des événements spécifiques) s'intègre dans les chaînes de décision opérationnelles à toutes les échelles (R.67.1.48, R.67.1.53, R.67.1.18 ; R.67.2.01, R.67.2.05, R.67.2.03).
3. Technologie à elle seule ne permet pas d'économiser l'eau : Dans l'absence d'institutions, d'incitations et de gestion des allocations qui transmettent la rareté aux utilisateurs, les gains d'efficacité sur le terrain ne se traduisent pas par des économies à l'échelle du bassin (R.67.1.11, R.67.1.16, R.67.1.57, R.67.1.58, R.67.1.63 ; R.67.2.16, R.67.2.20, R.67.2.37, R.67.2.43).
4. Co-création et instauration de la confiance favorisent l'adoption : lorsque les outils sont conçus en concertation avec leurs utilisateurs, à savoir les agriculteurs, les associations d'usagers de l'eau et les autorités chargées de l'irrigation, ils sont efficacement utilisés; lorsqu'ils sont simplement fournis, ils sont abandonnés (R.67.1.22, R.67.1.54, R.67.1.61 ; R.67.2.02, R.67.2.17, R.67.2.18, R.67.2.23).
5. Instruments économiques rendent la pénurie visible : la tarification volumétrique, les institutions de comptage et la tarification de l'eau d'irrigation gérées par satellite modifient les pratiques d'irrigation là où les infrastructures seules échouent à le faire (R.67.1.35 ; R.67.2.43, R.67.2.48, R.67.2.07).
6. Questions d'équité et situation des petits exploitants restent largement négligées : les technologies disponibles sont mal adaptées aux systèmes agricoles de petite taille ou marginaux, et la répartition des avantages et des charges liés aux services d'eau est rarement prise en compte (R.67.1.33, R.67.1.63 ; R.67.2.20, R.67.2.21, R.67.2.40).

Ces six messages constituent une grille de lecture unique, utilisée tout au long du rapport. Les décisions en matière d'irrigation — qu'elles soient individuelles ou territoriales — sont prises le long d'une chaîne qui observe le système, projette son évolution, décide, agit et rend compte du résultat (Figure 2). Les contributions couvrent tous les maillons de cette chaîne : l'observation et la projection sont ses strates les plus murîes, l'exécution émerge, et la comptabilité est la plus fine. Autour de la chaîne se trouve la gouvernance, avec les institutions, les incitations et les règles qui conditionnent chaque maillon, et la conclusion centrale de ce rapport est que ce cadre, plus que n'importe quel maillon unique, détermine désormais si l'efficacité de l'utilisation de l'eau s'améliore réellement.

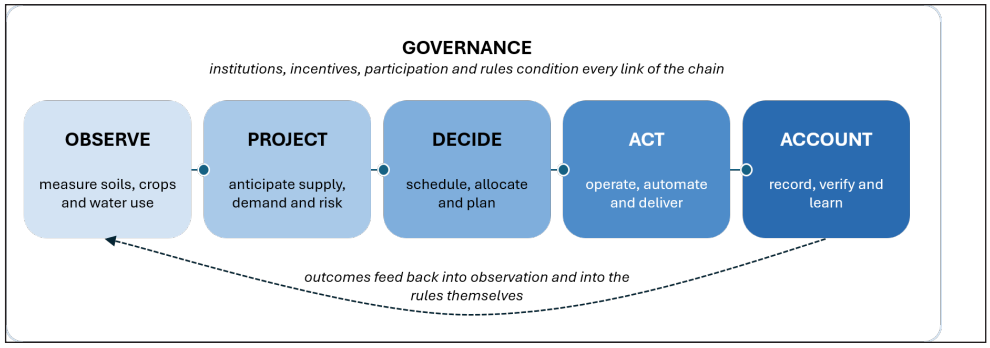


Figure 2. La chaîne de décision en cinq étapes émergeant des contributions, avec la gouvernance comme cadre transversal. La capacité de l'observation à modifier les décisions et celle de la comptabilisation à changer les règles dépendent des institutions, des incitations et de la participation.**

3. SUB-QUESTION 67.1 - LES PRATIQUES ET TECHNOLOGIES D'IRRIGATION À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE ET DE L'EXPLOITATION AGRICOLE : COMMENT PEUT-ON LES ÉVALUER ET LES AMÉLIORER?

L'irrigation à l'échelle de l'exploitation peut désormais être évaluée avec une précision sans précédent et à moindre coût; la voie documentée pour l'améliorer passe autant par les prix, les institutions et les outils adaptés aux agriculteurs que par les technologies elles-mêmes.

3.1 Vue d'ensemble

Soixante-quatre documents ont été analysés dans le cadre de la sous-question 67.1. Les contributions répondent aux deux dimensions du mandat (c'est-à-dire l'évaluation et l'amélioration) : premier groupe d'articles établit les bases de la mesure et de l'évaluation (détection, télédétection, évaluation des performances); un deuxième groupe transforme ces mesures en décisions (outils de programmation, systèmes d'aide à la décision, plateformes numériques); un troisième groupe vise à améliorer les pratiques et les matériaux eux-mêmes; enfin, un quatrième groupe examine les conditions humaines, institutionnelles et économiques favorisant l'adoption de ces solutions.

Tableau 1. *Regroupements thématiques des contributions à la sous-question 67.1, avec leur fonction principale et les articles y associés*

Regroupement thématique	Fonction principale	Articles (Numéro R)	Compte
A. Détection et métrologie de terrain (sol, plante, salinité)	Rend les conditions de terrain mesurables à moindre coût	R.67.1.02, .10, .30, .33, .37, .38, .55, .60	8
B. Télédétection et évapo-transpiration (ET) à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation	Quantification de la consommation réelle d'eau et la productivité spatiale	R.67.1.01, .03, .06, .26, .31, .36, .66	7
C. Programmation, systèmes d'aide à la décision (DSS) et plateformes pour l'exploitation	Transformation des mesures et prévisions en planification d'irrigation et recommandations	R.67.1.11, .13, .15, .22, .43, .46, .48, .56, .62, .67	10
D. Pratiques agronomiques et stratégies de déficit hydrique	Amélioration des pratiques elles-mêmes (ex. : calendrier, déficit, établissement, intrants)	R.67.1.17, .19, .21, .25, .28, .39, .40, .52, .65	9
E. Transport de l'eau, équipe-ments et ingénierie des systèmes	Amélioration du matériel d'application, de transport et de régulation, ainsi que son fonctionnement	R.67.1.05, .12, .23, .27, .29, .32, .34, .41, .45, .49, .50, .63, .64	13
F. Adoption, institutions, économie et gestion des risques à l'échelle de l'exploitation	Traitement des aspects humains, des incitations et des institutions liés à l'adoption	R.67.1.04, .14, .16, .18, .20, .24, .35, .42, .44, .47, .51, .53, .54, .57, .58, .59, .61	17

3.2 Évaluation : la mesure comme fondement

Toute évaluation des pratiques d'irrigation repose sur la mesure; à cet égard, les contributions sont rassurantes quant au fait que la mesure devient l'aspect le plus aisé de la démarche. À l'échelle ponctuelle, les travaux examinent la conversion des mesures ioniques des capteurs en conductivité électrique de l'extrait saturé selon la texture du sol (R.67.1.02); le comportement et la protection de capteurs capacitifs d'humidité à faible coût (R.67.1.33), la spectroscopie d'impédance électrique à large bande comme méthode physique permettant d'estimer simultanément l'humidité, la salinité et la porosité (R.67.1.60), ainsi qu'une décennie d'expérience opérationnelle avec des capteurs installés sur les plantes (ex. : dendromètres et mesures de flux de sève) dans les vergers et vignobles méditerranéens, avec des économies d'eau rapportées de 20 à 25% par rapport à un équipement d'irrigation goutte-à-goutte (R.67.1.30). Les réseaux de capteurs sont validés par rapport aux méthodes de référence dans les vignobles commerciaux (R.67.1.10), et un article soutient que la métrologie elle-même consitue l'angle mort des chaînes de décision dans la gestion de l'eau agricole, car les erreurs de mesure se propagent silencieusement à la fois dans les déclencheurs directs et les décisions fondées sur des modèles (R.67.1.37).

A l'échelle de la parcelle et du périmètre irrigué, la télédétection porte les charges de l'évaluation. Une mise en œuvre opérationnelle de l'algorithme SEBAL via Google Earth Engine (GEE) permet de cartographier l'évapotranspiration et la productivité de l'eau sur 226 600 hectares de terre à l'est du delta du Nil et d'identifier 41 443 hectares de terres à faible productivité où des interventions généreraient les économies les plus importantes (R.67.1.01). L'application de techniques de super-résolution par apprentissage profond de l'imagerie Sentinel-2 permet d'atténuer le problème des pixels mixtes dans les petites parcelles de riziculture et de réduire les erreurs d'estimation de l'évapotranspiration (ET) à 0,40 à 0,58 mm/jour par rapport aux mesures lysimétriques (R.67.1.03). Le cadre OpenET est validé par rapport à la covariance de tourbillon et à l'épuisement de l'humidité du sol dans la culture de luzerne soumise à une irrigation déficitaire, vérifiant des réductions de consommation d'eau de 40-50% pendant l'arrêt de l'irrigation estivale (R.67.1.06). L'observation de la Terre, combinée à des compteurs intelligents, permet de spatialiser les volumes distribués au niveau des prises d'eau sur une zone desservie de 80 000 hectares de terre en Provence (R.67.1.26); les séries chronologiques d'indice NDVI documentent des essais de semis à sec avec la mise en eau différée dans des rizières portugaises (R.67.1.31); l'imagerie hyperspectrale par drone facilite un diagnostic couplé eau-azote pour la culture du piment (R.67.1.38); et la modélisation spectrale, l'apprentissage automatique (AM) et physique est intégrée pour la surveillance du maïs en Hongrie (R.67.1.66). La salinité, autre facette de la performance de l'irrigation, est cartographiée de l'échelle ponctuelle à celle de la parcelle grâce à des modèles satellitaires étalonnés localement (R.67.1.55).

L'évaluation est également institutionnelle, et une étude menée sur le terrain permet de faire valoir ce point mieux que n'importe quel débat. Dans la vallée du Jourdain, l'analyse de l'uniformité mesurée des émissions sur 100 exploitations agricoles gérées par des agriculteurs, montre la coexistence de systèmes hydrauliquement adéquats avec une irrigation systématique de sur-irrigation et de sous-irrigation, la programmation des apports reposant davantage sur l'expérience que sur les besoins calculés (R.67.1.57). Une méta-analyse parvient à une conclusion compatible de la littérature, en demandant franchement si les systèmes d'aide à la décision pour l'irrigation sont utiles et en constatant une amélioration de la productivité de l'eau dans 57% des cas documentés, ce qui constitue probablement une limite supérieure compte tenu du biais de publication (R.67.1.11). La mesure, en bref, est en avance sur la pratique, et c'est un écart auquel le reste de ce rapport revient à plusieurs reprises.

3.3 Vers l'amélioration : de la mesure à la décision

Les outils d'aide à la décision et de planification traduisent la base de mesure en pratique. Certains des plus mûris ont complètement dépassé les recommandations : ils exécutent l'irrigation, enregistrent les résultats et ajustent l'intervention suivante (R.67.1.22, .56). Les plateformes opérationnelles sont documentées à l'échelle commerciale : HIDRIX, un système de gestion de l'irrigation et de la fertirrigation à la demande, associe la prévision à court terme des besoins en eau des cultures à une exécution autonome de la fertirrigation et à une traçabilité complète, affichant une réduction moyenne de l'irrigation de 15,8% et un gain de productivité de l'eau de 21,2% dans les exploitations pilotes (R.67.1.22); iFarm, une plateforme intelligente de gestion de l'irrigation conçue pour améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau, la performance économique et la résilience climatique au niveau de l'exploitation agricole en Thaïlande, combine le contrôle IoT, les prévisions et les données satellitaires sur 18 exploitations pilotes, avec période de retour estimée à 2,27 mois (R.67.1.56). Les architectures de type « jumeau numérique » intègrent la simulation hydraulique, les capteurs et la modélisation des cultures à l'échelle de la parcelle (R.67.1.43). Les prévisions saisonnières (ECMWF SEAS5) sont évaluées pour une estimation précoce des cycles culturaux et

des besoins en irrigation du maïs en zone méditerranéenne (R.67.1.48); les outils de programmation destinés aux producteurs des prairies sont comparés dans le cadre d'essais de rotation (R.67.1.46); les stratégies fondées sur le modèle AquaCrop pour représenter les techniques de collecte des eaux sont systématisées (R.67.1.62); enfin, le modèle Optirrig est calibré et validé pour la culture de la pomme de terre en Tunisie semi-aride, quantifiant les compromis entre rendement et quotas en cas de ressources limitées (R.67.1.67). Un plan pour une application hydrospatiale multi-échelles, IrrigAble, aborde l'écart persistant entre les flux de données disparates et les tableaux de bord utilisables (R.67.1.15), tandis que la modélisation de substitution utilisant des réseaux de neurones informés par la physique s'avère être la seule classe d'architecture qui reste fiable en dehors de la distribution de formation pour le contrôle du traitement des eaux réutilisées (R.67.1.13).

3.4 Amélioration : pratiques et équipements

Un nombre important d'articles porte sur l'amélioration des pratiques elles-mêmes. Des stratégies de déficit hydrique (total ou régulé) sont traduites en modalités opérationnelles : seuils d'humidité du sol spécifiques aux stades phénologiques des agrumes, mesurables directement par des capteurs de terrain (R.67.1.19); régimes d'irrigation contrastés pour le sorgho grain sous abris contre la pluie (R.67.1.39); irrigation goutte-à-goutte pour le maïs sur faible perméabilité des sols argileux, où des seuils de potentiel capillaire sont établis mais où la sécheresse atmosphérique limite les rendements potentiels (R.67.1.25). Au Zimbabwe, l'irrigation goutte-à-goutte souterraine de la canne à sucre permet d'économiser 30% d'eau tout en augmentant le rendement de 150 à 188 t/ha (R.67.1.17). La technique d'humidification et de séchage alternés (AWD) et la culture du riz par semis direct sont examinées tant comme des propositions de mise à l'échelle pour l'Asie du Sud (R.67.1.65) que de manière critique, à travers les obstacles structurels qui entravent l'adoption de l'AWD dans les systèmes gravitaires, où l'autorité de décision collective est mal adaptée aux incitations individuelles (R.67.1.58). L'application de épandage de précision d'effluents d'élevage via des systèmes d'irrigation à rampe frontale (R.67.1.21), le polymère superabsorbant à base de biodéchets fruitiers testé sur le blé, la tomate et le gombo (R.67.1.40), ainsi que la comptabilisation des gaz à effet de serre du système de culture riz-blé au Pendjab (R.67.1.28) complètent le tableau agronomique. À l'interface entre l'agronomie et la conception de systèmes, un modèle couplé hydraulique-sol-culture quantifie l'interaction entre l'uniformité hydraulique goutte-à-goutte et la variabilité initiale de la salinité du sol à l'échelle de la sous-unité, recommandant une uniformité de conception de 83% en conditions de forte salinité (R.67.1.52).

L'ingénierie des équipements et du transport de l'eau reste un domaine dynamique couvrant l'ensemble de la chaîne de distribution : goutteurs anti-colmatage à auto-rinçage des eaux chargées en sédiments (R.67.1.45); vanne intégrée de mesure et de contrôle de haute précision, dotée d'un système de vélocimétrie ultrasonique par couches affichant une erreur de débit de ±2 % (R.67.1.49); évaluation par vision par ordinateur de l'obstruction des canaux par la végétation (R.67.1.50); utilisation de l'ortho-imagerie acquise par UAV pour la mise à jour des inventaires géospatiaux de canaux (R.67.1.29); optimisation de l'irrigation par rotation dans le réseau de canaux de Houli à Taïwan (R.67.1.12) et de la régulation de pression dans les réseaux sous pression (R.67.1.34); programmation couplée macroscopique-hydrodynamique résolvant le problème de «volume satisfait mais niveau insuffisant» (R.67.1.23); fonctionnement multi-objectif des vannes basé sur la simulation dans un périmètre coréen (R.67.1.64); refonte soutenue par IoT, de l'irrigation gravitaire de surface dans la région de la Crau (R.67.1.64); conduites souterraines pour la distribution locale au Pendjab et au Gujarat (R.67.1.63); programmes de revêtement de cours d'eau, de nivellement par laser et d'irrigation goutte-à-goutte solaire à grande échelle au Pendjab pakistanais, portant l'efficacité du transport de 49% à 68% (R.67.1.05); automatisation des canaux dans

le cadre de la modernisation du réseau NLBC en Inde (R.67.1.41); et système de gestion de l'irrigation «prêt à l'emploi» basé sur des jumeaux numériques hydrauliques, permettant une économie d'eau de 10 à 25% (R.67.1.27) ; et canalisations du Pendjab et du Gujarat, dont les fortunes contrastées doivent plus aux institutions qu'à l'ingénierie (R.67.1.63), plutôt qu'au seul matériel.

3.5 Conditions d'adoption

Le thème définitif porte sur les personnes et les institutions qui prennent les décisions. La tarification volumétrique de l'eau, appliquée dans deux périmètres irrigués spécifiques japonais, réduit la consommation annuelle d'eau d'environ 20 à 40%, les effets les plus marqués étant observés lors des demandes de pointe et au sein des grandes exploitations (R.67.1.35). Les analyses nationales et multi-échelles font le point sur l'état d'adoption, les obstacles et les feuilles de route en Malaisie (R.67.1.42) et au Népal, où «écart entre les données et la prise de décision » est identifié comme la contrainte majeure (R.67.1.44); les périmètres irrigués dotés de « jumeaux numériques » sont étudiés en tant que paradigme de gestion émergeant en Chine (R.67.1.47); enfin, les systèmes d'information sur la gestion des eaux souterraines au Pendjab pakistanais sont présentés comme des outils de gouvernance pour la mise en œuvre de la loi sur l'eau du Pendjab (R.67.1.59). Des structures participatives sont documentées dans le bassin de Marun-Jarahi en Iran, où la codécision à l'échelle du comté concernant les plans de culture et les lâchers d'eau a amélioré l'efficacité et la confiance après la sécheresse de 2021 (R.67.1.54), ainsi que dans des zones irriguées de Taïwan (R.67.1.24) et dans un système d'irrigation fluvial aux Philippines où un diagnostic basé sur la méthode MASSCOTE, mené avec les agriculteurs, a révélé à la fois une ouverture à la technique d'irrigation d'humidification et de séchage alternés (AWD) et une tolérance sociale à l'égard des prélèvements non autorisés (R.67.1.61). Il apparaît que les conditions de réussite des technologies connectées au sein des réseaux collectifs dépendent moins de la technologie elle-même que de son intégration dans des stratégies sociotechniques cohérentes (R.67.1.14). Les portefeuilles de technologies «climato-intelligentes» sont examinés sous l'angle d'une agriculture résiliente (R.67.1.04); le cas de la Turquie permet de vérifier si la modernisation peut compenser la hausse de la demande induite par le climat, tout en soulignant que les économies réalisées à l'échelle de la parcelle ne se traduisent pas nécessairement par des économies à l'échelle du bassin sans une gestion appropriée de l'allocation des ressources (R.67.1.16); enfin, la prévision des pertes de cultures multiples dues aux typhons (R.67.1.20); l'analyse du retard des indices de sécheresse (R.67.1.18); l'exploitation des réservoirs combinant l'apprentissage automatique et la dynamique des systèmes (R.67.1.53) ainsi que le bilan hydrique des rizières à l'échelle du bassin versant (R.67.1.51) étendent la prise de décision au niveau de l'exploitation agricole vers une gestion des risques et de la sécheresse.

3.6 Réponse à la sous-question 67.1

Comment évaluer et améliorer les pratiques et technologies à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation ? Au vu de ces contributions, l'évaluation ne constitue plus un obstacle : l'état des sols, des cultures et de la salinité peut être mesuré sur le terrain à un coût décroissant (R.67.1.02, .30, .33, .60), l'évapotranspiration et la productivité de l'eau peuvent être quantifiées depuis l'espace à l'échelle de la parcelle individuelle (R.67.1.01, .03, .06), et la performance tant des pratiques que des outils d'aide à la décision peut elle-même être vérifiée (R.67.1.11, .57). L'amélioration suit deux voies documentées : les interventions quantifiées, à savoir les seuils de déficit, le goutte-à-goutte souterrain, la modernisation des systèmes de transport, les équipements de précision dont les effets sur l'eau et le rendement sont quantifiés dans de nombreux articles; et, de manière décisive, les interventions sur l'environnement décisionnel lui-même, puisque les articles convergent sur la constatation que les compétences et objectifs

individuels évoqués par la sous-question répondent aux prix (R.67.1.35), aux dispositions collectives (R.67.1.54, .58, .61) et à l'adéquation entre les outils et les systèmes agricoles réels (R.67.1.14, .44) au moins autant que les technologies mises à disposition.

4. SUB-QUESTION 67.2 —À L'ÉCHELLE TERRITORIALE, COMMENT EST-CE QUE LE PROCESSUS DE PRISE DE DÉCISION PEUT EXPLIQUER ET AMÉLIORER?

Les décisions territoriales s'expliquent par l'interaction des facteurs agricoles, économiques, environnementaux et réglementaires, et sont améliorées lorsque les infrastructures de données partagées, les mécanismes d'allocation et les dispositions participatives progressent ensemble.

4.1 Vue d'ensemble

Cinquante-trois documents ont été reçus dans le cadre de la sous-question 67.2. Les contributions répondent aux deux dimensions du mandat (c'est-à-dire l'explication et l'amélioration) et se répartissent naturellement en fonction de celles-ci. Un premier groupe de contributions explique le contexte de décision territoriale : les trajectoires de la ressource sous l'effet du changement climatique, les modèles réels de demande et d'utilisation, ainsi que les acteurs et institutions dont l'interaction aboutit aux décisions. Un deuxième groupe vise à améliorer le processus de décision lui-même, notamment grâce à des plateformes d'aide à la décision et des infrastructures numériques, à des mécanismes d'allocation et des instruments économiques, ainsi qu'à des infrastructures d'habilitation.

4.2.1 La ressource et ses trajectoires

Les décisions territoriales s'appuient sur des projections concernant la ressource. La modélisation hydrologique basée sur le projet CMIP6 (Projet d'intercomparaison des modèles couplés Phase 6) prévoit des modifications du ruissellement dans le bassin versant de Mae Klong (Thaïlande), avec des saisons pluvieuses tardives plus humides et des saisons sèches plus sèches (R.67.2.03); elle met également en évidence, en Algérie, une baisse statistiquement significative à long terme des précipitations et de la disponibilité par habitant, passant d'environ 1 500 m³ en 1962 à moins de 450 m³ (R.67.2.10). La segmentation des phases de sécheresse couplée à des prédictions par l'algorithme XGBoost (Extreme Gradient Boosting) soutient une réponse par étapes des réservoirs en Corée, pays soumis à la mousson (R.67.2.05); une analyse de fréquence régionale bivariée fournit des données sur les précipitations de référence pour le drainage agricole en Corée (R.67.2.41); la correction des biais des précipitations satellitaires améliore la représentation de la mousson dans le bassin de la Phetchaburi (R.67.2.35); enfin, l'analyse des tendances à long terme par télédétection permet de suivre les évolutions hydroclimatiques et les changements des usages des sols dans le bassin transfrontalier de la Kok, y compris la contamination par les métaux lourds (R.67.2.29). Le risque revêt également une dimension structurelle : la modélisation des inondations côtières associée à des données sur la qualité de l'eau permet de quantifier le risque de salinisation lié aux crues en ce qui concerne l'irrigation côtière en Indonésie (R.67.2.12); le modèle couplé de simulation du drainage et la programmation des vannes et des pompes réduit les dépassements de seuils d'engorgement dans le réseau fluvial plat en Chine (R.67.2.14); et la réutilisation des infrastructures de drainage en milieu boréal pour inclure des réservoirs de collecte d'eau est optimisée pour répondre aux sécheresses émergentes dans les régions nordiques (R.67.2.44).

Tableau 2. *Regroupements thématiques des contributions à la sous-question 67.2, avec leur fonction principale et les articles y associés.*

Regroupement thématique	Fonction principale	Articles (Numéro R)	Compte
Compréhension de la ressource et ses trajectoires	Disponibilité des projets, risques de sécheresse et d'inondation dans le cadre du changement climatique	R.67.2.03, .05, .10, .12, .14, .29, .35, .41, .44	9
Observation de la demande et de l'utilisation (observation de la Terre, comptabilité de l'eau)	Rend visibles la demande et la consommation d'eau à l'échelle du territoire	R.67.2.19, .31, .33, .36, .42, .45, .50, .51	8
Compréhension des acteurs et des institutions	Explique le bien-fondé des décisions prises à l'échelle du territoire	R.67.2.06, .08, .13, .20, .21, .27, .28, .37, .40	9
Plateformes d'aide à la décision et infrastructures numériques	Offre à tous les acteurs une vision partagée et opérationnelle de la ressourc	R.67.2.01, .02, .09, .11, .17, .18, .22, .23, .25, .32, .39, .53	12
Mécanismes d'allocation et instruments économiques	Transmet la rareté aux décisions par le biais des règles, des prix et des frais	R.67.2.04, .07, .16, .26, .30, .34, .43, .47, .48, .52	10
Infrastructure comme facilitateur	Expansion de ce que les décisions territoriales peuvent matériellement accomplir	R.67.2.15, .24, .38, .46, .49	5

4.2 Explication du contexte décisionnel

4.2.2 Observer la demande et l'utilisation

Une deuxième condition préalable à la prise de décisions territoriales est de savoir ce qui est réellement irrigué et consommé. À Taïwan, la présentation des rizières par intelligence artificielle à partir d'ortho-imagerie à haute résolution alimente l'estimation de la demande en eau (R.67.2.19); l'approche fondée sur les données ouvertes (CAWET) permet d'estimer la demande territoriale en eau pour la culture de la lavande au sud de la France (R.67.2.42); la cartographie multisource établit un lien entre l'eau du sol et le carbone, de la parcelle au bassin versant, pour les cultures pérennes méditerranéennes (R.67.2.31); la télédétection permet de surveiller l'état technique des terres drainées (R.67.2.33); l'estimation de l'évapotranspiration par le capteur MODIS fournit des coefficients d'efficacité de l'utilisation de l'eau compris entre 0,35 et 0,72 pour le cours inférieur de la Volga (R.67.2.45); la prévision de l'évapotranspiration (ET) par Réseau de neurones à convolution (CNN) atteint un coefficient de détermination (R^2) de 0,90 dans une ferme de recherche au Pakistan (R.67.2.36); l'évolution de deux décennies de la télédétection en Thaïlande donne lieu à la comptabilité de l'eau plus à l'échelle nationale

dans 25 bassins (R.67.2.50); enfin, la productivité économique de l'eau est évaluée pour les 22 bassins thaïlandais, révélant qu'une augmentation des allocations d'eau en saison sèche ne se traduit pas automatiquement par une hausse de la productivité économique (R.67.2.51).

4.2.3 Acteurs, institutions et anatomie des décisions

Les articles regroupés dans cette section apportent des éclairssements approfondis sur les raisons qui déterminent la nature des décisions territoriales. L'étude de cas de la Crau analyse les échelles imbriquées et la fragmentation institutionnelle au sein d'un hydrosystème où l'irrigation gravitaire assure 70% de la réalimentation de la nappe phréatique; ainsi, une irrigation jugée «inefficace» permet en réalité d'approvisionner en eau potable pour 300 000 personnes (R.67.2.08). Une analyse fondée sur des entretiens menés en Californie montre que les technologies de détection disponibles sont structurellement inadaptées aux systèmes des petites exploitations agricoles (R.67.2.20). Il est démontré que les districts d'amélioration des terres japonais supporte des charges méconnues de régulation des inondations, les canaux d'irrigation fournissant des services écosystémiques dans un contexte d'urbanisation (R.67.2.21). Des analyses multi-échelles de la gouvernance de l'irrigation en Malaisie identifient la fragmentation institutionnelle et la faible interopérabilité des données comme des contraintes majeures (R.67.2.27). Des contributions conceptuelles réorientent les modèles de transfert de la gestion de l'irrigation (IMT) et de la gestion participative de l'irrigation (PIM) vers une gouvernance polycentrique à l'échelle du bassin; elles mettent en garde contre l'effet de rebond lié aux gains d'efficacité (R.67.2.37) et proposent des architectures d'IA explicable pour surmonter la «crise de prise de décision» entre analyse et action (R.67.2.28). L'analyse économique axée sur les parties prenantes est présentée comme un outil de conception pour les projets de transition agroécologique et d'irrigation (R.67.2.06); les outils cluster-matrice encadrent la planification stratégique des zones interfluves irriguées (R.67.2.13); et l'irrigation pratiquée par les petits exploitants est documentée comme une forme de protection sociale de fait dans le périmètre de Chivi, au Zimbabwe (R.67.2.40).

4.3 Amélioration du processus de décision

4.3.1 Plates-formes et infrastructure de décision numérique

Le plus grand groupe de contributions construit des systèmes territoriaux d'aide à la décision. Les simulateurs hydrologiques à l'échelle du bassin prennent en charge la gouvernance de la sécheresse anticipée avec des horizons de six mois (WatSim, R.67.2.01). L'outil co-créé IPON (Irrigation Performante de l'Office du Niger) calcule onze indicateurs de performance d'irrigation pour les 142 000 ha de l'Office du Niger à partir des données WaPOR et de données de distribution, avec une propriété institutionnelle documentée, privilégiant «l'instauration d'un climat de confiance avant la mise au point de l'outil» (R.67.2.02). En Inde, les plateformes nationales intègrent l'IA, l'IoT et des jumeaux numériques à très grande échelle (R.67.2.09); l'apprentissage automatique permet d'estimer l'humidité des sols à l'échelle de la parcelle à travers l'Europe sans exiger des capteurs in situ sur chaque champ (Soil Vision, R.67.2.11); l'application géospatiale soutient la planification nationale de l'irrigation au Rwanda malgré des contraintes liées aux données (R.67.2.17); au Maroc, la plateforme web relie la comptabilité de l'eau et le lien entre Eau-Énergie-Alimentation-Écosystèmes (WEFE) grâce à la simulation participative de scénarios (R.67.2.18); en Provence, les réseaux d'eau intelligents comptant 68 000 points de distribution déploient les compteurs d'eau intelligents, les jumeaux numériques et l'IA (REImu, R.67.2.22); l'apprentissage automatique intégrant des lois physiques résout des conflits morphodynamiques dans un bassin indonésien via un jumeau numérique partagé (R.67.2.32); l'IA et la gouvernance des données sont combinées au sein de la base de données nationale d'irrigation et de l'outil de calcul d'irrigation de l'Arabie saoudite, couvrant 29 villes (R.67.2.39); en Italie, les portefeuilles de produits issus de

l'observation de la Terre soutiennent la prise de décision à plusieurs échelles, de la parcelle au bassin versant (R.67.2.53); les cadres adaptatifs pilotés par l'IA sont conçus pour les systèmes combinant les zones humides–agricoles (R.67.2.25); enfin, l'étude de synthèse sur la télédétection appliquée à la gestion de l'irrigation identifie le manque de co-création comme le principal obstacle à l'adoption de ces technologies (R.67.2.23).

4.3.2 Mécanismes d'allocation et instruments économiques

Le deuxième levier concerne l'allocation. La modélisation des institutions de comptage en Afrique du Sud montre que seul le comptage volumétrique direct rend explicite la valeur d'ombre de l'eau («shadow value») de l'eau et incite les arroseurs à passer d'une réduction des surfaces irriguées à une irrigation déficitaire (R.67.2.43). Quatre modes de participation fondés sur le capital social (gestion par concession, modèle «irrigation agricole +», échanges de droits d'eau et finance verte) sont analysés dans des périmètres irrigués modernes de la Chine (R.67.2.07). L'optimisation multi-objectifs permet de coordonner la structure de l'eau et des cultures dans un périmètre du Sichuan (R.67.2.30) et les stratégies de régulation eau-sol sont dérivées pour le bassin versant de Jaune à partir d'une analyse de dynamique des systèmes WEEF (eau-écologie-énergie-alimentation) et d'un diagnostic de résistance climatique (R.67.2.34). La tarification de l'eau gérée par satellite améliore l'identification des usagers et le recouvrement des frais dans la vallée du Sénégal (projet MOSIS, R.67.2.48); une politique proactive de sobriété d'eau sur le canal de Carpentras est examinée comme levier de réallocation territoriale, tout en soulignant ses limites face au changement climatique (R.67.2.52); une l'évaluation territoriale du cycle de vie compare les scénarios d'infrastructure et de diversification en Provence sous l'angle de l'éco-efficacité (R.67.2.04); une modernisation du périmètre irrigué de Hetao (bassin versant de Jaune) est interprétée comme une transition impliquant des compromis explicites entre l'économie d'eau, l'expansion des cultures de rente et le risque de salinisation (R.67.2.16); enfin, un diagnostic intégré de la réforme de l'irrigation d'un grenier à riz malais affichant une efficacité de 17% aboutit à la définition de règles d'allocation déclenchées par des paramètres hydrologiques (R.67.2.47).

4.3.3 infrastructure en tant que facilitateur

Les décisions territoriales sont en fin de compte contraintes par des systèmes physiques. Les tapis composites cimentaires géosynthétiques permettent de réhabiliter les canaux en quelques jours, avec une réduction de l'infiltration documentée à 96% en Californie et une installation hivernale en Hongrie (R.67.2.15); des stratégies de riziculture économes en eau sont simulées à l'aide de QGIS-SWAP-Paddy (une version spatialisée du modèle SWAP, intégrant un module simulant la percolation du réseau de canaux) et couplées à MODFLOW-6 à Lomellina (Italie), où l'humidification et le séchage alternés favorise une réalimentation précoce des nappes tout en atténuant la demande de pointe (R.67.2.24); en Iran, des couvertures photovoltaïques installées sur des canaux réduisent considérablement l'évaporation tout en produisant de l'électricité, avec une période de retour de 10,7 ans (R.67.2.38); en Californie,un aménagement du bassin de réalimentation transforme des terres agricoles acquises en zones de stockage des eaux souterraines, conformément au SGMA (la loi sur la Gestion durable des eaux souterraines de 2014) (R.67.2.46); enfin, des enquêtes aériennes menées par véhicule aérien sans pilote (UAV) couplées à une modélisation hydraulique HEC-RAS permettent une évaluation hydraulique rapide d'un canal indien de 26 km, en identifiant les zones de fort exhaussement et les risques de débordement (R.67.2.49).

4.4 Réponse à la sous-question 67.2

Comment expliquer et améliorer le processus de prise de décision à l'échelle territoriale? À cet égard, il apparaît que ce processus est façonné par quatre types de facteurs : facteurs

agricoles (structures des cultures et besoins en eau associés, R.67.2.19, .30, .42), facteurs économiques (tarification de l'eau, recouvrement des frais, écarts de productivité, R.67.2.43, .48, .51), facteurs environnementaux (trajectoires climatiques, salinité, réalimentation et fonctions écosystémiques, R.67.2.03, .08, .10, .12, .21) et facteurs réglementaires (règles d'allocation, mandats institutionnels et leur fragmentation, R.67.2.27, .37, .46, .47). Il améliore le processus selon trois leviers complémentaires que les articles documentent avec des preuves opérationnelles : des infrastructures d'information partagées et fiables, offrant à tous les acteurs une vision commune de la ressource (R.67.2.01, .02, .18, .22, .50, .53); les mécanismes d'allocation et économiques qui transmettent la rareté aux décisions (R.67.2.07, .43, .48, .52); et les dispositions participatives permettant de transformer l'information en décisions acceptées (R.67.2.02, .18, .23). Les contributions combinant ces trois leviers sont précisément celles qui font état d'une adoption institutionnelle soutenue.

5. CONVERGENCES ET COMPROMIS

5.1 Convergences

Trois convergences transversales aux deux sous-questions peuvent être dégagées.

- Tout d'abord, l'Observation de la Terre a achevé sa transition de la recherche à l'exploitation : les mêmes familles de produits WaPOR, Sentinel, Landsat et OpenET apparaissent dans la programmation des irrigations à l'échelle de l'exploitation ainsi que dans la comptabilité nationale de l'eau.

- Deuxièmement, la co-création — définie comme la conception conjointe d'outils et de règles avec les utilisateurs finaux dès le départ, plutôt que leur transfert après développement — est systématiquement identifiée, indépendamment sur quatre continents, comme le facteur déterminant de l'adoption (R.67.1.22, R.67.1.54, R.67.1.61 ; R.67.2.02, R.67.2.17, R.67.2.18, R.67.2.23).

- Troisièmement, l'anticipation remplace la réaction comme principe organisateur de la gestion de l'eau, allant des prévisions hebdomadaires d'évapotranspiration (ET) aux perspectives de sécheresse à six mois.

Cette convergence est aussi bien structurelle que thématique : les deux sous-questions décrivent la chaîne de décision illustrée par la figure 2, lue à deux échelles différentes. Ce que l'exploitation observe au niveau des sols et des cultures, le territoire l'observe à l'échelle des périmètres irrigués et des aquifères; la programmation à l'échelle de l'exploitation trouve son équivalent dans l'allocation et la planification, le contrôle automatisé des parcelles dans la gestion des réservoirs et des réseaux, et les rapports traçables de l'arroseur en matière de comptabilité des eaux territoriales, le recouvrement des frais et les vérifications. La gouvernance conditionne chaque étape aux deux échelles, des règles collectives de distribution jusqu'aux politiques d'allocation et de données.*

5.2 Compromis

Les articles des deux sous-questions démontrent, avec des données, que les gains d'efficacité réalisés à une échelle ne se traduisent pas automatiquement à l'autre : les économies réalisées au niveau de la parcelle diminuent à l'échelle du bassin sans gestion de l'allocation (R.67.1.16); la micro-irrigation techniquement adéquate peut coexister avec la programmation inadaptée (R.67.1.57); les gains d'efficacité peuvent entraîner une augmentation de la demande (R.67.2.37, R.67.2.16); enfin, ce sont les modalités de comptage (et non les goutteurs) qui déterminent si la pénurie affecte la fonction objectif de l'arroseur (R.67.2.43, R.67.1.35). **

Une deuxième question concerne les personnes desservies : l'offre technologique est calibrée sur des exploitations disposant de ressources suffisantes, tandis que les petites exploitations et celles situées en marge du système restent en dehors des hypothèses de conception (R.67.2.20, R.67.1.33, R.67.1.63).

5.3 De l'innovation d'habilitation à l'innovation transformatrice

Les contributions peuvent être placées sur une échelle à quatre niveaux distinguant la nouveauté de la transformation. La classification proposée ci-dessous est un «appareil de lecture» et non un jugement porté sur les articles individuels.

Tableau 3. Échelle à quatre niveaux des innovations présentées, allant de l'innovation d'habilitation à l'innovation transformatrice. Cette classification est proposée comme un appareil de lecture et non comme un jugement sur les articles individuels.

Niveau	Caractéristiques	Exemples tirés des documents
1. Facilitateur	Améliore la mesure ou un composant technique spécifique	R.67.1.33, .45, .49, .60; R.67.2.36, .41
2. Intégré	Combine plusieurs flux d'informations en aide à la décision	R.67.1.15, .43, .48; R.67.2.11, .18
3. Opérationnel	Modifie la gestion en temps réel ou met en œuvre des décisions	R.67.1.22, .27, .56; R.67.2.01, .22
4. Transformateur (institutionnel)	Modifie les acteurs de la décision, les modalités d'allocation de l'eau ou les méthodes de vérification de la performance	R.67.1.35, .54; R.67.2.02, .07, .43, .48

L'échelle n'est pas un classement de la sophistication technique. Un outil sophistiqué reste une innovation d'habilitation s'il ne parvient jamais à prendre une décision réelle, tandis qu'un changement institutionnel relativement simple, tel qu'une tarification volumétrique ou un plan d'assolement défini conjointement, peut être transformateur s'il modifie durablement le comportement d'utilisation de l'eau.

6. CONCLUSIONS

Où en sommes-nous ? Sur la base de ces contributions : l'observation et la prévision sont devenues une infrastructure opérationnelle; la couche d'aide à la décision est en cours de construction à toutes les échelles, de la parcelle au niveau national; et la contrainte majeure pesant sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau est passée de la mesure à la gouvernance — c'est-à-dire vers les institutions, les incitations et les relations qui déterminent si les données mesurées influencent réellement les décisions prises.

La sous-question 67.1 montre que les pratiques au niveau de la parcelle peuvent désormais être évaluées avec une précision sans précédent et améliorées par des interventions documentées et quantifiées. La sous-question 67.2 démontre que la prise de décision à l'échelle territoriale peut être expliquée — et donc améliorée — lorsque les infrastructures de données, les mécanismes d'allocation et les dispositions participatives progressent de concert. Les travaux convergent vers une même orientation : une conception conjointe de la technologie et des institutions, des outils élaborés avec leurs utilisateurs et une gestion qui anticipe plutôt qu'elle ne réagit.

Quatre questions traversent ces travaux sans jamais trouver de réponse : qui paie, à qui appartiennent les données, que se passe-t-il en cas de défaillance technologique et qui bénéficie du système ? En tenant compte des compromis évoqués dans la section 5, les orientations suivantes se dégagent :

1. Présenter les résultats en matière d'efficacité à plusieurs échelles : plusieurs contributions montrent que les économies réalisées à l'échelle de la parcelle ne correspondent pas nécessairement à celles observées à l'échelle du bassin; les études revendiquant des économies d'eau devraient préciser l'échelle concernée et, dans la mesure du possible, la destination finale de l'eau ainsi « économisée » (R.67.1.16 ; R.67.2.16, .37, .43).

2. Concevoir les outils en vue de leur adoption dès le départ : trop souvent, les outils sont d'abord développés selon des critères techniques avant d'être diffusés aux agriculteurs et aux gestionnaires de l'eau via des formations et des démonstrations. Les travaux montrent que cette approche fonctionne rarement : une adoption durable est observée lorsque les utilisateurs finaux participent à la conception de l'outil dès le début — en définissant ses fonctionnalités et son intégration dans leurs processus de décision réels — alors que l'adoption échoue lorsqu'ils sont simplement formés à un produit fini (R.67.1.22, .54, .61 ; R.67.2.02, .17, .18, .23).

3. Associer chaque plateforme numérique à un plan de durabilité institutionnelle et financière : le fonctionnement à long terme des nombreuses plateformes présentées (continuité des données, maintenance, ressources humaines au-delà de la phase de projet) est l'aspect le moins documenté de ces travaux. Les contributions intégrant une analyse économique, telles que la R.67.1.56 qui présente des chiffres explicites concernant la période de retour et le taux d'adoption, démontrent qu'il est possible de le faire.

4. Définir rapidement la propriété des données et l'interopérabilité : l'irrigation devenant une activité gourmande en données, la propriété de ces dernières, le maintien de l'accès et la capacité des systèmes à communiquer entre eux déterminent si les plateformes survivront au-delà de la durée des projets La faiblesse de l'interopérabilité est déjà identifiée comme une contrainte majeure en ce qui concerne la gouvernance (R.67.2.27), et les dispositions nationales de gouvernance des données commencent seulement à émerger (R.67.2.39).

5. Anticiper aussi bien les défaillances que les performances : l'irrigation automatisée et l'allocation assistée par l'IA nécessitent des procédures de secours, une définition claire des responsabilités en cas de reprise manuelle et une communication honnête sur les incertitudes. Ces questions sont à peine abordées dans les résumés.

6. Veiller à la qualité des mesures : la fiabilité des outils d'aide à la décision dépend de la qualité des données qui les alimentent; mais, la précision des mesures est rarement vérifiée ou communiquée, et les erreurs se propagent silencieusement dans toutes les décisions en aval. Les normes et le signalement systématique des erreurs méritent une attention particulière (R.67.1.33, .37, .57).

7. Concevoir des solutions pour les petits exploitants, et pas seulement pour les exploitations bien équipées : les technologies d'irrigation disponibles sont largement calibrées pour des systèmes agricoles disposant de ressources suffisantes; les petites exploitations et celles situées en marge du système doivent être prises en compte dès la phase de conception, plutôt que de devoir s'adapter à des outils conçus pour d'autres (R.67.1.63 ; R.67.2.20, .40).

8. Valoriser l'ensemble des services rendus par l'eau d'irrigation : les infrastructures d'irrigation fournissent souvent des services allant au-delà de la production agricole (réalimentation des aquifères, régulation des crues, soutien aux écosystèmes). Les débats sur l'allocation territoriale de l'eau devraient évaluer « l'efficacité » au regard de cet ensemble de fonctions, et non pas uniquement par rapport à l'utilisation/la productivité de l'eau des cultures (R.67.2.08, .21, .24, .46).

Si toutes ces contributions convergent vers un objectif unique, c'est bien celui de la responsabilité : un secteur de l'irrigation capable d'indiquer quelle quantité d'eau était disponible, comment elle a été utilisée, pourquoi certaines décisions ont été prises et ce qui devrait changer à l'avenir.

REMERCIEMENTS

Le Rapporteur général tient à remercier les auteurs des 117 contributions analysées dans le cadre de la Question 67, dont les travaux constituent la substance de ce rapport; les membres du groupe d'experts, pour leur soutien lors de l'examen des soumissions et l'élaboration de l'analyse ; ainsi que le Bureau central de la CIID, pour son aide en matière de communication et pour la transmission en temps opportun de tous les documents.

ABSTRACTS OF PAPERS RECEIVED IN RESPONSE TO /
RÉSUMÉS DES ARTICLES REÇUS EN RÉPONSE À

Q.67.1: Irrigation practices and technologies at the plot and farm levels reflect individual skills, objectives, decisions, and philosophies. How can these be evaluated and improved?

Les pratiques et technologies d'irrigation à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation agricole reflètent les compétences individuelles, les objectifs, les décisions et les philosophies. Comment peut-on les évaluer et les améliorer?

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS — **Page No.**

R.67.1.01 **OPERATIONAL GOOGLE EARTH ENGINE-BASED SEBAL FOR EVALUATING IRRIGATION PERFORMANCE AND WATER PRODUCTIVITY IN THE EASTERN NILE DELTA, EGYPT** — 225
MISE EN ŒUVRE OPÉRATIONNELLE DE SEBAL SOUS GOOGLE EARTH ENGINE POUR L'ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE L'IRRIGATION ET DE LA PRODUCTIVITÉ DE L'EAU DANS L'EST DU DELTA DU NIL, EN ÉGYPTE
Noha Salah (Egypt)

R.67.1.02 **CONVERTING SENTEK VOLUMETRIC ION CONTENT TO ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE SATURATED EXTRACT FOR A RANGE OF SOIL TEXTURES** — 228
CONVERSION DE LA TENEUR IONIQUE VOLUMIQUE SENTEK EN CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DE L'EXTRAIT DE PATE SATUREE POUR DIFFERENTES TEXTURES DE SOL
Dalton, M,Intervera, M., Singh, A., Costa, G., Guy, R., Antini, P., Cesaretti,T., Curtis, A., and Buss, P (Australia)

R.67.1.03 **DEEP LEARNING BASED ENHANCEMENT OF SENTINEL-2 IMAGES FOR FIELD SCALE EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATION** — 230
AMÉLIORATION DES IMAGES SENTINEL-2 PAR APPRENTISSAGE PROFOND POUR L'ESTIMATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE
Hamidreza Noorbakhsh and. Nozar Ghahreman (Iran)

R.67.1.04 **CLIMATE-SMART IRRIGATION TECHNOLOGIES FOR A RESILIENT AND SUSTAINABLE AGRICULTURE** — 232
TECHNOLOGIES D'IRRIGATION INTELLIGENTES FACE AU CLIMAT POUR UNE AGRICULTURE RÉSILIENTE ET DURABLE
Luxon Nhamo, Cuthbert Taguta, Sylvester Mpandeli, Tinashe Dirwai, Stanley Liphadzi, and Tafadzwanashe Mabhaudhi (South Africa)

R.67.1.05 **APPLICATION OF CLIMATE RESILIENT AND EFFICIENT IRRIGATION TECHNOLOGIES FOR ENHANCING WATER PRODUCTIVITY IN PAKISTAN** — 234
APPLICATION DE TECHNOLOGIES D'IRRIGATION EFFICIENTES ET RÉSILIENTES AU CLIMAT POUR AMÉLIORER LA PRODUCTIVITÉ DE L'EAU AU PAKISTAN
Hafiz Qaisar Yasin (Pakistan)

R.67.1.06 **QUANTIFYING CONSUMPTIVE WATER SAVINGS IN DEFICIT-IRRIGATED ALFALFA USING THE OPENET SATELLITE FRAMEWORK** — 237
QUANTIFICATION DES ÉCONOMIES D'EAU CONSOMMÉE DANS LA LUZERNE SOUMISE À UNE IRRIGATION DÉFICITAIRE À L'AIDE DU CADRE SATELLITAIRE OPENET
Aliasghar Montazar, John W. Shields, Andre Daccache, and Daniel H. Putnam (USA)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.67.1.07 A NOVEL SILT-WATER SEPARATION STRUCTURE FOR PIPES OFF-TAKING FROM IRRIGATION CANALS 239
UNE NOUVELLE STRUCTURE DE SÉPARATION LIMON-EAU POUR LES CONDUITES DÉRIVANT L'EAU DES CANAUX D'IRRIGATION
Dr. Venkata Ramamohan Ramachandrula (India)

R.67.1.08 DYNAMIC MONITORING AND RAPID DIAGNOSIS OF RICE WATER STATUS BASED ON UAV REMOTE SENSING AND MACHINE LEARNING ALGORITHMS 241
SUIVI DYNAMIQUE ET DIAGNOSTIC RAPIDE DE L'ÉTAT HYDRIQUE DU RIZ FONDÉS SUR LA TÉLÉDÉTECTION PAR DRONE ET DES ALGORITHMES D'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE
Wentong Bi, Wei Zhang, Yupu He, Jing Fu, and Zijun Mai (China)

R.67.1.09 CLIMATE-SMART IRRIGATION TECHNOLOGIES AND STRATEGIES FOR FORAGE CROPS IN CALIFORNIA'S LOW DESERT 243
TECHNOLOGIES ET STRATÉGIES D'IRRIGATION INTELLIGENTES FACE AU CLIMAT POUR LES CULTURES FOURRAGÈRES DANS LE DÉSERT DE BASSE ALTITUDE DE CALIFORNIE
Aliasghar Montazar (USA)

R.67.1.10 A DATA-DRIVEN TOOL FOR SITE-SPECIFIC IRRIGATION OPTIMIZATION IN VINEYARDS 245
UN OUTIL PILOTÉ PAR LES DONNÉES POUR L'OPTIMISATION DE L'IRRIGATION PROPRE À CHAQUE SITE DANS LES VIGNOBLES
M. Rodríguez-Febereiro, M. Fandiño, J. Yuste, D. Rey, J. Martínez-Barbera, D. Martínez-Porro, D. Gutíerrez, R. Ferrer-Gallego C. Rey, R. Pérez-Añón , D. Franco, and J. Cancela (Spain)

R.67.1.11 DO WE KNOW WHETHER DECISION SUPPORT SYSTEMS FOR IRRIGATION ARE USEFUL? 247
SAVONS-NOUS SI LES SYSTÈMES D'AIDE À LA DÉCISION POUR L'IRRIGATION SONT UTILES?
Claire Richert, Frédéric Grelot, Sophie Martin, and Hélène Tribouillois (France)

R.67.1.12 OPTIMIZING ROTATIONAL IRRIGATION STRATEGIES AND ENHANCING WATER-USE EFFICIENCY IN THE HOULI CANAL SYSTEM: AN OPTIMIZATION MODEL BASED ASSESSMENT 249
OPTIMISATION DES STRATEGIES D'IRRIGATION PAR ROTATION ET AMELIORATION DE L'EFFICIENCE DE L'UTILISATION DE L'EAU DANS LE RESEAU DE CANAUX DE HOULI: EVALUATION FONDEE SUR UN MODELE D'OPTIMISATION
Yun Wei Tan. Ming-Che Hu, and Feng Wen Chen (Taiwan)

R.67.1.13 SURROGATE MODELING FOR THE OPTIMIZATION OF ADVANCED WATER TREATMENT SYSTEMS IN IRRIGATION AND WATER REUSE CONTEXTS 252
MODÉLISATION DE SUBSTITUTION POUR L'OPTIMISATION DES SYSTÈMES AVANCÉS DE TRAITEMENT DE L'EAU DANS LES CONTEXTES DE L'IRRIGATION ET DE LA RÉUTILISATION DE L'EAU
Derviş Durmaz, Rémy Dutto, Alain Rapaport, Aymen Chaaben, and Jérôme Harmand (Turkiye)

R.67.1.14 CONDITIONS OF SUCCESS FOR CONNECTED TECHNOLOGIES IN COLLECTIVE IRRIGATION 254
CONDITIONS DE RÉUSSITE DES TECHNOLOGIES CONNECTÉES DANS L'IRRIGATION COLLECTIVE
Aguylan Bernanos, Anthony Blache, and Pierre Savey (France)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.67.1.15 **IRRIGABLE: A HYDRO-SPATIAL APP FOR MANAGING IRRIGATION PERFORMANCE AT DIFFERENT SCALES FOR DIFFERENT PURPOSES** 256
IRRIGABLE : UNE APPLICATION HYDROSPATIALE POUR GÉRER LES PERFORMANCES DE L'IRRIGATION À DIFFÉRENTES ÉCHELLES ET À DIVERSES FINS
Bruce Lankford, Aaditeshwar Seth, Shivani Mehta, Abror Gafurov, Nafn Amdar, and Salvador Peña-Haro (United Kingdom)

R.67.1.16 **CAN IRRIGATION MODERNIZATION OFFSET CLIMATE-DRIVEN INCREASES IN CROP WATER DEMAND? EVIDENCE FROM TÜRKİYE** 258
LA MODERNISATION DE L'IRRIGATION PEUT-ELLE COMPENSER L'AUGMENTATION DES BESOINS EN EAU DES CULTURES DUE AU CLIMAT? ÉLÉMENTS PROBANTS POUR LA TÜRKİYE
Gokmen Dedemen (Türkiye)

R.67.1.17 **SUBSURFACE DRIP IRRIGATION IMPROVES WATER PRODUCTIVITY AND YIELD OF SUGARCANE UNDER SEMI-ARID CONDITIONS** 260
L'IRRIGATION GOUTTE À GOUTTE SOUTERRAINE AMÉLIORE LA PRODUCTIVITÉ DE L'EAU ET LE RENDEMENT DE LA CANNE À SUCRE EN CONDITIONS SEMI-ARIDES
Goden Mabaya, Faith Chikunda, and Dyton Sakanya (Zimbabwe)

R.67.1.18 **TRACKING DROUGHT PROPAGATION AND IRRIGATION RESPONSE LAGS USING SATELLITE OBSERVATIONS** 262
SUIVI DE LA PROPAGATION DE LA SÉCHERESSE ET DES DÉCALAGES DE LA RÉPONSE DE L'IRRIGATION À L'AIDE D'OBSERVATIONS SATELLITAIRES
Young-Sik Mun, and Won-Ho Nam (Korea)

R.67.1.19 **STAGE-BASED SOIL WATER THRESHOLDS FOR CITRUS UNDER DEFICIT IRRIGATION** 264
SEUILS DE TENEUR EN EAU DU SOL SELON LE STADE PHÉNOLOGIQUE POUR LES AGRUMES SOUS IRRIGATION DÉFICITAIRE
Ce Wang, Jinyang Ye, Wei Qi, and Zhengyu Duan (China)

R.67.1.20 **AN INTEGRATED FRAMEWORK FOR TYPHOON-INDUCED AGRI-CULTURAL LOSS ACROSS MULTIPLE CROPS** 266
UN CADRE INTÉGRÉ D'ÉVALUATION DES PERTES AGRICOLES DUES AUX TYPHONS POUR PLUSIEURS CULTURES
Jui-Yun Hsieh, and Yuan-Chien Lin (Taiwan)

R.67.1.21 **OPTIMIZING LINEAR MOVE IRRIGATION SYSTEMS FOR PRECISION LIVESTOCK EFFLUENT APPLICATION IN MAIZE CULTIVATION** 268
OPTIMISATION DES SYSTÈMES D'IRRIGATION À RAMPE FRONTALE POUR L'ÉPANDAGE DE PRÉCISION D'EFFLUENTS D'ÉLEVAGE EN CULTURE DE MAÏS
F. Salmaso, and L. Bortolini (Italy)

R.67.1.22 **HIDRIX FOR CONTINUOUS IMPROVEMENT AND TRACEABILITY IN IRRIGATION MANAGEMENT** 270
HIDRIX POUR L'AMELIORATION CONTINUE ET LA TRAÇABILITE DE LA GESTION DE L'IRRIGATION
S. Guéry, M. del Toro Peters, C. Campillo Torres, and F. Pascual Bernardo (Spain)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.67.1.23 A COMPREHENSIVE STUDY ON REAL-TIME MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION FOR EFFICIENT WATER DISTRIBUTION IN CANAL SYSTEMS 272
ÉTUDE APPROFONDIE DE L'OPTIMISATION MULTIOBJECTIF EN TEMPS RÉEL POUR UNE DISTRIBUTION EFFICACE DE L'EAU DANS LES RÉSEAUX DE CANAUX
Mai Zijun, He Yupu, Ji Renjing, Zhang Wei, Qi Wei, and Zha Yuanyuan (China)

R.67.1.24 EVALUATING STAKEHOLDER COMMUNICATION AND ADAPTIVE WATER GOVERNANCE IN FARM LEVEL IRRIGATION AREA 274
ÉVALUATION DE LA COMMUNICATION AVEC LES PARTIES PRENANTES ET DE LA GOUVERNANCE ADAPTATIVE DE L'EAU DANS UNE ZONE IRRIGUEE A L'ECHELLE DES EXPLOITATIONS AGRICOLES
Tsu-Chuan Lee and Paul Abudulai Yelinje (Taiwan)

R.67.1.25 CORN GROWING PRACTICES ON CLAY SOILS UNDER DRIP IRRIGATION IN THE STEPPE ZONE OF UKRAINE 276
PRATIQUES DE CULTURE DU MAÏS SUR SOLS ARGILEUX SOUS IRRIGATION GOUTTE À GOUTTE DANS LA ZONE STEPPIQUE DE L'UKRAINE
M. Romashchenko, V. Bohaienko, R. Saidak, M. Fedko, T. Matiash and V. Knysh (Ukraine)

R.67.1.26 EARTH OBSERVATION AND SMART METERING TO SPATIALIZE AGRICULTURAL WATER USES IN MEDITERRANEAN CONTEXT 278
OBSERVATION DE LA TERRE ET COMPTAGE INTELLIGENT POUR SPATIALISER LES USAGES AGRICOLES DE L'EAU EN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN
Mamadou Diarra, Arnaud T. Ouedraogo, Julien Lecollinet, and Nicolas Urruty (France)

R.67.1.27 A PLUG-AND-PLAY IRRIGATION MANAGEMENT SYSTEM BASED ON HYDRAULIC NETWORK MODELLING: TECHNICAL, OPERATIONAL AND ECONOMIC IMPACTS 280
UN SYSTÈME DE GESTION DE L'IRRIGATION PRÊT À L'EMPLOI FONDÉ SUR LA MODÉLISATION DES RÉSEAUX HYDRAULIQUES : IMPACTS TECHNIQUES, OPÉRATIONNELS ET ÉCONOMIQUES
S. Demech (France)

R.67.1.28 GHG EMISSIONS, WATER PRODUCTIVITY AND YIELD PATTERNS IN THE RICE–WHEAT PRODUCTION SYSTEM OF PUNJAB, PAKISTAN 281
ÉMISSIONS DE GES, PRODUCTIVITÉ DE L'EAU ET PROFILS DE RENDEMENT DANS LE SYSTÈME DE PRODUCTION RIZ–BLÉ DU PENDJAB, AU PAKISTAN
Dr. Abdul Qayyum, and Dr. Mirza Waseem Abbas (Pakistan)

R.67.1.29 USING HIGH-RESOLUTION ORTHOIMAGE FOR UPDATING AND OVERLAYING AGRICULTURAL CANAL GEOSPATIAL DATA 282
UTILISATION D'ORTHOIMAGES À HAUTE RÉSOLUTION POUR METTRE À JOUR ET SUPERPOSER LES DONNÉES GÉOSPATIALES DES CANAUX AGRICOLES
C. Wijaya, H.-Y. Shih, Z.-Y. Lee, and H.-H. Chan (Taiwan)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.67.1.30 **10 YEARS OF USING PLANT SENSORS TO MANAGE WATER CYCLE OF MEDITERRANEAN CROPS** 284
DIX ANS D'UTILISATION DE CAPTEURS SUR LES PLANTES POUR PILOTER LE CYCLE HYDRIQUE DES CULTURES MÉDITERRANÉENNES
J. Beraud. J. Girard, F. Bustamante and JV. Heckenroth, T. Scholasch, and C. Laurent (France)

R.67.1.31 **ASSESSING DRY SEEDING AND DELAYED FLOODING IN RICE USING REMOTE SENSING IN THE LOWER MONDEGO VALLEY, PORTUGAL** 286
ÉVALUATION DU SEMIS À SEC ET DE LA MISE EN EAU DIFFÉRÉE DU RIZ PAR TÉLÉDÉTECTION DANS LA BASSE VALLÉE DU MONDEGO, AU PORTUGAL
Diana Valente, Susana Ferreira, José Manuel Gonçalves, and Juan Manuel Sánchez (Spain)

R.67.1.32 **FROM EXPERIENCE TO ALGORITHMS: ADAPTIVE GATE OPERATION FOR WATER-SCARCE IRRIGATION DISTRICTS** 288
DE L'EXPÉRIENCE AUX ALGORITHMES: MANŒUVRE ADAPTATIVE DES VANNES DANS LES PÉRIMÈTRES IRRIGUÉS EN SITUATION DE PÉNURIE D'EAU
Ji-Hyeon Shin, and Won-Ho Nam (Korea)

R.67.1.33 **EVALUATION OF NOVEL APPLICATIONS OF LOW COST CAPACITIVE SENSORS FOR IRRIGATION MANAGEMENT** 290
ÉVALUATION DE NOUVELLES APPLICATIONS DE CAPTEURS CAPACITIFS À FAIBLE COÛT POUR LA GESTION DE L'IRRIGATION
G. Ingersoll, and C. Leauthaud (United States)

R.67.1.34 **COST-EFFECTIVE INTEGRATED OPTIMIZATION OF IRRIGATION SCHEDULING AND PRESSURE REGULATION IN PRESSURIZED IRRIGATION NETWORKS UNDER WATER SCARCITY AND VARIABLE SUPPLY CONDITIONS** 292
OPTIMISATION INTÉGRÉE ET RENTABLE DE LA PROGRAMMATION DE L'IRRIGATION ET DE LA RÉGULATION DE LA PRESSION DANS LES RÉSEAUX D'IRRIGATION SOUS PRESSION EN CONDITIONS DE PÉNURIE D'EAU ET D'APPROVISIONNEMENT VARIABLE
Amin Ketabi. and Mohammad Javad Monem (Iran)

R.67.1.35 **WATER-SAVING EFFECTS OF INDIVIDUAL VOLUMETRIC WATER CHARGE SYSTEMS IN JAPANESE IRRIGATION DISTRICTS** 294
EFFETS DES SYSTÈMES INDIVIDUELS DE TARIFICATION VOLUMÉTRIQUE DE L'EAU SUR LES ÉCONOMIES D'EAU DANS LES PÉRIMÈTRES IRRIGUÉS JAPONAIS
Miho Hamano, Shien Hasebe, Atsushi Ishii, and Yohei Asada (Japan)

R.67.1.36 **SATELLITE-POWERED IRRIGATION INTELLIGENCE: A DECISION-SUPPORT SYSTEM FOR RESILIENT AGRICULTURE** 296
INTELLIGENCE SATELLITAIRE AU SERVICE DE L'IRRIGATION: UN SYSTÈME D'AIDE À LA DÉCISION POUR UNE AGRICULTURE RÉSILIENTE
Ivana Radošević, and Damir Matić (Croatia)

R.67.1.37 **MULTI-SCALE SOIL MOISTURE METROLOGY IN MODELLING TOOLS FOR CLIMATE-RESILIENT AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT** 298
MÉTROLOGIE MULTI-ÉCHELLE DE L'HUMIDITÉ DU SOL DANS LES OUTILS DE MODÉLISATION POUR UNE GESTION DE L'EAU AGRICOLE RÉSILIENTE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE
B. Cheviron, and R. Cvejić (France)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.67.1.38 RESEARCH ON WATER AND NITROGEN MONITORING AND DECISION-MAKING TECHNOLOGY OF CHILI BASED ON UAV HYPERSPECTRAL REMOTE SENSING 300
RECHERCHE SUR LES TECHNOLOGIES DE SUIVI ET D'AIDE À LA DÉCISION POUR LA GESTION DE L'EAU ET DE L'AZOTE DU PIMENT FONDÉES SUR LA TÉLÉDÉTECTION HYPERSPECTRALE PAR DRONE
Qi Wei, He Yupu, Zhang Wei, Huang Richao, and Gu Nan (China)

R.67.1.39 UNDERSTANDING SORGHUM WATER USE TO CONTRASTED IRRIGATION REGIMES UNDER CONTROLLED FIELD CONDITIONS 302
COMPRENDRE L'UTILISATION DE L'EAU PAR LE SORGHO SOUMIS À DES RÉGIMES D'IRRIGATION CONTRASTÉS EN CONDITIONS CONTRÔLÉES AU CHAMP
Larsonneau Pierre, Gendre Sophie, and Moynier Jean-Louis (France)

R.67.1.40 FROM FRUIT BIOWASTE TO FIELD SCALE WATER SAVINGS: EVALUATING A NATURAL SUPERABSORBENT POLYMER FOR IMPROVED IRRIGATION PRACTICES AND WATER INPUTS 303
DES BIODÉCHETS FRUITIERS AUX ÉCONOMIES D'EAU À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE: ÉVALUATION D'UN POLYMÈRE SUPERABSORBANT NATUREL POUR AMÉLIORER LES PRATIQUES D'IRRIGATION ET LES APPORTS EN EAU
Ritu Panwar, and Narayan Lal Gurjar (India)

R.67.1.41 TRANSFORMING IRRIGATION THROUGH AUTOMATION - INSIGHTS FROM INDIA'S NLBC MODERNISATION AND GLOBAL LEARNINGS 305
TRANSFORMER L'IRRIGATION PAR L'AUTOMATISATION – ENSEIGNEMENTS TIRÉS DE LA MODERNISATION DU NLBC EN INDE ET DES EXPÉRIENCES MONDIALES
Praveen Prakash, Varun Ravi, and Venkata Kowshik (Australia)

R.67.1.42 ENHANCING WATER USE EFFICIENCY UNDER CLIMATE VARIABILITY: A MULTI-SCALE REVIEW OF IRRIGATION SYSTEMS IN MALAYSIA 306
AMELIORATION DE L'EFFICIENCE D'UTILISATION DE L'EAU FACE A LA VARIABILITE CLIMATIQUE: UNE REVUE MULTI-ECHELLE DES SYSTEMES D'IRRIGATION EN MALAISIE
Y. Hj Mohd Sani, and M.A.A. Jamaari (Malaysia)

R.67.1.43 A DIGITAL TWIN FRAMEWORK FOR PLOT-SCALE IRRIGATION MANAGEMENT 308
UN CADRE DE JUMEAU NUMÉRIQUE POUR LA GESTION DE L'IRRIGATION À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE
María Belén Pedoja Balparda, Juan Antonio Rodríguez Díaz, María Pilar Montesinos Barrios, and Rafael González Perea (Spain)

R.67.1.44 TECHNOLOGY ADOPTION AND DATA-DRIVEN IRRIGATION MANAGEMENT IN NEPAL: STATUS, BARRIERS, AND A ROADMAP FOR WATER-USE EFFICIENCY 310
ADOPTION DES TECHNOLOGIES ET GESTION DE L'IRRIGATION FONDEE SUR LES DONNEES AU NEPAL: ETAT DES LIEUX, OBSTACLES ET FEUILLE DE ROUTE POUR L'EFFICIENCE D'UTILISATION DE L'EAU
Saroj Karki, Suchana Acharya, Sanjeeb Baral, and Tikaram Baral (Nepal)

R.67.1.45 RESEARCH ON ANTI-CLOGGING PERFORMANCE OF SELF-FLUSHING EMITTERS IN SANDY WATER CONDITIONS 312
ÉTUDE DES PERFORMANCES ANTI-COLMATAGE DE GOUTTEURS A AUTO-RINÇAGE EN CONDITIONS D'EAU CHARGEE DE SABLE
Qiameng Du, Yan Mo, and Baolin Yao (China)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.67.1.46 COMPARING IRRIGATION SCHEDULING TOOLS USED IN PRAIRIE CROP ROTATIONS 314
COMPARAISON DES OUTILS DE PROGRAMMATION DE L'IRRIGATION UTILISÉS DANS LES ROTATIONS CULTURALES DES PRAIRIES
Erin Karppinen, Evan Derdall, and Ashebir Godebo (Canada)

R.67.1.47 DIGITAL INTELLIGENCE-DRIVEN INNOVATION AND PRACTICE FOR WATER RESOURCE MANAGEMENT IN IRRIGATION DISTRICTS 316
INNOVATION ET PRATIQUES GUIDEES PAR L'INTELLIGENCE NUMERIQUE POUR LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU DANS LES PERIMETRES IRRIGUES
Yizhi Wang. and Di Wu (China)

R.67.1.48 SEASONAL FORECASTS FOR DECISION-MAKING IN MEDITERRANEAN AGRICULTURE 318
PRÉVISIONS SAISONNIÈRES POUR LA PRISE DE DÉCISION DANS L'AGRICULTURE MÉDITERRANÉENNE
Daniel Garcia, João Rolim, João Santos, and Paula Paredes (Portugal)

R.67.1.49 DESIGN AND DEVELOPMENT OF A NOVEL HIGH-PRECISION INTEGRATED MEASUREMENT AND CONTROL GATE 320
CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT D'UNE NOUVELLE VANNE INTÉGRÉE DE MESURE ET DE RÉGULATION DE HAUTE PRÉCISION
Ziming Li, Wenyong Wu, Yaqi Hu, and Aike Guo (China)

R.67.1.50 VEGETATION BLOCKAGE ASSESSMENT FOR IRRIGATION CHANNELS USING COMPUTER VISION 322
ÉVALUATION DE L'OBSTRUCTION DES CANAUX D'IRRIGATION PAR LA VÉGÉTATION AU MOYEN DE LA VISION PAR ORDINATEUR
Kai-Yu Cheng, and Bing-Chen Jhong (Taiwan)

R.67.1.51 A NOVEL APPROACH TO WATERSHED WATER BALANCE USING ADVANCED PADDY WATER METRICS 324
UNE NOUVELLE APPROCHE DU BILAN HYDRIQUE À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT AU MOYEN DE MÉTRIQUES HYDRIQUES AVANCÉES DES RIZIÈRES
Dong-Hyun Yoon, and Won-Ho Nam (Korea)

R.67.1.52 COMPREHENSIVE SIMULATION OF COTTON PRODUCTION UNDER INITIAL SOIL SALINITY SPATIAL VARIABILITY CONDITIONS: ASSESSING THE EFFECT OF DRIP HYDRAULIC PERFORMANCE AT THE SUBUNIT LEVEL 326
SIMULATION GLOBALE DE LA PRODUCTION DE COTON DANS DES CONDITIONS DE VARIABILITÉ SPATIALE DE LA SALINITÉ INITIALE DU SOL: ÉVALUATION DE L'EFFET DES PERFORMANCES HYDRAULIQUES DU GOUTTE-À-GOUTTE À L'ÉCHELLE DE LA SOUS-UNITÉ
Zhen Wang, Zhanghao Sun, and Jiusheng Li (China)

R.67.1.53 SYNERGIZING MACHINE LEARNING AND SYSTEM DYNAMICS FOR ADAPTIVE WATER MANAGEMENT IN AGRICULTURAL RESERVOIRS 328
MISE EN SYNERGIE DE L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE ET DE LA DYNAMIQUE DES SYSTÈMES POUR UNE GESTION ADAPTATIVE DE L'EAU DANS LES RÉSERVOIRS AGRICOLES
Mi-Hye Yang, and Won-Ho Nam (Korea)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.67.1.54 PARTICIPATORY WATER RESOURCES MANAGEMENT FOR SUSTAINABLE AGRICULTURAL WATER ALLOCATION: A CASE STUDY OF THE MARUN-JARAHI BASIN, SOUTHWEST IRAN 330
GESTION PARTICIPATIVE DES RESSOURCES EN EAU POUR UNE ALLOCATION DURABLE DE L'EAU AGRICOLE: ÉTUDE DE CAS DU BASSIN DE MARUN-JARAHI, DANS LE SUD-OUEST DE L'IRAN
Ali Shahbazi, Abbas Sadrianfar, Ali Sharifi, Fatemeh Zakerihosseini, Arash Mahjobi, Nooroddin Bazgir, Narges Zohrabi, Masoud Asadi, and Seyyed Hossein Mousavi (Iran)

R.67.1.55 SOIL SALINITY MAPPING USING POINT TO FIELD LEVEL REMOTE SENSING TECHNIQUES 333
CARTOGRAPHIE DE LA SALINITÉ DES SOLS AU MOYEN DE TECHNIQUES DE TÉLÉDÉTECTION, DE L'ÉCHELLE PONCTUELLE À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE
José L. Chávez, Muhammad Fawad, Kieri Karpa, Timothy K. Gates, Allan A. Andales, and Huihui Zhang (USA)

R.67.1.56 ENHANCING FARM-LEVEL WATER EFFICIENCY AND CLIMATE RESILIENCE THROUGH AN INTELLIGENT IRRIGATION MANAGEMENT PLATFORM (iFARM) 335
AMÉLIORATION DE L'EFFICIENCE D'UTILISATION DE L'EAU À L'ÉCHELLE DE L'EXPLOITATION ET DE LA RÉSILIENCE CLIMATIQUE GRÂCE À UNE PLATEFORME INTELLIGENTE DE GESTION DE L'IRRIGATION (IFARM)
Somchai Donjadee, Varawoot Vudhivanich, Nimit Cherdchanpipat, and Phatchareeya Waiphara (Thailand)

R.67.1.57 USING DISTRIBUTION UNIFORMITY TO EVALUATE IRRIGATION PERFORMANCE UNDER FARMER-MANAGED CONDITIONS IN THE JORDAN VALLEY 337
UTILISATION DE L'UNIFORMITÉ DE DISTRIBUTION POUR ÉVALUER LES PERFORMANCES DE L'IRRIGATION EN CONDITIONS DE GESTION PAR LES AGRICULTEURS DANS LA VALLÉE DU JOURDAIN
S. Talozi, A. Namarneh, and S. Saleh (Jordan)

R.67.1.58 BARRIERS TO AWD ADOPTION IN GRAVITY-FED IRRIGATION SYSTEMS AND PERSPECTIVES FOR FUTURE IMPLEMENTATION 339
OBSTACLES À L'ADOPTION DE L'AWD DANS LES SYSTÈMES D'IRRIGATION GRAVITAIRE ET PERSPECTIVES DE MISE EN ŒUVRE FUTURE
Jo Hamaguchi, Muhamad Khoiru Zaki, Tasuku Kato, and Keigo Noda (Japan)

R.67.1.59 GMIS AS A CATALYST FOR SUSTAINABLE GROUNDWATER GOVERNANCE IN PUNJAB, PAKISTAN 341
LE GMIS COMME CATALYSEUR D'UNE GOUVERNANCE DURABLE DES EAUX SOUTERRAINES AU PENDJAB, PAKISTAN
Mohsin Hafeez, Kaleem Ullah, Naveed Iqbal, Jehanzaib Cheema, Hafsa Aeman, Habib Ullah Bodla, Salman Siddiqui, **Zohaib Shahid, and Mohammad Ashraf (Pakistan)**

R.67.1.60 ELECTRICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY: NEW PERSPECTIVES FOR INTEGRATED SOIL WATER MONITORING 343
SPECTROSCOPIE D'IMPÉDANCE ÉLECTRIQUE: NOUVELLES PERSPECTIVES POUR UNE SURVEILLANCE INTÉGRÉE DE L'EAU DU SOL
Mario Nohra, Paul Vandôme, François Bernier, Gilles Belaud, and Sylvain Blayac (France)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.67.1.61 **IMPROVING IRRIGATION PRACTICE AND TECHNOLOGY FOR A WATER-SECURE AND CLIMATE-RESILIENT SYSTEM: THE CASE OF STA. MARIA; RIVER IRRIGATION SYSTEM** 345
AMÉLIORATION DES PRATIQUES ET TECHNOLOGIES D'IRRIGATION POUR LA SÉCURITÉ HYDRIQUE ET LA RÉSILIENCE CLIMATIQUE: LE CAS DU SYSTÈME D'IRRIGATION DE LA RIVIÈRE STA. MARIA
Mona Liza F. and Delos Reyes (Philippines)

R.67.1.62 **EVALUATING TRADITIONAL AND IMPROVED WATER HARVESTING TECHNIQUES USING THE FAO AQUACROP MODEL** 347
ÉVALUATION DES TECHNIQUES TRADITIONNELLES ET AMÉLIORÉES DE COLLECTE DES EAUX AU MOYEN DU MODÈLE FAO AQUACROP
Niccolò, Renzi. Lorenzo, Villani Oludare S. Durodola, Mira Haddad, Stefan Strohmeier, Andrea, Setti, Jorge, Alvar*-Beltrán, Elena, Bresci, and Giulio, *Castelli (Italy)

R.67.1.63 **UNDERGROUND PIPELINES FOR LOCAL WATER DISTRIBUTION IN CANAL IRRIGATION IN PUNJAB AND GUJARAT, INDIA** 349
CANALISATIONS ENTERRÉES POUR LA DISTRIBUTION LOCALE DE L'EAU DANS LES SYSTÈMES D'IRRIGATION PAR CANAUX AU PENDJAB ET AU GUJARAT, EN INDE
Vidya Mandavea, Peter P. Mollingab, Sachin Ozac, and Pranjal Deekshitd (India)

R.67.1.64 **INTEGRATING IOT IN SURFACE IRRIGATION: A MODELLING APPROACH TO EVALUATE THE MODERNIZATION OF IRRIGATED LANDS** 350
INTÉGRATION DE L'IOT DANS L'IRRIGATION DE SURFACE: UNE APPROCHE DE MODÉLISATION POUR ÉVALUER LA MODERNISATION DES PÉRIMÈTRES IRRIGUÉS
Yassine Khardi, Gilles Belaud, Paul Vandôme, and François Charron (Morocco)

R.67.1.65 **OPTIMIZING AND SCALING WATER PRODUCTIVITY IN IRRIGATED RICE FOR CLIMATE RESILIENT AGRICULTURE IN SOUTH ASIA** 352
OPTIMISATION ET MISE À L'ÉCHELLE DE LA PRODUCTIVITÉ DE L'EAU DANS LA RIZICULTURE IRRIGUÉE POUR UNE AGRICULTURE RÉSILIENTE AU CLIMAT EN ASIE DU SUD
Alok Sikka, Smaranika Mahapatra, Mohsin Hafeez, and Jayanta Bhattacharya (India)

R.67.1.66 **PRECISION IRRIGATION USING DATA-DRIVEN METHODS IN MAIZE** 354
IRRIGATION DE PRÉCISION DU MAÏS AU MOYEN DE MÉTHODES FONDÉES SUR LES DONNÉES
Nagy A. Szabó A., Fehér Zs. Zs, Angura L., Nxumalo G.S., and Tamás J. (Hungary)

R.67.1.67 **ASSESSING OPTIRRIG MODEL PERFORMANCE FOR IRRIGATION OPTIMIZATION IN SEMI-ARID CONDITIONS OF NORTHEAST TUNISIA** 356
ÉVALUATION DES PERFORMANCES DU MODÈLE OPTIRRIG POUR L'OPTIMISATION DE L'IRRIGATION DANS LES CONDITIONS SEMI-ARIDES DU NORD-EST DE LA TUNISIE
Yacoubi S., Slatni A., Cheviron B., Wittling C., Hermassi T., Ben Abdallah Ma., and Pouget L. (Tunisia)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.67.1.68 DISCHARGE ESTIMATION USING PHYSICS-INFORMED NEURAL NETWORKS WITH IMAGE-BASED SURFACE VELOCIMETRY 358
ESTIMATION DU DÉBIT AU MOYEN DE RÉSEAUX DE NEURONES INFORMÉS PAR LA PHYSIQUE ET DE LA VÉLOCIMÉTRIE DE SURFACE FONDÉE SUR L'IMAGE
Yen-Cheng Lin, and Hao-Che Ho (Taiwan)

R.67.1.69 REAL-TIME CCTV-BASED DISCHARGE MONITORING IN AGRICULTURAL DRAINAGE CHANNELS USING IMAGE-DERIVED SURFACE VELOCITY AND WATER LEVELS 360
SUIVI EN TEMPS RÉEL DU DÉBIT PAR CCTV DANS LES CANAUX DE DRAINAGE AGRICOLE À PARTIR DE LA VITESSE DE SURFACE ET DES NIVEAUX D'EAU DÉRIVÉS D'IMAGES
C.W. Wu, and H.C. Ho (Taiwan)

R.67.1.70 SATELLITE-DRIVEN MONITORING OF AGRICULTURAL WATER USE FOR CLIMATE-RESILIENT GOVERNANCE IN UZBEKISTAN 362
SUIVI SATELLITAIRE DE L'UTILISATION DE L'EAU AGRICOLE POUR UNE GOUVERNANCE RÉSILIENTE AU CLIMAT EN OUZBÉKISTAN
J. Iskhakov (Uzbekistan)

R.67.1.71 DIGITAL TRANSFORMATION OF ON FARM IRRIGATION MANAGEMENT: THE RIEGABIEN® APP SUITE AS A SCALABLE MODEL OF PRECISION AGRICULTURE IN CHILE 364
TRANSFORMATION NUMÉRIQUE DE LA GESTION DE L'IRRIGATION À L'ÉCHELLE DE L'EXPLOITATION: LA SUITE D'APPLICATIONS RIEGABIEN® COMME MODÈLE ÉVOLUTIF D'AGRICULTURE DE PRÉCISION AU CHILI
Pilar M. Gil, Magali Odi, Octavio Lagos, Claudio Balbontín, Francisco Meza, Jael Montecinos, Sophiatobar, María Consuelo Arias, Iván Kleiman, Angelo Barrientos, Juan Pablo Pacheco, Erick Ruiz, Andrés Pérez, and Cristián Barrera, (Chile)

R.67.1.72 A REFINED ENCODER–DECODER CAPSULE NETWORK FOR FINE-GRAINED CLASSIFICATION OF MULTI-CROP AGRICULTURAL SCENES 366
RÉSEAU DE CAPSULES ENCODEUR–DÉCODEUR AMÉLIORÉ POUR LA CLASSIFICATION FINE DE SCÈNES AGRICOLES MULTICULTURES
Wei Zhang, Yupu He, Wei Qi, Zijun Mai, Renjing Ji, Nan Gu, Wentong Bi, and Yuanyuan Zha (China)

R.67.1.73 CLIMATE-RESILIENT IRRIGATION DESIGN: TRANSITION FROM GRAVITY TO ON-DEMAND DRIP IRRIGATION IN MADAGASCAR 368
CONCEPTION D'UNE IRRIGATION RÉSILIENTE AU CLIMAT: PASSAGE DE L'IRRIGATION GRAVITAIRE À L'IRRIGATION GOUTTE À GOUTTE À LA DEMANDE À MADAGASCAR
Maria João Calejo, António Capelo, Sara Ruivo Santos, Catarina Bochechas, and Maria Do Rosário Cameira (China)

R.67.1.74 THE IMPACT OF ALTERNATE WETTING AND DRYING (AWD) ON METHANE EMISSIONS AND GROUNDWATER RECHARGE INORGANIC PADDY FIELDS 370
L'IMPACT DE L'ALTERNANCE D'HUMIDIFICATION ET D'ASSÈCHEMENT (AWD) SUR LES ÉMISSIONS DE MÉTHANE ET LA RECHARGE DES EAUX SOUTERRAINES DANS LES RIZIÈRES BIOLOGIQUES
S.-Y. Hsu, Y.-C. Liao, and C.-J. Lin (Taiwan)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.67.1.75 BIOFILM MODELING AND BACTERIAL TRACKING IN DRIP IRRIGATION LABYRINTH CHANNELS 372
MODÉLISATION DU BIOFILM ET SUIVI DES BACTÉRIES DANS LES CANAUX LABYRINTHIQUES D'IRRIGATION GOUTTE À GOUTTE
Ihab Alazzam, Nassim Ait-Mouheb, Yannick Knapp, and Olivier Boiron (France)

R.67.1.76 SPATIO-TEMPORAL TRENDS IN INDEX (CCVI) - A CASE OF DISTRICT RAHIM YAR KHAN, PAKISTAN CLIMATE CHANGE VULNERABILITY 374
TENDANCES SPATIO-TEMPORELLES DE L'INDICE DE VULNÉRABILITÉ AU CHANGEMENT CLIMATIQUE (CCVI) – CAS DU DISTRICT DE RAHIM YAR KHAN, AU PAKISTAN
Mohsin Hafeez, Novaira Junaid, Hafsa Aeman, Sandra Ruckstuhl, Salman Siddiqui, Zohaib Shahid, and Umair Rabbani (Pakistan)

R.67.1.77 DIGITAL RENEWABLE-ENERGY INNOVATIONS FOR GROUNDWATER-SAFE SOLAR IRRIGATION IN A CLIMATE VULNERABLE CONTEXT - A CASE STUDY OF PUNJAB, PAKISTAN 376
INNOVATIONS NUMÉRIQUES EN MATIÈRE D'ÉNERGIES RENOUVELABLES POUR UNE IRRIGATION SOLAIRE PRÉSERVANT LES EAUX SOUTERRAINES DANS UN CONTEXTE DE VULNÉRABILITÉ CLIMATIQUE – ÉTUDE DE CAS DU PENDJAB, AU PAKISTAN
Mohsin Hafeez, Novaira Junaid, Zain Akbar, Habib Ullah Bodla, M. Ashraf, Salman Siddiqui, Kaleem Ullah, Waleed Khan, Zohaib Shahid, Yamna Arshad, and Umair Rabbani (Pakistan)

R.67.1.78 WATER DEMAND ASSESSMENT OF NATIVE AND EXOTIC ORNAMENTAL VEGETATION COMMUNITIES USING ENERGY BALANCE AND VEGETATION INDICES IN CHILE'S MEDITERRANEAN SEMI-ARID PLANNED URBAN GARDENS 378
ÉVALUATION DE LA DEMANDE EN EAU DES COMMUNAUTÉS VÉGÉTALES ORNEMENTALES INDIGÈNES ET EXOTIQUES À L'AIDE DU BILAN ÉNERGÉTIQUE ET D'INDICES DE VÉGÉTATION DANS LES JARDINS URBAINS PLANIFIÉS DE LA ZONE MÉDITERRANÉENNE SEMI-ARIDE DU CHILI
Pilar M. Gil, Miguel Silva, Mónica Musalem, Víctor García, Octavio Lagos, Freddy Saavedra, Francisco Meza, Jael Montecinos, Sophia Tobar, and José Sasso (Chile)

R.67.1.79 TOWARDS IMPROVED IRRIGATION STRATEGIES: CROP WATER STATUS PROXIES IN CITRUS GROVES 380
VERS DE MEILLEURES STRATÉGIES D'IRRIGATION: INDICATEURS INDIRECTS DE L'ÉTAT HYDRIQUE DES CULTURES DANS LES VERGERS D'AGRUMES
Daniela Vanella, Giuseppe Longo-Minnolo, Sabrina Toscano, Dario Morganti, Giuseppina Las Casas, and Simona Consoli (Italy)

OPERATIONAL GOOGLE EARTH ENGINE-BASED SEBAL FOR EVALUATING IRRIGATION PERFORMANCE AND WATER PRODUCTIVITY IN THE EASTERN NILE DELTA, EGYPT

MISE EN ŒUVRE OPÉRATIONNELLE DE SEBAL SOUS GOOGLE EARTH ENGINE POUR L'ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE L'IRRIGATION ET DE LA PRODUCTIVITÉ DE L'EAU DANS L'EST DU DELTA DU NIL, EN ÉGYPTE

Noha Salah[1]

ABSTRACT

The Nile Delta, Egypt's primary agricultural zone, faces severe water scarcity challenges that threaten national food security and agricultural sustainability. With irrigated agriculture consuming over 85% of the country's limited freshwater resources, precise monitoring of agricultural water consumption has become imperative for sustainable water governance. This study addresses the critical need for scalable, operational tools to evaluate irrigation practices and optimize water use efficiency in this intensively cultivated region, where traditional assessment methods lack the spatial granularity required for farm-level decision support amid growing water constraints.

A computationally efficient Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) model was implemented within the Google Earth Engine cloud platform for operational evapotranspiration (ETa) monitoring across a 226,600-hectare representative agricultural zone in the Eastern Nile Delta. The Landsat 8 Collection 2 archive spanning 2021-2023 was processed, utilizing 98 cloud-filtered images to derive daily ETa at 30-meter resolution. The model incorporated all key energy balance components including net radiation, soil heat flux, and sensible heat flux, with specific calibration for Nile Delta conditions. Comprehensive validation was performed against the FAO WaPOR v3 benchmark product using 879 stratified random sample points across the three-year study period after removing outlier water body pixels. Water productivity was calculated as the NDVI/ETa ratio, enabling detailed spatial analysis of irrigation efficiency patterns and identification of performance zones. This methodology directly addresses ICID Question 67.1 by integrating multi-temporal satellite data collection with physically-based energy balance modelling to evaluate farm-scale irrigation performance against regional water constraints.

The SEBAL implementation demonstrated strong accuracy suitable for operational water management applications, showing good agreement with WaPOR reference data ($R^2 = 0.409$, RMSE = 0.596 mm/day) across 879 validation points. Statistical analysis revealed a Pearson correlation coefficient of 0.639, confirming the model's strong capability to capture spatial ETa patterns essential for irrigation assessment. Spatial analysis identified significant variations in water productivity across the agricultural landscape, with clearly distinguishable efficiency patterns: high productivity zones covering 22,959 hectares (10.1%), low productivity zones encompassing 41,443 hectares (18.3%), and moderate productivity areas constituting the remainder. This quantitative assessment directly evaluates irrigation practices at the farm scale, identifying 41,443 hectares where targeted improvements could significantly enhance regional water use efficiency. The model maintained stable performance across all three study

1 National Water Research Center (NWRC), Water Management Research Institute (WMRI), Cairo, Egypt Email: n.salah86@yahoo.com

years, with annual ETa means showing consistent values (2021: 1.69 mm/day, 2022: 1.69 mm/day, 2023: 1.80 mm/day), confirming its reliability for routine monitoring programs and inter-annual comparison.

This study provides a comprehensive operational framework for ICID Question 67.1 by demonstrating how integrated satellite data collection and surface energy balance modelling can systematically assess irrigation practices and identify improvement priorities in complex agricultural systems. The Google Earth Engine-based SEBAL implementation delivers both accurate evapotranspiration monitoring and actionable spatial intelligence for targeted interventions, offering water authorities a scalable, reproducible tool for evidence-based decision-making. The identification of specific productivity zones, particularly the 41,443 hectares with suboptimal performance, enables precise targeting of management improvements and infrastructure investments where water savings potential is highest. This approach supports the transition toward more resilient and efficient agricultural water management in the Nile Delta and similar water-scarce regions worldwide, balancing computational efficiency with scientific rigor for practical implementation by water resource managers and irrigation authorities.

Keywords: Irrigation performance; Water productivity; Food security; Water constraints; Operational framework.

RÉSUMÉ

Le delta du Nil, principale zone agricole de l'Égypte, est confronté à de graves problèmes de pénurie d'eau qui menacent la sécurité alimentaire nationale et la durabilité de l'agriculture. L'agriculture irriguée consommant plus de 85 % des ressources limitées en eau douce du pays, un suivi précis de la consommation d'eau agricole est devenu indispensable à une gouvernance durable de l'eau. Cette étude répond au besoin crucial d'outils opérationnels et déployables à grande échelle pour évaluer les pratiques d'irrigation et optimiser l'efficience de l'utilisation de l'eau dans cette région cultivée de manière intensive, où les méthodes d'évaluation traditionnelles n'offrent pas la granularité spatiale nécessaire à l'aide à la décision au niveau des exploitations, dans un contexte de contraintes hydriques croissantes.

Un modèle de l'algorithme du bilan énergétique de surface appliqué aux terres (SEBAL), efficace sur le plan du calcul, a été mis en œuvre sur la plateforme cloud Google Earth Engine afin d'assurer le suivi opérationnel de l'évapotranspiration réelle (ETa) dans une zone agricole représentative de 226 600 hectares située dans l'est du delta du Nil. Les archives Landsat 8 Collection 2 couvrant la période 2021-2023 ont été traitées ; 98 images filtrées selon la couverture nuageuse ont servi à déterminer l'ETa journalière à une résolution de 30 mètres. Le modèle intégrait toutes les principales composantes du bilan énergétique, notamment le rayonnement net, le flux de chaleur du sol et le flux de chaleur sensible, avec un étalonnage spécifique aux conditions du delta du Nil. Une validation approfondie a été réalisée par rapport au produit de référence FAO WaPOR v3 à l'aide de 879 points d'échantillonnage aléatoire stratifié sur les trois années de l'étude, après exclusion des pixels atypiques correspondant à des plans d'eau. La productivité de l'eau a été calculée sous la forme du rapport NDVI/ETa, permettant une analyse spatiale détaillée des schémas d'efficience de l'irrigation et la délimitation de zones de performance. Cette méthodologie répond directement à la Question 67.1 de l'ICID en intégrant une collecte de données satellitaires multitemporelles et une modélisation du bilan énergétique fondée sur les lois physiques afin d'évaluer les performances de l'irrigation à l'échelle de l'exploitation au regard des contraintes hydriques régionales.

La mise en œuvre de SEBAL a démontré une grande précision, adaptée aux applications opérationnelles de gestion de l'eau, avec une bonne concordance par rapport aux données de référence WaPOR (R^2 = 0,409 ; RMSE = 0,596 mm/jour) sur 879 points de validation.

L'analyse statistique a révélé un coefficient de corrélation de Pearson de 0,639, confirmant la forte capacité du modèle à reproduire les schémas spatiaux de l'ETa indispensables à l'évaluation de l'irrigation. L'analyse spatiale a mis en évidence d'importantes variations de la productivité de l'eau dans le paysage agricole, avec des schémas d'efficience clairement distincts : les zones à forte productivité couvraient 22 959 hectares (10,1 %), les zones à faible productivité 41 443 hectares (18,3 %), et les zones à productivité modérée constituaient le reste. Cette évaluation quantitative mesure directement les pratiques d'irrigation à l'échelle de l'exploitation et recense 41 443 hectares où des améliorations ciblées pourraient accroître sensiblement l'efficience régionale de l'utilisation de l'eau. Le modèle a conservé des performances stables pendant les trois années de l'étude, les moyennes annuelles de l'ETa restant cohérentes (2021 : 1,69 mm/jour ; 2022 : 1,69 mm/jour ; 2023 : 1,80 mm/jour), ce qui confirme sa fiabilité pour les programmes de suivi courant et les comparaisons interannuelles.

Cette étude propose un cadre opérationnel complet pour la Question 67.1 de l'ICID en montrant comment l'intégration de la collecte de données satellitaires et de la modélisation du bilan énergétique de surface permet d'évaluer systématiquement les pratiques d'irrigation et de déterminer les améliorations prioritaires dans des systèmes agricoles complexes. La mise en œuvre de SEBAL sous Google Earth Engine assure à la fois un suivi précis de l'évapotranspiration et la production d'informations spatiales exploitables pour des interventions ciblées, offrant ainsi aux autorités de l'eau un outil déployable à grande échelle et reproductible pour une prise de décision fondée sur des données probantes. La délimitation de zones de productivité précises, notamment des 41 443 hectares présentant des performances sous-optimales, permet de cibler avec exactitude les améliorations de gestion et les investissements dans les infrastructures là où le potentiel d'économie d'eau est le plus élevé. Cette approche favorise la transition vers une gestion de l'eau agricole plus résiliente et plus efficiente dans le delta du Nil et dans des régions similaires confrontées à la pénurie d'eau partout dans le monde, en conciliant efficacité de calcul et rigueur scientifique en vue d'une mise en œuvre pratique par les gestionnaires des ressources en eau et les autorités chargées de l'irrigation.

Mots clés : Performances de l'irrigation; Productivité de l'eau; Sécurité alimentaire; Contraintes hydriques; Cadre opérationnel.

CONVERTING SENTEK VOLUMETRIC ION CONTENT TO ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE SATURATED EXTRACT FOR A RANGE OF SOIL TEXTURES

CONVERSION DE LA TENEUR IONIQUE VOLUMIQUE SENTEK EN CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE DE L'EXTRAIT DE PÂTE SATURÉE POUR DIFFÉRENTES TEXTURES DE SOL

Dalton, M.[1],Intervera, M., Singh, A., Costa, G., Guy, R., Antini, P., Cesaretti,T., Curtis, A., and Buss, P

ABSTRACT

Since the invention of the term Volumetric Ion Content (VIC) by Sentek Pty. Ltd., the company has endeavoured to relate this unitless measure to the more widely accepted property of soil Electrical Conductivity of the Saturated Extract (ECe). VIC is calculated by a proprietary model derived from empirical data collected from salinity experiments run in columns of sieved sand in the laboratory. The original electronic circuitry of the sensor was modified to run at two different frequencies (high and low). As the low frequency option of the capacitance sensors react to bulk free ions in the soil, the chemistry of the soil determines the level of reaction observed. The company has long qualified the use of the VIC model, preferring to restrict its use to sandy soil textures only. Despite this, many growers of agricultural products and environmental researchers have sought to extend its use into heavier textured clay soils. So much so, that Sentek produced a work-around in the form of a software module which took VIC values at selected water contents only and plotted them against a timescale. This produced graphed trends containing less detail and simplified the interpretation of the VIC observed in the soil, but anomalies still remained in silt and clay textured soils.

This study describes a more developed process whereby soil salinity benchmarking procedures were conducted in the field on a range of soil textures worldwide to ascertain whether it was possible to validate the use of the VIC model for heavier textured soils in a more precise manner. Simple regression analyses were used to determine a range of possible mathematical relationships between VIC and ECe. Significant associations were found in linear, power and natural log function relationships for many soil textures including loams and silts. However, the further the investigators ventured away from sandy soils, the less significant the associations became.

Some of the complex chemistries of clays and silts were also investigated using accredited commercial soils analyses and showed that these properties impacted on the standard VIC model. The passage of fertiliser ions through the soil was found to be greatest in sands and much retarded in clays. This was as expected and assumed to be due not only to the greater porosity of the sands but also to the higher chemical interaction between clay particles and the free ionic content in adjacent flowing porewaters. The significance of correlations between VIC and Cation Exchange Capacity (CEC), Sodium Adsorption Ratio (SAR) and Cation Ratio of Soil Structural Stability (CROSS) were varied. In heavier textured soils the CEC varied positively or negatively with VIC and was site-specific. Also in heavier textured soils, the SAR decreased with increasing VIC, indicating that the increasing VIC was not related to sodium or sodicity. The chemistries of heavier textured soils are complex and impact on the calculated VIC value in different ways. Some of this impact appears to be due to the dynamic exchange of ions between porewater and clay particles. The current TriSCAN model may therefore still require some additional calculation adjustments for use in these soils unless the VIC Filter function of IrriMAX® software is used.

1 Sentek Pty. Ltd., 77 Magill Rd., Stepney, S.A., 5069, mdalton@sentek.com.au.

Keywords: Volumetric Ion Content (VIC); Salinity; Electrical Conductivity (EC); Calibration; Salt; Fertiliser.

RÉSUMÉ

Depuis la création du terme « teneur ionique volumique » (Volumetric Ion Content, VIC) par Sentek Pty. Ltd., l'entreprise s'efforce de relier cette mesure adimensionnelle à la propriété plus largement admise qu'est la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée du sol (ECe). La VIC est calculée au moyen d'un modèle propriétaire issu de données empiriques recueillies lors d'expériences de salinité menées en laboratoire dans des colonnes de sable tamisé. Le circuit électronique initial du capteur a été modifié pour fonctionner à deux fréquences différentes (haute et basse). Comme l'option basse fréquence des capteurs capacitifs réagit aux ions libres présents dans le volume du sol, la chimie de celui-ci détermine l'intensité de la réponse observée. L'entreprise a longtemps assorti l'utilisation du modèle VIC de réserves, préférant en limiter l'usage aux seules textures de sol sableuses. Malgré cela, de nombreux producteurs agricoles et chercheurs en environnement ont cherché à étendre son utilisation aux sols argileux à texture plus lourde. Cette demande a été telle que Sentek a mis au point une solution de contournement sous la forme d'un module logiciel qui ne retenait les valeurs de VIC qu'à des teneurs en eau sélectionnées et les représentait sur une échelle de temps. Les tendances graphiques ainsi obtenues comportaient moins de détails et simplifiaient l'interprétation de la VIC observée dans le sol, mais des anomalies subsistaient dans les sols limoneux et argileux.

Cette étude décrit un processus plus élaboré dans lequel des protocoles d'établissement de valeurs de référence pour la salinité du sol ont été appliqués sur le terrain à diverses textures de sol partout dans le monde, afin de déterminer s'il était possible de valider plus précisément l'utilisation du modèle VIC pour les sols à texture plus lourde. Des analyses de régression simple ont servi à déterminer un éventail de relations mathématiques possibles entre la VIC et l'ECe. Des associations significatives ont été observées pour les relations linéaires, de puissance et logarithmiques naturelles dans de nombreuses textures de sol, notamment les sols francs et limoneux. Toutefois, plus les chercheurs s'éloignaient des sols sableux, moins les associations étaient significatives.

Certaines caractéristiques chimiques complexes des argiles et des limons ont également été étudiées au moyen d'analyses de sols réalisées par des laboratoires commerciaux agréés ; les résultats ont montré que ces propriétés influençaient le modèle VIC standard. La migration des ions fertilisants à travers le sol s'est révélée maximale dans les sables et fortement ralentie dans les argiles. Ce résultat était conforme aux attentes et a été attribué non seulement à la plus grande porosité des sables, mais aussi à l'interaction chimique plus forte entre les particules d'argile et les ions libres contenus dans les eaux interstitielles adjacentes en mouvement. La significativité des corrélations entre la VIC et la capacité d'échange cationique (CEC), le rapport d'adsorption du sodium (SAR) et le rapport cationique de stabilité structurale du sol (CROSS) variait. Dans les sols à texture plus lourde, la CEC variait positivement ou négativement avec la VIC et dépendait du site. Toujours dans ces sols, le SAR diminuait à mesure que la VIC augmentait, ce qui indiquait que l'augmentation de la VIC n'était liée ni au sodium ni à la sodicité. La chimie des sols à texture plus lourde est complexe et influe de différentes manières sur la valeur calculée de la VIC. Une partie de cette influence semble résulter de l'échange dynamique d'ions entre l'eau interstitielle et les particules d'argile. Le modèle TriSCAN actuel pourrait donc encore nécessiter des ajustements de calcul supplémentaires pour être utilisé dans ces sols, à moins d'employer la fonction « VIC Filter » du logiciel IrriMAX®.

Mots clés : Teneur ionique volumique (VIC); Salinité; Conductivité électrique (EC); Etalonnage; Sel; Engrais.

DEEP LEARNING BASED ENHANCEMENT OF SENTINEL-2 IMAGES FOR FIELD SCALE EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATION

AMÉLIORATION DES IMAGES SENTINEL-2 PAR APPRENTISSAGE PROFOND POUR L'ESTIMATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE

Hamidreza Noorbakhsh[1] and. Nozar Ghahreman*[2]

ABSTRACT

Accurate estimation of actual evapotranspiration (ET_a) at the field scale is a fundamental requirement for optimal irrigation planning and sustainable water resource management, especially in regions with small and fragmented agricultural lands. The limited spatial resolution of available satellite images often leads to the mixed pixel problem, in which each pixel represents a combination of agricultural and non-agricultural land uses. This issue significantly reduces the accuracy of remotely sensed vegetation indices, estimation of leaf area index (LAI), and consequently ET_a. The present study investigates the effect of improving satellite images spatial resolution on resolving mixed pixel problem and enhancing the accuracy of LAI and ET_a estimation in small fields. The required data were obtained from previous studies conducted in rice experimental fields located at the Rice Research Institute of Iran (RRII) in Gilan Province, north of Iran. The region is characterized by a humid to very humid climate, with a mean annual precipitation of approximately 1500 mm and a mean annual air temperature of about 16.7 °C, suitable for paddy rice cultivation.

The field data used in this research comprised two distinct experimental periods. During the 2017 cropping season, observations were obtained from four rice plots equipped with lysimeters, providing simultaneous in situ measurements of LAI and ETa. In the second dataset, LAI measurements from another experiment conducted during the 2018 and 2019 cropping seasons were utilized. Data of years 2018 and 2019 were used for model development, while the 2017 data were employed for validation. Multispectral images from Sentinel-2, Landsat 7, and Landsat 8 were used to extract vegetation indices, including NDVI and SAVI. A deep learning-based super-resolution model was applied to Sentinel-2 images to enhance the spatial resolution from 10 m to 1 m while keeping spectral integrity. The enhanced images showed a very high correlation between reconstructed and original NDVI values (R = 0.9979), indicating a substantial improvement in spatial detail without spectral distortion. LAI was estimated using regression models based on NDVI and SAVI, and the results demonstrated that NDVI provided more reliable LAI estimates than SAVI, with RMSE values ranging from 0.51 to 0.61 and MAE values between 0.38 and 0.49. Based on NDVI-derived LAI, ETa was subsequently estimated using a crop coefficient-based approach (K_c), in which K_c values derived from LAI were combined with reference evapotranspiration. This approach showed close agreement with lysimetric observations, with RMSE values ranging between 0.40 and 0.58-mm day^{-1} and normalized RMSE values of 7 to 11%. Estimated cumulative evapotranspiration during the rice growing season of four independent plots ranged from 397 to 441 mm, showing good agreement with lysimetric measurements. Overall, the results demonstrate that increasing the spatial resolution of satellite images by this novel approach significantly improves LAI and ET_a estimation in small and fragmented agricultural fields by reducing mixed pixel effects. The proposed framework provides a practical and transferable solution for improving field-scale

1 MSc Graduate, University of Tehran, Iran
2 Associate Professor, Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran* nghahreman@ut.ac.ir

irrigation water management, particularly in regions where agricultural plot sizes are smaller than the native spatial resolution of commonly used satellite sensors.

Keywords: Actual evapotranspiration; Sentinel-2; Leaf area index (LAI); Deep learning.

RÉSUMÉ

L'estimation précise de l'évapotranspiration réelle (ET_a) à l'échelle de la parcelle constitue une condition fondamentale pour une planification optimale de l'irrigation et une gestion durable des ressources en eau, en particulier dans les régions où les terres agricoles sont petites et morcelées. La résolution spatiale limitée des images satellitaires disponibles entraîne souvent le problème des pixels mixtes, dans lequel chaque pixel représente une combinaison d'occupations agricoles et non agricoles du sol. Ce problème réduit sensiblement la précision des indices de végétation issus de la télédétection, de l'estimation de l'indice foliaire (LAI) et, par conséquent, de l'ET_a. La présente étude examine l'effet de l'amélioration de la résolution spatiale des images satellitaires sur l'atténuation du problème des pixels mixtes et sur l'amélioration de la précision de l'estimation du LAI et de l'ET_a dans les petites parcelles. Les données requises provenaient d'études antérieures menées dans des rizières expérimentales situées à l'Institut iranien de recherche sur le riz (RRII), dans la province de Guilan, au nord de l'Iran. La région se caractérise par un climat humide à très humide, avec des précipitations annuelles moyennes d'environ 1 500 mm et une température annuelle moyenne de l'air d'environ 16,7 °C, propice à la riziculture inondée.

Les données de terrain utilisées dans cette recherche couvraient deux périodes expérimentales distinctes. Pendant la campagne agricole de 2017, les observations ont été recueillies dans quatre parcelles de riz équipées de lysimètres, fournissant des mesures in situ simultanées du LAI et de l'ET_a. Le second jeu de données utilisait des mesures du LAI issues d'une autre expérience menée pendant les campagnes agricoles de 2018 et 2019. Les données de 2018 et 2019 ont servi à élaborer le modèle, tandis que celles de 2017 ont été utilisées pour sa validation. Des images multispectrales de Sentinel-2, Landsat 7 et Landsat 8 ont été utilisées pour extraire les indices de végétation, notamment le NDVI et le SAVI. Un modèle de super-résolution fondé sur l'apprentissage profond a été appliqué aux images Sentinel-2 afin d'en améliorer la résolution spatiale de 10 m à 1 m tout en préservant l'intégrité spectrale. Les images améliorées ont présenté une corrélation très élevée entre les valeurs reconstruites et originales du NDVI (R = 0,9979), ce qui indique un enrichissement considérable des détails spatiaux sans distorsion spectrale. Le LAI a été estimé au moyen de modèles de régression fondés sur le NDVI et le SAVI ; les résultats ont montré que le NDVI fournissait des estimations du LAI plus fiables que le SAVI, avec des valeurs de RMSE comprises entre 0,51 et 0,61 et des valeurs de MAE comprises entre 0,38 et 0,49. À partir du LAI dérivé du NDVI, l'ETa a ensuite été estimée selon une approche fondée sur le coefficient cultural (Kc), dans laquelle les valeurs de Kc dérivées du LAI ont été combinées à l'évapotranspiration de référence. Cette approche a montré une étroite concordance avec les observations lysimétriques, avec des valeurs de RMSE comprises entre 0,40 et 0,58 mm jour^{-1} et des valeurs de RMSE normalisée de 7 à 11 %. L'évapotranspiration cumulée estimée pendant la saison de croissance du riz dans les quatre parcelles indépendantes variait de 397 à 441 mm, en bonne concordance avec les mesures lysimétriques. Dans l'ensemble, les résultats montrent que l'augmentation de la résolution spatiale des images satellitaires au moyen de cette nouvelle approche améliore sensiblement l'estimation du LAI et de l'ET_a dans les petites parcelles agricoles morcelées en réduisant les effets des pixels mixtes. Le cadre proposé offre une solution pratique et transférable pour améliorer la gestion de l'eau d'irrigation à l'échelle de la parcelle, en particulier dans les régions où la taille des parcelles agricoles est inférieure à la résolution spatiale native des capteurs satellitaires couramment utilisés.

Mots clés : Evapotranspiration réelle; Sentinel-2; Indice de surface foliaire (LAI); Apprentissage profond.

CLIMATE-SMART IRRIGATION TECHNOLOGIES FOR A RESILIENT AND SUSTAINABLE AGRICULTURE

TECHNOLOGIES D'IRRIGATION INTELLIGENTES FACE AU CLIMAT POUR UNE AGRICULTURE RÉSILIENTE ET DURABLE

Luxon Nhamo[1], Cuthbert Taguta[2], Sylvester Mpandeli[3], Tinashe Dirwai[4], Stanley Liphadzi[5], and Tafadzwanashe Mabhaudhi[6]

ABSTRACT

Water scarcity ranks among humanity's greatest challenges, alongside land degradation and food insecurity. Resource insecurity is exacerbated by climate change, rising demands from competing sectors, and a growing population. To address the interconnected challenges of water scarcity, land degradation, and food insecurity, agriculture must adapt to change and adopt sustainable and innovative practices that enhance crop-water productivity, improve efficiency, and minimise environmental impact. This study applied a mixed-methods approach to identify and discuss novel irrigation technologies that optimise food production without increasing the amount of water applied and with positive environmental spinoffs. Identified strategies include investing in water-efficient technologies, mainstreaming climate-resilient underutilised indigenous crops, adopting soil health practices such as crop rotation, and supporting smallholder farmers with training on modern smart technologies. As part of the digital transformation in irrigation, the study highlights innovative technologies and practices that enhance resilience and adaptation, support on-farm irrigation scheduling, improve yields, and are tailored to specific crops, including indigenous underutilised crops. These user-friendly applications are crucial for crop cultivation, as the water requirements for most crops are now thoroughly documented. Digital tools are combining real-time soil data, meteorological forecasts, and crop-specific coefficients to optimise water use, often reducing consumption while enhancing crop health.

Keywords: Irrigation digital transformation; crop-water productivity; irrigated agriculture; water-use efficiency; climate-smart agriculture; sustainable food systems.

RÉSUMÉ

La pénurie d'eau figure parmi les plus grands défis de l'humanité, aux côtés de la dégradation des terres et de l'insécurité alimentaire. L'insécurité des ressources est aggravée par le changement climatique, l'augmentation de la demande des secteurs concurrents et la croissance démographique. Pour relever les défis interdépendants de la pénurie d'eau,

1 Water Research Commission (WRC), Lynnwood Manor, Pretoria, South Africa; E-mail: luxonn@wrc.org.za
2 Post-doctoral fellow. Centre for Transformative Agricultural and Food Systems, School of Agricultural, Earth and Environmental Sciences, University of KwaZulu-Natal, Pietermaritzburg, South Africa; E-mail 'tagutac@ukzn.ac.za
3 Senior Research Manager. Water Research Commission (WRC), Lynnwood Manor, Pretoria, South Africa; E-mail: sylvesterm@wrc.org.za
4 Researcher. International Water Management Institute (IWMI), Harare, Zimbabwe; E-Mail t.dirwai@cgiar.org
5 Group Executive. Water Research Commission (WRC), Lynnwood Manor, Pretoria, South Africa; E-mail: stanleyl@wrc.org.za
6 Prof of Climate Change and Food Systems, Centre on Climate Change and Planetary Health, London School of Hygiene and Tropical Medicine (LSHTM), London, UK, E-mail: tafadzwanashe.mabhaudhi@lshtm.ac.uk

de la dégradation des terres et de l'insécurité alimentaire, l'agriculture doit s'adapter au changement et adopter des pratiques durables et innovantes qui accroissent la productivité de l'eau agricole, améliorent l'efficience et réduisent au minimum l'impact environnemental. Cette étude a appliqué une approche mixte afin de recenser et d'examiner de nouvelles technologies d'irrigation qui optimisent la production alimentaire sans augmenter la quantité d'eau apportée et qui génèrent des retombées environnementales positives. Les stratégies recensées comprennent l'investissement dans des technologies économes en eau, l'intégration systématique de cultures autochtones sous-utilisées et résilientes au climat, l'adoption de pratiques favorables à la santé des sols, telles que la rotation des cultures, et le soutien aux petits exploitants par une formation aux technologies intelligentes modernes. Dans le cadre de la transformation numérique de l'irrigation, l'étude met en avant des technologies et des pratiques innovantes qui renforcent la résilience et l'adaptation, facilitent la programmation de l'irrigation à l'échelle de l'exploitation, améliorent les rendements et sont adaptées à des cultures précises, notamment aux cultures autochtones sous-utilisées. Ces applications conviviales sont essentielles à la conduite des cultures, car les besoins en eau de la plupart d'entre elles sont désormais documentés de manière approfondie. Les outils numériques combinent des données pédologiques en temps réel, des prévisions météorologiques et des coefficients propres à chaque culture afin d'optimiser l'utilisation de l'eau, réduisant souvent la consommation tout en améliorant l'état sanitaire des cultures.

Mots clés : Transformation numérique de l'irrigation; Productivité de l'eau agricole; Agriculture irrigué; Efficacité de l'utilisation de l'eau; Agriculture intelligente face au climat; Systèmes d'alimentation durable.

APPLICATION OF CLIMATE RESILIENT AND EFFICIENT IRRIGATION TECHNOLOGIES FOR ENHANCING WATER PRODUCTIVITY IN PAKISTAN

APPLICATION DE TECHNOLOGIES D'IRRIGATION EFFICIENTES ET RÉSILIENTES AU CLIMAT POUR AMÉLIORER LA PRODUCTIVITÉ DE L'EAU AU PAKISTAN

Hafiz Qaisar Yasin[1]

ABSTRACT

Irrigation drives the agricultural and rural economy in Pakistan. Irrigation-driven cropping systems encompass over 22.5 million hectares, accounting for over 80 per cent of the country's total cultivated area. More than 90 per cent of total crop production is generated from irrigated lands, thus securing the food needs of over 240 million people. Notwithstanding its utmost significance, irrigated agriculture faces copious challenges, mainly shortages of canal water supplies, over-abstraction of groundwater due to lack of regulatory frameworks, and limited adoption of irrigation technologies leading to lower irrigation efficiency vis water productivity. Notably, climate change has aggravated the irrigation sector issues during the last two decades. Pakistan has been among the top ten most climate-vulnerable countries during the last two decades, exacerbating the irrigation sector challenges and urging the pressing need for transforming the conventional irrigation practices. This study has critically examined the climate-resilient and efficient irrigation technologies applied in the Punjab province of Pakistan from 2011 to 2025 under various development projects. The objective of this strategy revolves around the notion of enhancing water productivity (more crop per drop of water) with an investment of 500 million dollars. The analysis revealed that climate-resilient irrigation technologies, including precast concrete parabolic segment lining for the lining of water conveyance community watercourses; use of laser land levelling technology; installation of solar-powered drip irrigation; and on-farm water storage through constructing ponds, have transformed the farmers' existing inefficient irrigation practices to improve water conveyance, application, and water use efficiency and build on-farm climate resilience. The study found that during the last decade and a half, over 25,000 community watercourses were lined with precast concrete parabolic lining technology by organizing farmers into water users associations, solar-driven drip irrigation systems were installed on 20,500 hectares to promote high-value crops, almost 15,000 laser land levelling units were provided to farmers to act as service providers in rural areas, and about 4,000 on-farm water storages were developed to store and supplement demand-based irrigation water supplies. In total, these climate-resilient irrigation technologies have resulted in serving almost four (4) million hectares of irrigated area, falling mostly in climate-vulnerable and water-scarce regions of the Punjab province. These interventions have been executed through a community-driven development (CDD) framework and a cost-sharing framework whereby farmers contribute 30 per cent of the scheme cost, and the remaining 70 per cent is provided by the government as a grant. The evaluation studies revealed that on-farm water conveyance efficiency increased from 49 per cent to 68 per cent, and tail-end farmers have 40 per cent better irrigation supplies at their turnouts due to watercourse lining as compared to unimproved watercourses. These climate-resilient irrigation technologies have also resulted in enhancing the water productivity of wheat from Rs.0.91 kg/m³ to Rs.1.03 kg/m³ and 0.34 kg/ m³ to 0.41 kg/m³ for the rice crop. The analysis of the execution strategy unveiled that a farmer-driven and cost-sharing

1 Director Agriculture (Water Management), Government of Punjab, Agriculture Department, 21 Davis Road, Lahore, Pakistan 44000, Email: qaisaruaf@yahoo.com

implementation model played a critical role in the adoption of climate resilience technologies by the most vulnerable farming community. The study concluded that climate-resilient irrigation technologies are fundamental to improving water use and productivity efficiency and building on-farm resilience in countries like Pakistan, vulnerable to water scarcity and climate change.\

Keywords: Irrigation, climate change, drip irrigation, water efficiency, climate-resilient irrigation.

RÉSUMÉ

L'irrigation constitue le moteur de l'économie agricole et rurale au Pakistan. Les systèmes de culture irriguée couvrent plus de 22,5 millions d'hectares, soit plus de 80 % de la superficie cultivée totale du pays. Plus de 90 % de la production agricole totale provient des terres irriguées, garantissant ainsi les besoins alimentaires de plus de 240 millions de personnes. Malgré son importance capitale, l'agriculture irriguée est confrontée à de nombreux défis, principalement les pénuries d'approvisionnement en eau des canaux, la surexploitation des eaux souterraines due à l'absence de cadres réglementaires et l'adoption limitée des technologies d'irrigation, qui se traduit par une faible efficience de l'irrigation et une faible productivité de l'eau. Le changement climatique a notamment aggravé les problèmes du secteur de l'irrigation au cours des deux dernières décennies. Durant cette période, le Pakistan a figuré parmi les dix pays les plus vulnérables au climat, ce qui a amplifié les défis du secteur de l'irrigation et rendu urgente la transformation des pratiques d'irrigation conventionnelles. Cette étude a examiné de manière critique les technologies d'irrigation efficientes et résilientes au climat appliquées dans la province pakistanaise du Pendjab de 2011 à 2025 dans le cadre de divers projets de développement. L'objectif de cette stratégie s'articule autour de l'amélioration de la productivité de l'eau — davantage de récolte pour chaque goutte d'eau — grâce à un investissement de 500 millions de dollars. L'analyse a révélé que les technologies d'irrigation résilientes au climat, notamment le revêtement des canaux communautaires d'acheminement de l'eau au moyen de segments paraboliques préfabriqués en béton, l'utilisation du nivellement des terres au laser, l'installation de systèmes d'irrigation goutte à goutte alimentés à l'énergie solaire et le stockage de l'eau à l'exploitation dans des bassins, ont transformé les pratiques d'irrigation inefficaces existantes des agriculteurs afin d'améliorer l'efficience du transport, de l'application et de l'utilisation de l'eau et de renforcer la résilience climatique des exploitations. L'étude a constaté qu'au cours des quinze dernières années, plus de 25 000 canaux communautaires avaient été revêtus au moyen de la technologie des segments paraboliques préfabriqués en béton en organisant les agriculteurs en associations d'usagers de l'eau ; des systèmes d'irrigation goutte à goutte alimentés à l'énergie solaire avaient été installés sur 20 500 hectares afin de promouvoir les cultures à forte valeur ajoutée ; près de 15 000 unités de nivellement des terres au laser avaient été fournies aux agriculteurs pour leur permettre d'agir comme prestataires de services dans les zones rurales ; et environ 4 000 ouvrages de stockage de l'eau à l'exploitation avaient été aménagés afin d'emmagasiner l'eau d'irrigation et de compléter l'approvisionnement en fonction de la demande. Au total, ces technologies d'irrigation résilientes au climat ont permis de desservir près de quatre (4) millions d'hectares de terres irriguées, situées pour la plupart dans les régions du Pendjab vulnérables au climat et touchées par la pénurie d'eau. Ces interventions ont été mises en œuvre selon un cadre de développement piloté par les communautés (CDD) et un dispositif de partage des coûts, dans lequel les agriculteurs contribuent à hauteur de 30 % du coût du projet, les 70 % restants étant versés par le gouvernement sous forme de subvention. Les études d'évaluation ont révélé que l'efficience du transport de l'eau à l'exploitation était passée de 49 % à 68 % et que, grâce au revêtement des canaux, les agriculteurs situés en aval bénéficiaient, à leurs prises d'eau, d'un approvisionnement en eau d'irrigation supérieur de 40 % à celui des canaux non améliorés. Ces technologies d'irrigation résilientes au climat ont également accru la productivité de l'eau du blé, qui est passée de Rs.0.91 kg/m³ à Rs.1.03

kg/m³, et celle du riz, passée de 0.34 kg/m³ à 0.41 kg/m³. L'analyse de la stratégie d'exécution a montré qu'un modèle de mise en œuvre piloté par les agriculteurs et fondé sur le partage des coûts avait joué un rôle crucial dans l'adoption des technologies de résilience climatique par les communautés agricoles les plus vulnérables. L'étude conclut que les technologies d'irrigation résilientes au climat sont indispensables pour améliorer l'efficience de l'utilisation de l'eau et sa productivité, ainsi que pour renforcer la résilience des exploitations dans les pays comme le Pakistan, vulnérables à la pénurie d'eau et au changement climatique.

Mots clés : Irrigation; Changement climatique; Irrigation goutte à goutte; Efficacité de l'eau; Irrigation résiliente au climat.

QUANTIFYING CONSUMPTIVE WATER SAVINGS IN DEFICIT-IRRIGATED ALFALFA USING THE OPENET SATELLITE FRAMEWORK

QUANTIFICATION DES ÉCONOMIES D'EAU CONSOMMÉE DANS LA LUZERNE SOUMISE À UNE IRRIGATION DÉFICITAIRE À L'AIDE DU CADRE SATELLITAIRE OPENET

Aliasghar Montazar[1], John W. Shields[2], Andre Daccache[3], and Daniel H. Putnam[4]

ABSTRACT

Climate change is intensifying pressure on irrigated agriculture through rising temperatures, increasing evaporative demand, and growing competition for limited water supplies. Deficit irrigation has emerged as an important strategy for improving agricultural water-use efficiency; however, operational verification of consumptive water saving remains a major challenge for irrigation districts and conservation programs. This study evaluated the capability of the OpenET satellite framework to quantify reductions in consumptive water use under deficit irrigation using independent field-scale observations. A two-year analysis (2024–2025) was conducted across twenty commercial alfalfa fields in California's Imperial Valley under contrasting irrigation regimes. OpenET evapotranspiration ($ET_{(}act_{)}$) estimates were evaluated under fully irrigated conditions using eddy covariance measurements and under summer deficit irrigation through comparison with soil-moisture-derived root-zone depletion. Under fully irrigated conditions, OpenET reproduced observed daily $ET_{(}act_{)}$ dynamics with strong agreement (R^2 = 0.87; RMSE = 0.74 mm d^{-1}). Following summer irrigation cutoff, $ET_{(}act_{)}$ declined rapidly from 6–9 mm d^{-1} to sustained levels near 1–3 mm d^{-1}, corresponding with progressive root-zone depletion and reductions in NDVI. OpenET-derived depletion dynamics closely tracked soil-moisture observations, with RMSE values below 8 mm across monitored deficit-irrigated fields. Across both study years, deficit irrigation reduced cumulative $ET_{(}act_{)}$ by 150–200 mm during the deficit period, corresponding to 40–50% lower crop water consumption relative to fully irrigated conditions ($p < 0.001$). Results demonstrate that satellite-based ET frameworks, when combined with independent field observations, can provide scalable and transparent verification of consumptive water-use reductions under real-world irrigation management. These findings demonstrate the potential of remote sensing to support climate-resilient irrigation management and agricultural water conservation in arid irrigated regions.

Keywords: Consumptive water savings; Climate change; Deficit irrigation; Agricultural water conservation; Arid irrigated regions.

RÉSUMÉ

Le changement climatique accentue les pressions exercées sur l'agriculture irriguée en raison de la hausse des températures, de l'augmentation de la demande évaporative et de la concurrence croissante pour des ressources en eau limitées. L'irrigation déficitaire s'est imposée comme une stratégie importante pour améliorer l'efficience de l'utilisation de l'eau en agriculture ; toutefois, la vérification opérationnelle des économies d'eau consommée

1 University of California Division of Agriculture and Natural Resources, UC Cooperative Extension Imperial County, Holtville, CA, USA Email: amontazar@ucanr.edu
2 United States Bureau of Reclamation, Boulder Canyon Operations Office, Boulder City, Nevada, USA Email: jshields@usbr.gov
3 University of California Davis, Dept. of Biological and Agricultural Engineering, Davis, CA, USA Email: adaccache@ucdavis.edu
4 University of California Davis, Dept. of Plant Sciences, Davis, CA, USA Email: dhputnam@ucdavis.edu

demeure un défi majeur pour les districts d'irrigation et les programmes de conservation. Cette étude a évalué la capacité du cadre satellitaire OpenET à quantifier les réductions de la consommation d'eau sous irrigation déficitaire à l'aide d'observations indépendantes à l'échelle de la parcelle. Une analyse sur deux ans (2024–2025) a été menée dans vingt champs commerciaux de luzerne de la vallée impériale, en Californie, soumis à des régimes d'irrigation contrastés. Les estimations de l'évapotranspiration réelle ($ET_{(}act_{)}$) produites par OpenET ont été évaluées, en conditions de pleine irrigation, au moyen de mesures par covariance des turbulences et, en conditions d'irrigation déficitaire estivale, par comparaison avec l'épuisement de la réserve de la zone racinaire dérivé de l'humidité du sol. En conditions de pleine irrigation, OpenET a reproduit la dynamique journalière observée de l'$ET_{(}act_{)}$ avec une forte concordance (R^2 = 0,87 ; RMSE = 0,74 mm j^{-1}). Après l'arrêt de l'irrigation estivale, l'$ET_{(}act_{)}$ a rapidement diminué, passant de 6–9 mm j^{-1} à des niveaux durables proches de 1–3 mm j^{-1}, parallèlement à l'épuisement progressif de la zone racinaire et à la baisse du NDVI. La dynamique de l'épuisement dérivée d'OpenET suivait étroitement les observations de l'humidité du sol, avec des valeurs de RMSE inférieures à 8 mm dans les champs sous irrigation déficitaire faisant l'objet d'un suivi. Pour les deux années de l'étude, l'irrigation déficitaire a réduit l'$ET_{(}act_{)}$ cumulée de 150–200 mm pendant la période de déficit, ce qui correspond à une consommation d'eau des cultures inférieure de 40–50 % à celle observée en conditions de pleine irrigation ($p < 0,001$). Les résultats montrent que les cadres d'estimation de l'ET par satellite, lorsqu'ils sont associés à des observations de terrain indépendantes, peuvent offrir une vérification transparente et déployable à grande échelle des réductions de la consommation d'eau obtenues dans des conditions réelles de gestion de l'irrigation. Ces conclusions démontrent le potentiel de la télédétection pour soutenir une gestion de l'irrigation résiliente au climat et la conservation de l'eau agricole dans les régions irriguées arides.

Mots clés : Economies d'eau consommée; Changement climatique; Irrigation déficitaire; Conservation de l'eau agricole; Régions irriguées arides.

A NOVEL SILT-WATER SEPARATION STRUCTURE FOR PIPES OFF-TAKING FROM IRRIGATION CANALS

UNE NOUVELLE STRUCTURE DE SÉPARATION LIMON-EAU POUR LES CONDUITES DÉRIVANT L'EAU DES CANAUX D'IRRIGATION

Dr. Venkata Ramamohan Ramachandrula[1]

ABSTRACT

The natural streams, rivers and artificial canals carry sediment particles along with them. Transmission and deposition of such sediments alter the flow regime and block the operation of hydraulic structures, gates etc. In order to exclude or eject the silt from irrigation canals, excluders, ejection tunnels, vortex chambers and vortex tubes are commonly used. A novel Silt-Water Separation Structure (SWSS) is developed that separates sediments from water and facilitates withdrawal of sediment-free water from open channels using a pipeline.

The structure involves construction of a low-head barrier across the stream or channel. The silt that settles down at the upstream is flushed out using a vent placed at the bed of the channel. A pipeline of 150 mm diameter was placed above the vent level will be capturing the silt-free water for further conveyance and utilization. A pilot physical model was made and its performance was observed during 2024-26. Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations and Discrete Particle Modelling (DPM) analysis were carried out on the SWSS model to quantify its silt ejection efficiency. The model was tested with a mix of 0.1-2.0 mm diameter particles, mass flow of 5e-3 kg/s and for six flow depths between 0.04-0.15 m. 20.85-37.49% of flow diversion through pipe was achieved with a particle load of 0.238-7.608% and particle size finer than 0.8 mm diameter. By increasing the size of the pipeline, more water could be diverted that is relatively silt-free. 63.54-98.68% particle separation and disposal rate through the vent was achieved.

The novel SWSS has its potential applications in not only in irrigation systems but also in raw water intakes of thermal power projects, water treatment plants, storm water drainage systems etc. Further work to improve the silt ejection performance by optimizing geometric design of SWSS forms the future scope of work.

Keywords: Silt-water separation, Silt ejection, Conduit flow, Silt intensity.

RÉSUMÉ

Les cours d'eau naturels, les rivières et les canaux artificiels transportent des particules sédimentaires. Le transport et le dépôt de ces sédiments modifient le régime d'écoulement et entravent le fonctionnement des ouvrages hydrauliques, des vannes, etc. Des dispositifs d'exclusion, des tunnels d'éjection, des chambres tourbillonnaires et des tubes vortex sont couramment utilisés pour exclure ou évacuer le limon des canaux d'irrigation. Une nouvelle structure de séparation limon-eau (SWSS) a été mise au point afin de séparer les sédiments de l'eau et de permettre le prélèvement, par une conduite, d'une eau exempte de sédiments dans les chenaux à surface libre.

La structure comprend la construction d'un seuil de faible hauteur de charge en travers du cours d'eau ou du canal. Le limon qui se dépose en amont est évacué au moyen d'un orifice placé au fond du canal. Une conduite de 150 mm de diamètre, placée au-dessus du niveau de

1 Executive Director, Water and Livelihoods Foundation (WLF), 12-13-451, Street no.1, Tarnaka, Hyderabad, India. ramamohan.ramachandrula@gmail.com, Mobile: +91 9440194866.

l'orifice, capte l'eau débarrassée du limon en vue de son acheminement et de son utilisation ultérieurs. Un modèle physique pilote a été construit et ses performances ont été observées pendant la période 2024-26. Des simulations de mécanique des fluides numérique (CFD) et une analyse par modélisation des particules discrètes (DPM) ont été réalisées sur le modèle SWSS afin de quantifier son efficacité d'éjection du limon. Le modèle a été testé avec un mélange de particules de 0,1 à 2,0 mm de diamètre, un débit massique de 5e-3 kg/s et six hauteurs d'écoulement comprises entre 0,04 et 0,15 m. Un taux de dérivation du débit dans la conduite de 20,85 à 37,49 % a été obtenu avec une charge particulaire de 0,238 à 7,608 % et des particules d'un diamètre inférieur à 0,8 mm. L'augmentation du diamètre de la conduite permettrait de dériver une quantité plus importante d'eau relativement exempte de limon. Un taux de séparation et d'évacuation des particules par l'orifice compris entre 63,54 et 98,68 % a été atteint.

La nouvelle structure SWSS peut être utilisée non seulement dans les systèmes d'irrigation, mais aussi dans les prises d'eau brute des centrales thermiques, les usines de traitement de l'eau, les réseaux d'évacuation des eaux pluviales, etc. Les travaux futurs porteront sur l'amélioration des performances d'éjection du limon grâce à l'optimisation de la conception géométrique de la SWSS.

Mots clés : Séparation limon-eau; Ejection du limon; Ecoulement de conduit; Intensity de limon.

DYNAMIC MONITORING AND RAPID DIAGNOSIS OF RICE WATER STATUS BASED ON UAV REMOTE SENSING AND MACHINE LEARNING ALGORITHMS

SUIVI DYNAMIQUE ET DIAGNOSTIC RAPIDE DE L'ÉTAT HYDRIQUE DU RIZ FONDÉS SUR LA TÉLÉDÉTECTION PAR DRONE ET DES ALGORITHMES D'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE

Wentong Bi[1], Wei Zhang[2], Yupu He[3*], Jing Fu[4], and Zijun Mai[5]

ABSTRACT

To accurately achieve dynamic monitoring and rapid diagnosis of rice water status throughout the entire growth period, this study screened the vegetation indices with the optimal correlations with soil moisture content (SMC), rice canopy leaf transpiration rate (Tr), net photosynthetic rate (Pn), and stomatal conductance (Gs) based on field-measured data, and established a qualitative index system for rice water diagnosis. Subsequently, machine learning algorithms were employed to construct and screen the optimal models for rice water monitoring and diagnosis, ultimately proposing a dynamic monitoring and rapid diagnosis method for rice water information based on unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing. The results indicated that all selected vegetation indices exhibited significant correlations with rice water parameters. Using vegetation indices as input variables and water parameters as dependent variables, the dynamic rice water monitoring models constructed by four machine learning algorithms—Logistic Regression (LR), Support Vector Regression (SVR), Back propagation Neural Network (BPNN), and Random Forest Regression (RFR)—all effectively realized the monitoring of rice water status. The Water Balance Index (WBI) could accurately characterize the degree of rice water deficit; when the Normalized Difference Red Edge Index (NDRE), Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI), and Ratio Vegetation Index (RVI) were jointly used as input variables for the RFR model, the constructed qualitative diagnosis model for rice water deficit exhibited the optimal performance. In conclusion, the dynamic monitoring and rapid diagnosis model for rice water status established by integrating UAV remote sensing and machine learning algorithms provides important theoretical support for the efficient irrigation and drainage management of paddy fields.

Keywords: UAV Remote Sensing ; Machine Learning ; Rice Water Status ; Water Balance Index ; Efficient Irrigation and Drainage.

RÉSUMÉ

Afin d'assurer avec précision le suivi dynamique et le diagnostic rapide de l'état hydrique du riz pendant toute la période de croissance, cette étude a sélectionné, à partir de données mesurées sur le terrain, les indices de végétation présentant les corrélations optimales avec la teneur en eau du sol (SMC), le taux de transpiration foliaire du couvert de riz (Tr), le taux net de photosynthèse (Pn) et la conductance stomatique (Gs), puis a établi un système d'indices qualitatifs pour le diagnostic hydrique du riz. Des algorithmes d'apprentissage

1 Engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, wentongbi9867@163.com.
2 Engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, zhangwei@nhri.cn.
3 Senior engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, heyupu28@163.com, corresponding author.
4 Engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, 1173699585@qq.com.
5 Engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, zjmai@nhri.cn.

automatique ont ensuite été employés pour construire et sélectionner les modèles optimaux de suivi et de diagnostic hydriques du riz, ce qui a finalement conduit à proposer une méthode de suivi dynamique et de diagnostic rapide des informations hydriques du riz fondée sur la télédétection par véhicule aérien sans pilote (UAV). Les résultats ont indiqué que tous les indices de végétation sélectionnés présentaient des corrélations significatives avec les paramètres hydriques du riz. En utilisant les indices de végétation comme variables d'entrée et les paramètres hydriques comme variables dépendantes, les modèles de suivi dynamique de l'état hydrique du riz construits au moyen de quatre algorithmes d'apprentissage automatique — régression logistique (LR), régression à vecteurs de support (SVR), réseau neuronal à rétropropagation (BPNN) et régression par forêt aléatoire (RFR) — ont tous permis de suivre efficacement l'état hydrique du riz. L'indice de bilan hydrique (WBI) permettait de caractériser avec précision le degré de déficit hydrique du riz ; lorsque l'indice de différence normalisée du bord rouge (NDRE), l'indice de végétation par différence normalisée dans le vert (GNDVI) et l'indice de végétation par rapport (RVI) étaient utilisés conjointement comme variables d'entrée du modèle RFR, le modèle qualitatif de diagnostic du déficit hydrique obtenu présentait les meilleures performances. En conclusion, le modèle de suivi dynamique et de diagnostic rapide de l'état hydrique du riz établi en intégrant la télédétection par UAV et les algorithmes d'apprentissage automatique apporte un soutien théorique important à la gestion efficiente de l'irrigation et du drainage des rizières.

Mots clés : Télédétection par véhicule aérien sans pilote (UAV); Apprentissage automatique; Etat hydrique du riz; Indice de bilan hydrique; Efficacité d'irrigation et de drainage.

CLIMATE-SMART IRRIGATION TECHNOLOGIES AND STRATEGIES FOR FORAGE CROPS IN CALIFORNIA'S LOW DESERT

TECHNOLOGIES ET STRATÉGIES D'IRRIGATION INTELLIGENTES FACE AU CLIMAT POUR LES CULTURES FOURRAGÈRES DANS LE DÉSERT DE BASSE ALTITUDE DE CALIFORNIE

Aliasghar Montazar[1]

ABSTRACT

California's low desert is one of the most productive forage-producing regions in the western United States, yet production depends heavily on Colorado River irrigation under extremely arid conditions. Increasing drought severity and declining water availability have intensified the need for climate-smart irrigation strategies. This study synthesizes field evaluations and monitoring-based assessments of irrigation technologies and adaptive water-management approaches implemented in low desert forage systems between 2018 and 2026. Data from more than 55 research-controlled plots and commercial field trials were used to evaluate surface irrigation automation, tailwater recovery, subsurface drip irrigation (SDI), precision sprinkler systems, deficit irrigation, and decision-support technologies. Automated surface irrigation using solar-powered canal gates and real-time water advance sensing reduced tailwater runoff to approximately 4% of applied irrigation water, while tailwater recovery systems captured and reused approximately 70% of runoff. Field-scale comparisons across 26 alfalfa fields showed that SDI increased average alfalfa yield from 23.7 to 26.2 Mg ha^{-1} and improved water productivity relative to flood irrigation. Deficit irrigation trials achieved seasonal water conservation ranging from 100 to 700 mm depending on irrigation cutoff severity, with forage yield reductions of 4 to 18%. Multi-depth soil moisture monitoring further highlighted the importance of root-zone storage management for sustaining forage systems during prolonged drought. Integrated monitoring technologies, including evapotranspiration measurements, soil moisture sensing, automated monitoring systems, and remote sensing, improved irrigation scheduling and drought-adaptive management under variable desert conditions. Overall, the evaluated technologies reduced operational losses, improved forage yield and water productivity, and enhanced drought adaptation through more efficient use of irrigation water and stored root-zone moisture. These findings indicate that integrated drought-adaptive irrigation systems provide a practical pathway for improving agricultural water-use efficiency under increasing water scarcity in the low desert region.

Keywords: Climate-smart irrigation technologies; Forage crops; Deficit irrigation; Integrated monitoring technologies; Soil moisture sensing.

RÉSUMÉ

Le désert de basse altitude de Californie est l'une des régions les plus productives de l'ouest des États-Unis pour les cultures fourragères, mais la production y dépend fortement de l'irrigation à partir du fleuve Colorado dans des conditions extrêmement arides. L'aggravation de la sécheresse et la diminution de la disponibilité de l'eau ont renforcé la nécessité de stratégies d'irrigation intelligentes face au climat. Cette étude synthétise les évaluations sur le terrain et les analyses fondées sur le suivi de technologies d'irrigation et de méthodes adaptatives de gestion de l'eau mises en œuvre dans les systèmes fourragers du désert de basse altitude entre 2018 et 2026. Les données issues de plus de 55 parcelles expérimentales

1 University of California Division of Agriculture and Natural Resources, UC Cooperative Extension Imperial County, Holtville, CA, USA Email: amontazar@ucanr.edu

contrôlées et d'essais en champs commerciaux ont été utilisées pour évaluer l'automatisation de l'irrigation de surface, la récupération des eaux de ruissellement en bout de parcelle, l'irrigation goutte à goutte souterraine (SDI), les systèmes d'aspersion de précision, l'irrigation déficitaire et les technologies d'aide à la décision. L'irrigation de surface automatisée, faisant appel à des vannes de canal alimentées à l'énergie solaire et à la détection en temps réel de l'avancement de l'eau, a réduit le ruissellement en bout de parcelle à environ 4 % de l'eau d'irrigation appliquée, tandis que les systèmes de récupération ont capté et réutilisé environ 70 % du ruissellement. Des comparaisons à l'échelle de la parcelle dans 26 champs de luzerne ont montré que la SDI faisait passer le rendement moyen de la luzerne de 23,7 à 26,2 Mg ha^{-1} et améliorait la productivité de l'eau par rapport à l'irrigation par submersion. Les essais d'irrigation déficitaire ont permis d'économiser de 100 à 700 mm d'eau sur la saison, selon l'ampleur de l'arrêt de l'irrigation, avec des réductions du rendement fourrager de 4 à 18 %. Le suivi de l'humidité du sol à plusieurs profondeurs a également mis en évidence l'importance de la gestion de la réserve en eau de la zone racinaire pour maintenir les systèmes fourragers pendant les sécheresses prolongées. Les technologies de suivi intégrées, notamment les mesures de l'évapotranspiration, les capteurs d'humidité du sol, les systèmes de suivi automatisés et la télédétection, ont amélioré la programmation de l'irrigation et la gestion adaptative de la sécheresse dans des conditions désertiques variables. Dans l'ensemble, les technologies évaluées ont réduit les pertes opérationnelles, amélioré le rendement fourrager et la productivité de l'eau, et renforcé l'adaptation à la sécheresse grâce à une utilisation plus efficiente de l'eau d'irrigation et de l'humidité stockée dans la zone racinaire. Ces résultats indiquent que les systèmes d'irrigation intégrés et adaptatifs à la sécheresse offrent une voie concrète pour améliorer l'efficience de l'utilisation de l'eau en agriculture face à une pénurie d'eau croissante dans la région du désert de basse altitude.

Mots clés : Technologies d'irrigation intelligentes face au climat; Cultures fourragères; Irrigation déficitaire; Technologies de suivi intégrées; Capteurs d'humidité du sol.

A DATA-DRIVEN TOOL FOR SITE-SPECIFIC IRRIGATION OPTIMIZATION IN VINEYARDS

UN OUTIL PILOTÉ PAR LES DONNÉES POUR L'OPTIMISATION DE L'IRRIGATION PROPRE À CHAQUE SITE DANS LES VIGNOBLES

M. Rodríguez-Febereiro[1], M. Fandiño[2], J. Yuste[3], D. Rey[4], J. Martínez-Barbera[5], D. Martínez-Porro[6], D. Gutíerrez[2], R. Ferrer-Gallego C. Rey, R. Pérez-Añón[7], and D. Franco[3], J. Cancela[1]

ABSTRACT

Operational Group PRERIVID is focused on the development of an advanced decision-support tool for irrigation management aimed at estimating vineyard water requirements with a prediction horizon of up to seven days (Bellvert et al., 2021). The main objective was to integrate continuous field monitoring with short-term predictive modelling in order to improve the accuracy of irrigation scheduling under variable soil and climatic conditions, particularly in scenarios characterized by increasing water scarcity and climatic uncertainty (Kang et al., 2023).

To achieve this, commercial vineyard plots were instrumented with a network of soil moisture and electrical conductivity sensors installed at multiple depths within the soil profile.

A central methodological component of the project was the systematic comparison between continuous sensor-based measurements and soil water content values obtained using Time Domain Reflectometry (TDR) techniques. TDR measurements were performed periodically as a reference method to validate and calibrate the permanently installed sensors. This comparative approach enabled the identification of sensor bias, potential signal drift, and site-specific calibration factors related to soil texture, bulk density, salinity, and electrical conductivity. By refining the relationship between sensor outputs and actual volumetric water content, the overall accuracy, consistency, and robustness of the monitoring system were significantly enhanced across different vineyard sites and soil conditions.

The results demonstrated a strong agreement between TDR measurements and the calibrated sensor network, confirming the reliability of the monitoring framework for operational use in vineyard management. The application of the PRERIVID methodology led to measurable improvements in water use efficiency and provided greater control over vine water status throughout the growing season. Furthermore, the optimized irrigation regimes contributed to maintaining grape yield and quality under conditions of increasing climatic variability, while also supporting the long-term sustainability of water resources at the farm and regional scales.

Keywords: Water scarcity; Climatic uncertainty; Commercial vineyard plots; Soil texture; Monitoring framework.

1 Universidad de Santiago de Compostela, PROePLA. Agroforestry Engineering Department, Lugo, Spain
2 ITACYL (Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León), Valladolid, Spain
3 MONET Tecnología e Innovación SL., Nigrán, Spain
4 Bodegas Enguera, Enguera, Spain
5 Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE), Consejo Superior de Investigaciones Científicas-Universidad de Valencia-Generalitat Valenciana, Moncada (Valencia), Spain.
6 Quinta Sardonia, Sardón del Duero, Spain
7 Bodegas Quinta de Couselo, O Rosal, Spain

RÉSUMÉ

Le groupe opérationnel PRERIVID se consacre au développement d'un outil avancé d'aide à la décision pour la gestion de l'irrigation, destiné à estimer les besoins en eau des vignobles avec un horizon prévisionnel allant jusqu'à sept jours (Bellvert et al., 2021). L'objectif principal était d'intégrer le suivi continu sur le terrain et la modélisation prédictive à court terme afin d'améliorer la précision de la programmation de l'irrigation dans des conditions pédologiques et climatiques variables, en particulier dans les situations caractérisées par une pénurie d'eau croissante et une incertitude climatique accrue (Kang et al., 2023).

À cette fin, des parcelles viticoles commerciales ont été équipées d'un réseau de capteurs d'humidité du sol et de conductivité électrique installés à plusieurs profondeurs dans le profil pédologique.

Une composante méthodologique centrale du projet consistait à comparer systématiquement les mesures continues fournies par les capteurs aux valeurs de teneur en eau du sol obtenues par réflectométrie dans le domaine temporel (TDR). Des mesures TDR ont été réalisées périodiquement comme méthode de référence afin de valider et d'étalonner les capteurs installés en permanence. Cette démarche comparative a permis de détecter les biais des capteurs et une éventuelle dérive du signal, ainsi que de déterminer des facteurs d'étalonnage propres au site liés à la texture du sol, à la densité apparente, à la salinité et à la conductivité électrique. L'affinement de la relation entre les signaux des capteurs et la teneur volumique réelle en eau a sensiblement amélioré la précision, la cohérence et la robustesse globales du système de suivi dans les différents vignobles et sous diverses conditions pédologiques.

Les résultats ont montré une forte concordance entre les mesures TDR et le réseau de capteurs étalonné, confirmant la fiabilité du dispositif de suivi pour une utilisation opérationnelle dans la gestion des vignobles. L'application de la méthodologie PRERIVID a entraîné des améliorations mesurables de l'efficience de l'utilisation de l'eau et permis un meilleur contrôle de l'état hydrique de la vigne tout au long de la saison de croissance. En outre, les régimes d'irrigation optimisés ont contribué à maintenir le rendement et la qualité des raisins dans un contexte de variabilité climatique croissante, tout en favorisant la durabilité à long terme des ressources en eau à l'échelle de l'exploitation et de la région.

Mots clés : Pénurie d'eau croissante; Incertitude climatique; Parcelles viticoles commerciales; Texture du sol; Dispositif de suivi.

DO WE KNOW WHETHER DECISION SUPPORT SYSTEMS FOR IRRIGATION ARE USEFUL?

SAVONS-NOUS SI LES SYSTÈMES D'AIDE À LA DÉCISION POUR L'IRRIGATION SONT UTILES?

Claire Richert[1], Frédéric Grelot[2], Sophie Martin[3], and Hélène Tribouillois[4]

ABSTRACT

Irrigation Decision Support Systems (IDSS) are precision agriculture tools designed to help farmers schedule irrigation. They are promoted by public policies, for example in France. This article presents a first overview of the current state of knowledge regarding their usefulness. More specifically, this study aims to identify the main purpose of IDSS and evaluate the extent to which the existing literature provides information on the ability of IDSS to meet this purpose. First, studies that claim to evaluate an IDSS were identified. They all provided a list of purposes for IDSS in their introduction. The most frequently mentioned purpose was that they should improve water productivity. The studies presenting a suitable methodology for carrying out a meta-analysis of the effect of IDSS on water productivity and its 2 components (yield and irrigation volume) were subsequently selected. The ability of IDSS to improve water productivity as a function of the type of crops, climate, and type of IDSS was also examined. Using an IDSS improved water productivity for 57% of the cases taken into account, generally because the irrigation volume was lower, with no negative impact on yield. This value fell to 48% for market gardening crops. No significant effect of the climate and the type of IDSS were found. Given the low number of data points by study, these results are probably affected by a publication bias and should be considered as an upper limit of the effect of IDSS on water productivity.

Keywords: Decision support systems; Precision agriculture tools; Yield and irrigation volume; Market gardening crops; Water productivity.

RÉSUMÉ

Les systèmes d'aide à la décision pour l'irrigation (IDSS) sont des outils d'agriculture de précision conçus pour aider les agriculteurs à programmer l'irrigation. Ils sont encouragés par les politiques publiques, notamment en France. Cet article présente un premier aperçu de l'état actuel des connaissances concernant leur utilité. Plus précisément, cette étude vise à déterminer l'objectif principal des IDSS et à évaluer dans quelle mesure la littérature existante renseigne sur leur capacité à atteindre cet objectif. Dans un premier temps, les études affirmant évaluer un IDSS ont été recensées. Elles présentaient toutes, dans leur introduction, une liste des objectifs des IDSS. L'objectif le plus fréquemment cité était l'amélioration de la productivité de l'eau. Les études présentant une méthodologie adaptée à la réalisation d'une méta-analyse de l'effet des IDSS sur la productivité de l'eau et sur ses deux composantes — le rendement et le volume d'irrigation — ont ensuite été sélectionnées. La capacité des IDSS à améliorer la productivité de l'eau en fonction du type de culture, du climat et du type d'IDSS

1 UMR MIA Paris-Saclay, Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, Palaiseau, 91120, France Email: richert.claire@gmail.com
2 G-EAU, Univ. Montpellier, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France
3 UMR MIA Paris-Saclay, Universite Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, Palaiseau, 91120, France
4 Terres inovia, 110 chemin de la Côte Vieille, 31450 Baziège, France

a également été examinée. L'utilisation d'un IDSS a amélioré la productivité de l'eau dans 57 % des cas pris en compte, généralement parce que le volume d'irrigation était plus faible, sans effet négatif sur le rendement. Cette proportion est tombée à 48 % pour les cultures maraîchères. Aucun effet significatif du climat ni du type d'IDSS n'a été observé. Compte tenu du faible nombre de points de données par étude, ces résultats sont probablement affectés par un biais de publication et doivent être considérés comme une limite supérieure de l'effet des IDSS sur la productivité de l'eau.

Mots clés : Systèmes d'aide à la décision; Outils d'agriculture de précision; Rendement et volume d'irrigation; Cultures maraîchères; Productivité de l'eau.

OPTIMIZING ROTATIONAL IRRIGATION STRATEGIES AND ENHANCING WATER-USE EFFICIENCY IN THE HOULI CANAL SYSTEM: AN OPTIMIZATION MODEL BASED ASSESSMENT

OPTIMISATION DES STRATÉGIES D'IRRIGATION PAR ROTATION ET AMÉLIORATION DE L'EFFICIENCE DE L'UTILISATION DE L'EAU DANS LE RÉSEAU DE CANAUX DE HOULI : ÉVALUATION FONDÉE SUR UN MODÈLE D'OPTIMISATION

Yun Wei Tan[1]. Ming-Che Hu[2] and Feng Wen Chen[3]

ABSTRACT

The Houli Canal irrigation district, located on the southern bank of the Daan River in Taichung, is one of the most important rice-producing regions in central Taiwan. Due to its extensive service area and high crop water demand, the district has frequently experienced irrigation shortages, particularly under the long-term reduction of agricultural water rights and increasing competition from domestic and industrial water uses. To maintain agricultural production under constrained water supply conditions, the Houli Canal has implemented a rotational irrigation scheme operated by three work stations—TZJ, YM, and ZY. In current practice, the rotation cycle is fixed at 5.5 days (132 hours), with station-specific rotation durations of 18 hours for TZJ, 62 hours for YM, and 52 hours for ZY. While this system has been effective in sustaining irrigation operations, fixed rotation intervals and static station allocations may not fully reflect seasonal variability in crop water demand, conveyance time, and conveyance losses. This study develops an optimization-based analytical framework to evaluate the performance of the existing rotational irrigation regime and to explore opportunities for improving water-use efficiency. The analysis is primarily based on the 2024 planned water allocation and conveyance discharge data for the three work stations. Planned flows exhibit clear intra-annual variability, particularly at YM and ZY, where a bimodal pattern reflects the double-cropping rice system. Peak planned discharges reach approximately 3~4 m^3/s, and conveyance losses increase proportionally with flow magnitude, with maximum losses of about 1.3 m^3/s observed at YM. Overall, annual conveyance loss rates across the stations are estimated to range between 30~40%, highlighting the importance of incorporating conveyance characteristics into irrigation scheduling. Conveyance times were estimated using the Manning equation, assuming a representative canal width of approximately 3.8 m and a uniform slope of 0.0019. Monthly flow data were used to derive reach velocities and travel times for each station. Estimated flow velocities range from approximately 0.94~1.44 m/s, resulting in average conveyance times of about 0.97 hours to TZJ, 1.7 hours to YM, and 3.35 hours to ZY. These results indicate that conveyance time is non-negligible relative to rotational irrigation operations, especially for downstream service areas. Crop water requirements were estimated using the FAO Penman~Monteith method to calculate reference evapotranspiration, combined with FAO crop coefficients and local cropping assumptions. Paddy rice cultivation was assumed from February to November, with short-term vegetable crops during December and January. Soil infiltration was incorporated to represent ponded paddy field conditions. Based on the predominance of sandy loam and loam soils, the area-weighted infiltration

1 Institute, Agricultural Engineering Research Center, Taoyuan 32061, Taiwan (R.O.C.) Email: tan0710@aerc.org.tw
2 Institute, Department of Bioenvironmental System Engineering, National Taiwan University Email: mchu@ntu.edu.tw
3 Institute, Agricultural Engineering Research Center, Taoyuan 32061, Taiwan (R.O.C.), Email: chenfw@aerc.org.tw

rate was estimated at approximately 10.23 mm/day, and seasonal crop water requirements ranged from about 1.95~14.64 mm/day. An optimization model was formulated on a 10-day periods (ten-day) time scale to identify the optimal rotation interval and station-specific rotation durations while accounting for conveyance time and operational constraints. Results indicate that the highest irrigation efficiency is achieved with two rotations, corresponding to a 5-day rotation interval, which is broadly consistent with the current 5.5-day cycle. The model further suggests that rotation durations should be adjusted dynamically on a 10-day periods basis to reflect seasonal demand variability. Optimized station-specific rotation durations were found to be close to current practice, indicating that the existing rotational irrigation system is generally well-structured, while modest seasonal adjustments could further enhance water-use efficiency under increasing supply constraints.

Keywords: Agricultural Water, Rotation Irrigation Mechanism, Optimization; Crop water requirements; Water-use efficiency.

RÉSUMÉ

Le périmètre irrigué du canal de Houli, situé sur la rive sud de la rivière Daan à Taichung, est l'une des principales régions rizicoles du centre de Taïwan. En raison de l'étendue de sa zone desservie et des besoins élevés en eau des cultures, le périmètre a fréquemment connu des pénuries d'eau d'irrigation, notamment dans un contexte de réduction à long terme des droits d'eau agricoles et de concurrence croissante des usages domestiques et industriels. Afin de maintenir la production agricole dans des conditions d'approvisionnement en eau limitées, le canal de Houli a mis en œuvre un dispositif d'irrigation par rotation exploité par trois stations de travail : TZJ, YM et ZY. Dans la pratique actuelle, le cycle de rotation est fixé à 5,5 jours (132 heures), avec des durées propres à chaque station de 18 heures pour TZJ, 62 heures pour YM et 52 heures pour ZY. Si ce système a permis de maintenir efficacement les opérations d'irrigation, les intervalles de rotation fixes et les allocations statiques entre les stations peuvent ne pas refléter pleinement les variations saisonnières des besoins en eau des cultures, du temps d'acheminement et des pertes de transport. Cette étude développe un cadre analytique fondé sur l'optimisation afin d'évaluer les performances du régime existant d'irrigation par rotation et d'examiner les possibilités d'amélioration de l'efficience de l'utilisation de l'eau. L'analyse repose principalement sur les données de 2024 relatives aux allocations d'eau planifiées et aux débits d'acheminement des trois stations de travail. Les débits planifiés présentent une nette variabilité intra-annuelle, en particulier à YM et ZY, où une distribution bimodale reflète le système de double culture du riz. Les débits planifiés maximaux atteignent environ 3 à 4 m³/s, et les pertes de transport augmentent proportionnellement à l'importance du débit, les pertes maximales observées à YM étant d'environ 1,3 m³/s. Globalement, les taux annuels de pertes de transport dans les différentes stations sont estimés entre 30 % et 40 %, ce qui souligne l'importance de prendre en compte les caractéristiques d'acheminement dans la programmation de l'irrigation. Les temps d'acheminement ont été estimés à l'aide de l'équation de Manning, en supposant une largeur représentative du canal d'environ 3,8 m et une pente uniforme de 0,0019. Les données mensuelles de débit ont servi à calculer la vitesse d'écoulement et le temps de parcours pour chaque station. Les vitesses d'écoulement estimées varient d'environ 0,94 à 1,44 m/s, ce qui donne des temps moyens d'acheminement d'environ 0,97 heure jusqu'à TZJ, 1,7 heure jusqu'à YM et 3,35 heures jusqu'à ZY. Ces résultats indiquent que le temps d'acheminement n'est pas négligeable par rapport aux opérations d'irrigation par rotation, surtout pour les zones desservies en aval. Les besoins en eau des cultures ont été estimés à l'aide de la méthode FAO de Penman-Monteith pour calculer l'évapotranspiration de référence, combinée aux coefficients culturaux de la FAO et aux hypothèses locales de culture. La riziculture inondée a été supposée de février à novembre, avec des cultures maraîchères à cycle court en décembre et janvier. L'infiltration du sol a été intégrée afin de représenter les conditions des rizières submergées.

Compte tenu de la prédominance des sols sablo-limoneux et limoneux, le taux d'infiltration pondéré par la superficie a été estimé à environ 10,23 mm/jour, et les besoins saisonniers en eau des cultures variaient d'environ 1,95 à 14,64 mm/jour. Un modèle d'optimisation a été formulé sur une échelle temporelle de dix jours afin de déterminer l'intervalle de rotation optimal et les durées de rotation propres à chaque station, tout en tenant compte du temps d'acheminement et des contraintes opérationnelles. Les résultats indiquent que l'efficience d'irrigation la plus élevée est obtenue avec deux rotations, ce qui correspond à un intervalle de rotation de 5 jours et concorde globalement avec le cycle actuel de 5,5 jours. Le modèle suggère en outre d'ajuster dynamiquement les durées de rotation tous les dix jours afin de refléter la variabilité saisonnière de la demande. Les durées de rotation optimisées pour chaque station se sont révélées proches de la pratique actuelle, ce qui indique que le système existant d'irrigation par rotation est généralement bien structuré, tandis que de modestes ajustements saisonniers pourraient encore améliorer l'efficience de l'utilisation de l'eau face à des contraintes croissantes sur l'approvisionnement.

Mots clés : Eau agricoles; Mécanisme de rotation d'Irrigation, Optimisation; Besoins en eau des cultures; Efficience de l'utilisation de l'eau.

SURROGATE MODELING FOR THE OPTIMIZATION OF ADVANCED WATER TREATMENT SYSTEMS IN IRRIGATION AND WATER REUSE CONTEXTS

MODÉLISATION DE SUBSTITUTION POUR L'OPTIMISATION DES SYSTÈMES AVANCÉS DE TRAITEMENT DE L'EAU DANS LES CONTEXTES DE L'IRRIGATION ET DE LA RÉUTILISATION DE L'EAU

Derviş Durmaz[1], Rémy Dutto[2], Alain Rapaport[3], Aymen Chaaben[4], and Jérôme Harmand[2]

ABSTRACT

This work develops a dynamic surrogate-modeling framework that approximates the input–output behavior of detailed mechanistic Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR) models in view of its optimization for water reuse. The proposed approach uses a 30-day, one-minute-resolution dataset generated from the coupled biological–fouling model of Benyahia et al. (2024). Five neural-network architectures are benchmarked: a Long Short-Term Memory (LSTM) network, a Transformer, two recent time-series models (TimeMixer, TimeMachine), and a Stiff Physics-Informed Neural Network (Stiff-PINN). Within the training distribution, all five surrogates reproduce permeate flux with mean absolute percentage errors below 0.01 % and coefficients of determination above 0.96, with the Stiff-PINN reaching 0.0002 %. An explicit initial-condition sensitivity analysis, however, reveals a sharp dichotomy: when initial states fall outside the training distribution (pre-fouled membrane, combined biological–fouling stress), the four data-driven sequence models diverge by 290 % to 620 % MAPE, whereas the Stiff-PINN, which embeds the underlying ordinary differential equations, retains accuracy below 0.001%. The framework therefore identifies physics-informed surrogates as the architecture class best suited to support trustworthy optimization of membrane-based water reuse systems beyond historical operating regimes, while delivering the differentiability and batched evaluation required by gradient-based model-predictive control of irrigation-oriented reuse.

Keywords: Dynamic surrogate-modeling framework; Neural-network; Time-series models; Irrigation-oriented reuse.

RÉSUMÉ

Ce travail développe un cadre dynamique de modélisation de substitution qui reproduit approximativement le comportement entrée-sortie de modèles mécanistes détaillés de bioréacteur anaérobie à membranes (AnMBR), en vue d'optimiser la réutilisation de l'eau. L'approche proposée utilise un jeu de données couvrant 30 jours avec une résolution d'une minute, généré à partir du modèle couplé biologique-colmatage de Benyahia et al. (2024). Cinq architectures de réseaux neuronaux sont comparées : un réseau à mémoire à long et court terme (LSTM), un Transformer, deux modèles récents de séries temporelles (TimeMixer et TimeMachine) et un réseau neuronal informé par la physique pour systèmes raides (Stiff-PINN). Dans la distribution d'entraînement, les cinq modèles de substitution reproduisent le flux de perméat avec des erreurs absolues moyennes en pourcentage inférieures à 0,01 % et des coefficients de détermination supérieurs à 0,96, le Stiff-PINN atteignant 0,0002 %. Toutefois, une analyse explicite de la sensibilité aux conditions initiales révèle une nette dichotomie : lorsque les états initiaux se situent hors de la distribution d'entraînement — membrane précolmatée ou contraintes biologiques et de colmatage combinées —, les quatre modèles

1 Artificial Intelligence and Agricultural Technologies Research Center, TAGEM, Ankara, Turkiye
2 LBE, Univ. Montpellier, INRAE, Narbonne, France
3 UMR MISTEA, Univ. Montpellier, INRAE, Montpellier, France
4 IEM, Univ. Montpellier, Montpellier, France

séquentiels fondés sur les données divergent, avec des valeurs de MAPE comprises entre 290 % et 620 %, tandis que le Stiff-PINN, qui intègre les équations différentielles ordinaires sous-jacentes, conserve une erreur inférieure à 0,001 %. Le cadre désigne ainsi les modèles de substitution informés par la physique comme la classe d'architectures la mieux adaptée à une optimisation fiable des systèmes de réutilisation de l'eau à membranes au-delà des régimes de fonctionnement historiques, tout en offrant la différentiabilité et l'évaluation par lots nécessaires à la commande prédictive par modèle fondée sur le gradient pour la réutilisation de l'eau destinée à l'irrigation.

Mots clés : Cadre dynamique de modélisation de substitution; Réseaux neuronaux; Modèles de séries temporelles; Réutilisation de l'eau destinée à l'irrigation.

CONDITIONS OF SUCCESS FOR CONNECTED TECHNOLOGIES IN COLLECTIVE IRRIGATION

CONDITIONS DE RÉUSSITE DES TECHNOLOGIES CONNECTÉES DANS L'IRRIGATION COLLECTIVE

Aguylan Bernanos[1], Anthony Blache, and Pierre Savey

ABSTRACT

Climate change is now an observable reality, with increasing droughts, rising temperatures and growing pressure on water resources, particularly in Mediterranean regions of southern France. In this context, irrigation has become essential for securing agricultural production and improving farm resilience. Since agriculture accounts for nearly 70% of global freshwater withdrawals, improving water-use efficiency has become a major challenge.

Over the last decade, connected irrigation technologies have rapidly developed through advances in digitalisation, sensors, telecommunications and data-processing tools. Smart meters, remote-control systems, IoT sensors and real-time monitoring platforms are increasingly integrated into collective irrigation networks to optimise water distribution and consumption monitoring.

This article analyses the contributions, limitations and conditions for success of connected technologies in collective irrigation systems. This analysis is based on a review of scientific literature, stakeholder exchanges and operational feedback from projects conducted by BRL Ingénierie in France. The analysis considers four complementary dimensions: technical performance, economic viability, organisational integration and socio-governance acceptability.

Results show that connected technologies improve network management through real-time monitoring, leak detection, irrigation control and faster operational response. They also support the transition toward data-driven[2] irrigation management. Several studies report water savings ranging from 10% to 30% when smart technologies are combined with monitoring and decision-support systems. However, benefits remain highly dependent on infrastructure quality, data reliability, organisational capacity and user support. The study concludes that the effectiveness of connected irrigation systems depends less on the technology itself than on its integration into coherent socio-technical strategies combining adapted infrastructure, human support and collective water governance.

Keywords: Connected irrigation; collective irrigation; smart technologies; water management; irrigation efficiency; water governance; climate change adaptation.

RÉSUMÉ

Le changement climatique est désormais une réalité observable, marquée par une multiplication des sécheresses, une hausse des températures et une pression croissante sur les ressources en eau, en particulier dans les régions méditerranéennes du sud de la France. Dans ce contexte, l'irrigation est devenue indispensable pour sécuriser la production agricole et renforcer la résilience des exploitations. L'agriculture représentant près de 70 % des prélèvements mondiaux d'eau douce, l'amélioration de l'efficience de l'utilisation de l'eau constitue désormais un enjeu majeur.

1 BRL ingénierie – 1105 avenue Pierre Mendès France – 30001 Nîmes Cedex 5 – France Aguylan. bernanos@brl.fr

2 Data-driven refers to a decision-making approach that relies on data analysis and empirical evidence rather than intuition or personal experience.

Au cours de la dernière décennie, les technologies d'irrigation connectée se sont rapidement développées grâce aux progrès de la numérisation, des capteurs, des télécommunications et des outils de traitement des données. Les compteurs intelligents, les systèmes de télécommande, les capteurs de l'Internet des objets (IoT) et les plateformes de suivi en temps réel sont de plus en plus intégrés aux réseaux d'irrigation collective afin d'optimiser la distribution de l'eau et le suivi de la consommation.

Cet article analyse les apports, les limites et les conditions de réussite des technologies connectées dans les systèmes d'irrigation collective. L'analyse repose sur une revue de la littérature scientifique, des échanges avec les parties prenantes et des retours d'expérience opérationnels issus de projets menés par BRL Ingénierie en France. Elle prend en compte quatre dimensions complémentaires : les performances techniques, la viabilité économique, l'intégration organisationnelle et l'acceptabilité sociale et en matière de gouvernance.

Les résultats montrent que les technologies connectées améliorent la gestion des réseaux grâce au suivi en temps réel, à la détection des fuites, au pilotage de l'irrigation et à une réponse opérationnelle plus rapide. Elles favorisent également la transition vers une gestion de l'irrigation fondée sur les données. Plusieurs études font état d'économies d'eau comprises entre 10 % et 30 % lorsque les technologies intelligentes sont associées à des systèmes de suivi et d'aide à la décision. Toutefois, les avantages restent fortement tributaires de la qualité des infrastructures, de la fiabilité des données, des capacités organisationnelles et de l'accompagnement des utilisateurs. L'étude conclut que l'efficacité des systèmes d'irrigation connectés dépend moins de la technologie elle-même que de son intégration dans des stratégies sociotechniques cohérentes associant des infrastructures adaptées, un accompagnement humain et une gouvernance collective de l'eau.

Mots clés : Irrigation connectée; Irrigation collective; Technologies intelligentes; Gestion de l'eau; Efficacité de l'irrigation; Gouvernance de l'eau; Adaptation au changement climatique.

IRRIGABLE: A HYDRO-SPATIAL APP FOR MANAGING IRRIGATION PERFORMANCE AT DIFFERENT SCALES FOR DIFFERENT PURPOSES

IRRIGABLE : UNE APPLICATION HYDROSPATIALE POUR GÉRER LES PERFORMANCES DE L'IRRIGATION À DIFFÉRENTES ÉCHELLES ET À DIVERSES FINS

Bruce Lankford[1], Aaditeshwar Seth, Shivani Mehta, Abror Gafurov, Nafn Amdar, and Salvador Peña-Haro

ABSTRACT

Higher irrigation performance paves the way for improved climate resilience, reduced water consumption, increased water productivity, improved equity, and better management of over-exploited surface and groundwater. However, irrigation systems, especially with open-channel networks, are complex, extensive, data-scarce and subject to many farmer's aims and perspectives. Solutions will have to; be adoptable at scale; leverage many eyes on irrigation (farmers); mesh satellite, canal and field-based measurements; help bring together disparate views, and incorporate comprehensive computations behind an easy-to-use dashboard.

Responding to these problems, the paper outlines a plan to build a mobile application ('app') called 'IrrigAble'. This will be a hydro-spatial dashboard app hosted on smartphones for discussing and managing irrigation performance across multiple scales for different purposes. Examples of these purposes include; planning irrigation scheduling for the season ahead, managing scheduling in real-time, and analysing performance. The paper is structured into three data types, inputs, intermediate calculations, and decision-support. The app will apply to at least six main scales; plot/field, farm, tertiary unit, secondary unit, main system and catchment.

Keywords: Irrigation performance; Water consumption; Water productivity; Irrigation scheduling; Decision-support.

RÉSUMÉ

L'amélioration des performances de l'irrigation ouvre la voie à une meilleure résilience climatique, à une réduction de la consommation d'eau, à une augmentation de la productivité de l'eau, à une plus grande équité et à une meilleure gestion des eaux de surface et souterraines surexploitées. Toutefois, les systèmes d'irrigation, en particulier ceux dotés de réseaux de canaux à surface libre, sont complexes, étendus, pauvres en données et soumis aux nombreux objectifs et points de vue des agriculteurs. Les solutions devront pouvoir être adoptées à grande échelle, tirer parti de la multiplicité des observations sur l'irrigation — notamment celles des agriculteurs —, intégrer les mesures satellitaires ainsi que celles réalisées dans les canaux et sur le terrain, contribuer à rapprocher des points de vue disparates et incorporer des calculs complets dans un tableau de bord facile à utiliser.

En réponse à ces difficultés, l'article présente un projet de création d'une application mobile appelée « IrrigAble ». Il s'agira d'une application de tableau de bord hydrospatial, hébergée sur des smartphones, destinée à examiner et à gérer les performances de l'irrigation à plusieurs échelles et à diverses fins. Ces fins comprennent notamment la planification du calen drier d'irrigation pour la saison à venir, la gestion de ce calendrier en temps réel et l'analyse des performances. L'article est structuré autour de trois types de données : les données

1 Emeritus Professor of Water and Irrigation Policy, University of East Anglia, United Kingdom

d'entrée, les calculs intermédiaires et l'aide à la décision. L'application couvrira au moins six échelles principales : la parcelle ou le champ, l'exploitation, l'unité tertiaire, l'unité secondaire, le système principal et le bassin versant.

Mots clés : Performances de l'irrigation; Consommation d'eau; Productivité de l'eau; Calendrier d'irrigation; Aide à la décision.

CAN IRRIGATION MODERNIZATION OFFSET CLIMATE-DRIVEN INCREASES IN CROP WATER DEMAND? EVIDENCE FROM TÜRKİYE

LA MODERNISATION DE L'IRRIGATION PEUT-ELLE COMPENSER L'AUGMENTATION DES BESOINS EN EAU DES CULTURES DUE AU CLIMAT? ÉLÉMENTS PROBANTS POUR LA TÜRKİYE

Gokmen Dedemen[1]

ABSTRACT

Türkiye's irrigated agriculture is under pressure from climate-driven increases in evapotranspiration and decreases in effective precipitation, as well as existing groundwater stress, especially in key crop production regions like Konya. This study examines whether irrigation modernization can compensate for the expected increases in net irrigation requirement (NIR) for two important crops: sugar beet and maize. NEX-GDDP-CMIP6 climate data from the MPI-ESM1-2-LR model is used for a historical baseline period from 1990 to 2014 and four future scenarios: SSP245 and SSP585 for the periods 2030 to 2060 and 2070 to 2100. Crop evapotranspiration is estimated using the Hargreaves-Samani method, and effective precipitation is estimated using the FAO/AGLW method. NIR is calculated at a resolution of 0.25° across Türkiye. The results were combined for the top-producing provinces and summarized using production-weighted averages. Under SSP245 and near-term SSP585 conditions, projected NIR increases are moderate and can be offset by 20% water savings, but 30% water savings are needed to safely mitigate the worst-case SSP585, 2070-2100 scenario. Results at the provincial level flag Konya as a critical exposure point due to its significant share of production in both crops. The findings indicate that irrigation modernization is a necessary measure, but improvements in field-scale efficiency should not be regarded as guaranteed water savings at the basin scale without ensuring efficient water allocation controls and crop planning.

Keywords: Climate change; Irrigation requirement; NEX-GDDP-CMIP6; Sugar beet; Maize; *Türkiye*; Modernization; Hargreaves–Samani,

RÉSUMÉ

L'agriculture irriguée en Türkiye subit la pression de l'augmentation de l'évapotranspiration et de la diminution des précipitations efficaces dues au climat, auxquelles s'ajoutent les contraintes existantes sur les eaux souterraines, en particulier dans les principales régions de production agricole telles que Konya. Cette étude examine si la modernisation de l'irrigation peut compenser les augmentations attendues des besoins nets d'irrigation (NIR) de deux cultures importantes : la betterave sucrière et le maïs. Les données climatiques NEX-GDDP-CMIP6 issues du modèle MPI-ESM1-2-LR sont utilisées pour une période historique de référence allant de 1990 à 2014 et pour quatre scénarios futurs : SSP245 et SSP585 sur les périodes 2030-2060 et 2070-2100. L'évapotranspiration des cultures est estimée à l'aide de la méthode de Hargreaves-Samani, et les précipitations efficaces au moyen de la méthode FAO/AGLW. Les NIR sont calculés à une résolution de 0,25° sur l'ensemble du territoire de Türkiye. Les résultats ont été combinés pour les provinces les plus productrices et synthétisés sous forme de moyennes pondérées par la production. Dans le scénario SSP245 et à court terme dans le scénario SSP585, les augmentations projetées des NIR sont modérées et

1 Middle East Technical University, Ankara, Türkiye, E-mail: gokmen.dedemen@metu.edu.tr (Corresponding author).

peuvent être compensées par des économies d'eau de 20 %, mais des économies de 30 % sont nécessaires pour atténuer de manière fiable le scénario le plus défavorable, SSP585 sur la période 2070-2100. Les résultats à l'échelle provinciale désignent Konya comme un point d'exposition critique en raison de sa part importante dans la production des deux cultures. Les conclusions indiquent que la modernisation de l'irrigation est une mesure nécessaire, mais que les améliorations de l'efficience à l'échelle de la parcelle ne doivent pas être considérées comme des économies d'eau garanties à l'échelle du bassin sans dispositifs efficaces de contrôle de l'allocation de l'eau et de planification des cultures.

Mots clés : Changement climatique; Besoins d'irrigation; NEX-GDDP-CMIP6; Betterave sucrière; Maïs; Türkiye; Modernisation; Hargreaves–Samani.

SUBSURFACE DRIP IRRIGATION IMPROVES WATER PRODUCTIVITY AND YIELD OF SUGARCANE UNDER SEMI-ARID CONDITIONS

L'IRRIGATION GOUTTE À GOUTTE SOUTERRAINE AMÉLIORE LA PRODUCTIVITÉ DE L'EAU ET LE RENDEMENT DE LA CANNE À SUCRE EN CONDITIONS SEMI-ARIDES

Goden Mabaya[1], Faith Chikunda[2], and Dyton Sakanya[3]

ABSTRACT

Climate change-driven water scarcity poses a major constraint to irrigated sugarcane production in semi-arid regions where crop growth depends almost entirely on irrigation. This study evaluated subsurface drip irrigation (SDI) as a climate-resilient alternative to conventional furrow irrigation in the South-Eastern Lowveld of Zimbabwe. A split-block field experiment comparing SDI and furrow irrigation was conducted at the Zimbabwe Sugar Association Experiment Station using three commercial sugarcane varieties (N14, ZN15 and ZN9). Data collected during the 2024/25 season included irrigation water applied, cane yield, estimated recoverable crystal (ERC), sugar yield, and crop structural parameters.

SDI outperformed furrow irrigation in both water use and yield. It reduced seasonal irrigation water from 13.50 to 9.46 ML ha^{-1}, achieving a 30% saving. Mean cane yield increased from 150.0 t ha^{-1} under furrow to 188.4 t ha^{-1} under SDI. Sugar yield also improved from 19.67 to 25.31 t ha^{-1}. Variety-specific responses confirmed this advantage. Cane yield gains under SDI ranged from 19% to 28%. Sugar yield increased by 26% to 43% relative to furrow irrigation. These gains were mainly due to longer stalks and higher biomass. Estimated recoverable crystal values were higher under SDI, indicating better physiological performance. However, lodging remained high under both systems. It exceeded 90% and was slightly higher under SDI. This has implications for mechanised green-cane harvesting.

These results demonstrate that SDI improves water productivity and crop performance under semi-arid conditions, providing a promising climate-resilient irrigation strategy. Continued multi-year evaluation is required to confirm long-term performance and scalability.

Keywords: Subsurface drip irrigation; Water-use efficiency; Climate-resilient agriculture; Sugarcane productivity; Semi-arid environments; Irrigation innovation.

RÉSUMÉ

La pénurie d'eau due au changement climatique constitue une contrainte majeure pour la production irriguée de canne à sucre dans les régions semi-arides, où la croissance des cultures dépend presque entièrement de l'irrigation. Cette étude a évalué l'irrigation goutte à goutte souterraine (SDI) comme solution de remplacement résiliente au climat par rapport à l'irrigation conventionnelle à la raie dans le Lowveld du sud-est du Zimbabwe. Une expérience de terrain en blocs divisés comparant la SDI à l'irrigation à la raie a été menée à la station expéri mentale de la Zimbabwe Sugar Association sur trois variétés commerciales de canne à sucre (N14, ZN15 et ZN9). Les données recueillies au cours de la campagne 2024/25 comprenaient le volume d'eau d'irrigation appliqué, le rendement en canne, la teneur estimée en cristaux récupérables (ERC), le rendement en sucre et les paramètres structuraux de la culture.

1 Senior Research Agricultural Engineer, Zimbabwe Sugar Association Experiment Station, Chiredzi, Zimbabwe, E-mail: gmabaya@zsaes.org.zw.
2 Student, Chinhoyi University of Technology, Chinhoyi, ZIMBABWE. E-mail: c21145242v@gmail.com.
3 Student, National University of Science and Technology, Ascot, Bulawayo, ZIMBABWE. E-mail: sakanyadyton@gmail.com.

La SDI a surpassé l'irrigation à la raie tant sur le plan de l'utilisation de l'eau que du rendement. Elle a réduit le volume saisonnier d'eau d'irrigation de 13,50 à 9,46 ML ha^{-1}, soit une économie de 30 %. Le rendement moyen en canne est passé de 150,0 t ha^{-1} sous irrigation à la raie à 188,4 t ha^{-1} sous SDI. Le rendement en sucre est également passé de 19,67 à 25,31 t ha^{-1}. Les réponses propres aux différentes variétés ont confirmé cet avantage. Sous SDI, les gains de rendement en canne variaient de 19 % à 28 %. Le rendement en sucre a augmenté de 26 % à 43 % par rapport à l'irrigation à la raie. Ces gains s'expliquaient principalement par des tiges plus longues et une biomasse plus importante. Les valeurs estimées de cristaux récupérables étaient supérieures sous SDI, indiquant de meilleures performances physiologiques. Toutefois, la verse est restée élevée sous les deux systèmes. Elle dépassait 90 % et était légèrement plus importante sous SDI, ce qui a des conséquences pour la récolte mécanisée de la canne verte.

Ces résultats montrent que la SDI améliore la productivité de l'eau et les performances des cultures dans des conditions semi-arides, offrant ainsi une stratégie d'irrigation résiliente au climat prometteuse. La poursuite de l'évaluation sur plusieurs années est nécessaire pour confirmer les performances à long terme et la possibilité d'un déploiement à grande échelle.

Mots clés : Irrigation goutte à goutte souterraine; Efficacité de l'utilisation de l'eau; Agriculture résiliente au climat; Productivity de canne à sucre; Environments semi-aride; Innovation en irrigation.

TRACKING DROUGHT PROPAGATION AND IRRIGATION RESPONSE LAGS USING SATELLITE OBSERVATIONS

SUIVI DE LA PROPAGATION DE LA SÉCHERESSE ET DES DÉCALAGES DE LA RÉPONSE DE L'IRRIGATION À L'AIDE D'OBSERVATIONS SATELLITAIRES

Young-Sik Mun[1], and Won-Ho Nam[2]

ABSTRACT

Agricultural drought exhibits complex temporal relationships between hydroclimatic conditions and observed drought impacts, making lag analysis essential for effective drought monitoring and early warning. In this study, satellite-based precipitation data from the Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data Version 3.0 (CHIRPS V3.0) and climate and soil moisture variables from TerraClimate were used to derive drought indices, including the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) at 3-, 6-, and 12-month accumulation scales and the Soil Moisture Index (SMI). Agricultural drought occurrence and damage records from 2018 to 2023 were analyzed using receiver operating characteristic (ROC) curves and area under the curve (AUC)-based lag analysis to evaluate the temporal response characteristics of the drought indices. The results demonstrated that all indices showed sufficient skill in explaining agricultural drought occurrence, although their temporal response characteristics differed substantially according to index type and accumulation period. Grid-based analysis revealed distinct spatial lag patterns, with SMI and SPEI-12 showing dominant leading responses, whereas SPEI-3 and SPEI-6 exhibited concurrent or mixed responses relative to observed drought impacts. These findings indicate that drought indices reflect different components of the drought propagation process and respond to agricultural drought conditions at different timescales. The study highlights the importance of selecting drought indices according to monitoring objectives and response timing, providing practical insights for satellite-based agricultural drought monitoring, irrigation management, and early warning systems under intensifying hydroclimatic stress.

Keywords: Agricultural drought; CHIRPS V3.0; Drought index; Lag analysis; Satellite-based precipitation; Soil moisture.

RÉSUMÉ

La sécheresse agricole présente des relations temporelles complexes entre les conditions hydroclimatiques et les impacts observés de la sécheresse, ce qui rend l'analyse des décalages temporels essentielle à un suivi efficace de la sécheresse et à l'alerte précoce. Dans cette étude, les données de précipitations satellitaires Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data Version 3.0 (CHIRPS V3.0), ainsi que les variables climatiques et d'humidité du sol de TerraClimate, ont servi à calculer des indices de sécheresse, notamment l'indice standardisé de précipitations et d'évapotranspiration (SPEI) à des échelles d'accumulation de 3, 6 et 12 mois et l'indice d'humidité du sol (SMI). Les relevés d'occurrence et de dommages liés à la sécheresse agricole entre 2018 et 2023 ont été analysés au moyen de courbes ROC (caractéristique de fonctionnement du récepteur) et d'une analyse des déca

1 Senior Researcher, National Agricultural Water Research Center, Hankyong National University, Republic of Korea: youngsik.mun@hknu.ac.kr
2 Professor, School of Social Safety and Systems Engineering, National Agricultural Water Research Center, Hankyong National University, Republic of Korea: wonho.nam@hknu.ac.kr

lages fondée sur l'aire sous la courbe (AUC), afin d'évaluer les caractéristiques de réponse temporelle des indices de sécheresse. Les résultats ont montré que tous les indices possédaient une capacité suffisante pour expliquer l'occurrence de la sécheresse agricole, bien que leurs caractéristiques de réponse temporelle diffèrent sensiblement selon le type d'indice et la période d'accumulation. L'analyse par grille a révélé des schémas spatiaux de décalage distincts : le SMI et le SPEI-12 présentaient principalement des réponses anticipées, tandis que le SPEI-3 et le SPEI-6 affichaient des réponses simultanées ou mixtes par rapport aux impacts observés de la sécheresse. Ces résultats indiquent que les indices de sécheresse reflètent différentes composantes du processus de propagation de la sécheresse et réagissent aux conditions de sécheresse agricole à des échelles temporelles différentes. L'étude souligne l'importance de sélectionner les indices de sécheresse en fonction des objectifs de suivi et du calendrier de réponse, et fournit des indications pratiques pour le suivi satellitaire de la sécheresse agricole, la gestion de l'irrigation et les systèmes d'alerte précoce dans un contexte d'intensification des contraintes hydroclimatiques.

Mots clés : Sécheresse agricole; CHIRPS V3.0; Indice de sécheresse; Analyse Lag; Précipitations satellitaires; Humidité du sol.

STAGE-BASED SOIL WATER THRESHOLDS FOR CITRUS UNDER DEFICIT IRRIGATION

SEUILS DE TENEUR EN EAU DU SOL SELON LE STADE PHÉNOLOGIQUE POUR LES AGRUMES SOUS IRRIGATION DÉFICITAIRE

Ce Wang [1,*], Jinyang Ye [1], Wei Qi [2] and Zhengyu Duan[1]

ABSTRACT

Although regulated deficit irrigation (RDI) improves citrus water productivity, crop evapotranspiration (ETc)-based scheduling recommendations varies regionally and is complex for growers. Soil moisture thresholds expressed as a percentage of field capacity (%θ_f) offer a practical alternative, but quantitative guidelines for navel orange remain limited. A two-year drip-irrigated field experiment under deficit irrigation across critical phenological periods of Newhall navel orange was conducted under rain-out shelters in Gannan, China. In 2024, single-stage deficit treatments were imposed during either the fruit enlargement stage (Stage III) or the fruit coloring and ripening stage (Stage IV) at three deficit levels: mild (75–85%θ_f), moderate (65–75%θ_f), and severe (60–70%θ_f). In 2025, two-stage combined deficit treatments were tested with adjusted thresholds (72.5–82.5%θ_f, 67.5–77.5%θ_f, and 62.5–72.5%θ_f). Stage III was identified as a highly yield-sensitive period; moderate to severe deficits during this stage significantly reduced fruit weight and yield, with losses that could not be fully recovered by rewatering in Stage IV. Stage IV was suitable for quality-oriented deficit irrigation: the treatment combining mild Stage III deficit with severe Stage IV deficit achieved the highest PCA-based integrated quality score while maintaining a relatively high yield, whereas the treatment combining mild deficit in both stages produced the highest yield but the lowest quality score. No single treatment simultaneously maximized yield, fruit quality, and crop water productivity. A decision framework comprising four study-condition-based candidate threshold schemes is proposed: a balanced scheme for commercial orchards (>85%θ_f in Stage III and 65–75%θ_f in Stage IV), a yield-priority scheme (72.5–82.5%θ_f in both stages), a quality-priority scheme for premium fruit (72.5–82.5%θ_f + 62.5–72.5%θ_f), and a water-saving candidate for severely water-limited conditions (62.5–72.5%θ_f + 72.5–82.5%θ_f). These %θ_f-based thresholds are directly measurable with in-field sensors, providing an actionable irrigation guide for navel orange production under similar cultivation conditions.

Keywords: Soil moisture threshold; regulated deficit irrigation; Newhall navel orange; yield; fruit quality; crop water productivity.

RÉSUMÉ

Bien que l'irrigation déficitaire régulée (RDI) améliore la productivité de l'eau des agrumes, les recommandations de programmation fondées sur l'évapotranspiration des cultures (ETc) varient selon les régions et sont complexes pour les producteurs. Les seuils d'humidité du sol exprimés en pourcentage de la capacité au champ (%θf) offrent une solution de remplacement pratique, mais les lignes directrices quantitatives concernant l'orange navel restent limitées. Une expérience de terrain de deux ans, sous irrigation goutte à goutte déficitaire pendant les

1 College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, 8th Focheng West Road, Jiangning District, Nanjing 211100, China. Email: wangce@hhu.edu.cn (C. W.) yejinyang@hhu.edu.cn (J. Y.) duanzhengyu@hhu.edu.cn (Z. D.)

2 Nanjing Hydraulic Research Institute, 223 Guangzhou Road, Nanjing 210029, China. Email: wqi@nhri.cn (W. Q.)

* Corresponding author.

périodes phénologiques critiques de l'orange navel Newhall, a été menée sous abris anti-pluie à Gannan, en Chine. En 2024, des traitements de déficit à un seul stade ont été appliqués soit pendant la phase de grossissement du fruit (stade III), soit pendant la phase de coloration et de maturation du fruit (stade IV), selon trois niveaux de déficit : léger (75–85 %θf), modéré (65–75 %θf) et sévère (60–70 %θf). En 2025, des traitements combinant un déficit sur deux stades ont été testés avec des seuils ajustés (72,5–82,5 %θf, 67,5–77,5 %θf et 62,5–72,5 %θf). Le stade III a été identifié comme une période de forte sensibilité du rendement ; des déficits modérés à sévères pendant ce stade ont sensiblement réduit le poids des fruits et le rendement, et ces pertes n'ont pas pu être entièrement compensées par une reprise de l'irrigation au stade IV. Le stade IV se prêtait à une irrigation déficitaire axée sur la qualité : le traitement combinant un déficit léger au stade III à un déficit sévère au stade IV a obtenu le score intégré de qualité fondé sur la PCA le plus élevé tout en maintenant un rendement relativement important, tandis que le traitement combinant un déficit léger aux deux stades a produit le rendement le plus élevé, mais le score de qualité le plus faible. Aucun traitement n'a simultanément maximisé le rendement, la qualité des fruits et la productivité de l'eau des cultures. Un cadre décisionnel comprenant quatre schémas de seuils possibles, fondés sur les conditions de l'étude, est proposé : un schéma équilibré pour les vergers commerciaux (>85 %θf au stade III et 65–75 %θf au stade IV), un schéma privilégiant le rendement (72,5–82,5 %θf aux deux stades), un schéma privilégiant la qualité pour les fruits haut de gamme (72,5–82,5 %θf + 62,5–72,5 %θf) et une option d'économie d'eau pour les conditions de très forte limitation hydrique (62,5–72,5 %θf + 72,5–82,5 %θf). Ces seuils fondés sur le %θf sont directement mesurables à l'aide de capteurs installés sur le terrain et fournissent un guide d'irrigation opérationnel pour la production d'oranges navel dans des conditions de culture similaires.

Mots clés : Seuils d'humidité du sol; Irrigation déficitaire régulée; Orange navel Newhall; Rendement; Productivité de l'eau des cultures; Productivité de l'eau des cultures.

AN INTEGRATED FRAMEWORK FOR TYPHOON-INDUCED AGRICULTURAL LOSS ACROSS MULTIPLE CROPS

UN CADRE INTÉGRÉ D'ÉVALUATION DES PERTES AGRICOLES DUES AUX TYPHONS POUR PLUSIEURS CULTURES

Jui-Yun Hsieh[1], and Yuan-Chien Lin[1]

ABSTRACT

Agricultural security is fundamental to food resource stability; however, it remains highly vulnerable to typhoon-induced hazards. While existing research predominantly focuses on major staple crops, the diverse agricultural landscape of Taiwan requires a more comprehensive multi-target assessment framework. This study develops an innovative framework to predict monetary losses across five distinct crop categories (rice, fruit trees, vegetables, grains, and flowers) using an integrated CNN-ConvLSTM model. To capture complex meteorological features, we developed the Typhoon Intensity and Type Comprehensive Index (TITCI), a PCA-based method that decouples typhoon characteristics into intensity and hazard-type dimensions. The model effectively maps spatiotemporal typhoon evolution to localized damage magnitudes across 19 counties. Quantitative evaluation demonstrates that the model achieves a test mean absolute error (MAE) of 1.4290 in log-transformed space. For event-level risk prioritization, the framework yields a high Spearman's rank correlation coefficient () of 0.7842 (p = 0.0001). Crucially, during catastrophic events like Typhoon MORAKOT (2009), the model achieves exceptionally high spatial Pearson correlation coefficients () across all five crop categories simultaneously. Furthermore, the framework also successfully generates continuous hazard fields that reveal previously potential unrecorded risk zones. By translating log-space estimations back into monetary scales via a post-calibration factor, this study provides an actionable baseline tool for early warning systems, enabling data-driven disaster management and strategic resource allocation.

Keywords: Integrated framework; Agricultural security; Monetary losses; Early warning systems; Resource allocation.

RÉSUMÉ

La sécurité agricole est fondamentale pour la stabilité des ressources alimentaires ; elle reste toutefois très vulnérable aux risques provoqués par les typhons. Alors que les recherches existantes portent principalement sur les grandes cultures vivrières de base, la diversité du paysage agricole taïwanais exige un cadre d'évaluation multi-cibles plus complet. Cette étude développe un cadre innovant permettant de prévoir les pertes monétaires dans cinq catégories de cultures distinctes — riz, arbres fruitiers, légumes, céréales et fleurs — à l'aide d'un modèle intégré CNN-ConvLSTM. Afin de représenter des caractéristiques météorologiques complexes, nous avons mis au point l'indice global d'intensité et de type de typhon (TITCI), une méthode fondée sur l'analyse en composantes principales (PCA) qui décompose les caractéristiques des typhons en deux dimensions : l'intensité et le type de danger. Le modèle établit efficacement le lien entre l'évolution spatiotemporelle des typhons et l'ampleur localisée des dommages dans 19 comtés. L'évaluation quantitative montre que le modèle atteint une erreur absolue moyenne (MAE) de test de 1,4290 dans l'espace transformé logarithmiquement. Pour la hiérarchisation des risques au niveau des événements, le cadre produit un coefficient élevé de corrélation des rangs de Spearman (ρ),

1 Department of Civil Engineering, National Central University, No. 300, Zhongda Rd., Zhongli District, Taoyuan City 320317, Taiwan, Email: avril20618@gmail.com; Email: yclin@ncu.edu.tw

de 0,7842 (p = 0,0001). Fait essentiel, lors d'événements catastrophiques tels que le typhon MORAKOT (2009), le modèle atteint simultanément des coefficients de corrélation spatiale de Pearson (r) exceptionnellement élevés dans les cinq catégories de cultures. En outre, le cadre génère également avec succès des champs de danger continus qui révèlent des zones de risque potentielles jusque-là non répertoriées. En reconvertissant les estimations dans l'espace logarithmique en valeurs monétaires au moyen d'un facteur de post-étalonnage, cette étude fournit un outil de référence directement exploitable pour les systèmes d'alerte précoce, permettant une gestion des catastrophes fondée sur les données et une allocation stratégique des ressources.

Mots clés : Cadre intégré; Sécurité agricole; Pertes monétaires; Systèmes d'alerte précoce; Allocation des ressources.

OPTIMIZING LINEAR MOVE IRRIGATION SYSTEMS FOR PRECISION LIVESTOCK EFFLUENT APPLICATION IN MAIZE CULTIVATION

OPTIMISATION DES SYSTÈMES D'IRRIGATION À RAMPE FRONTALE POUR L'ÉPANDAGE DE PRÉCISION D'EFFLUENTS D'ÉLEVAGE EN CULTURE DE MAÏS

F. Salmaso[1], and L. Bortolini[1]

ABSTRACT

The optimization of fertilization systems plays a key role in improving nutrient distribution efficiency and reducing environmental impacts in agricultural practices. Agriculture is widely acknowledged as a major source of diffuse pollution of surface and groundwater, largely due to the application of synthetic fertilizers and livestock effluents. It also represents a significant contributor to atmospheric emissions, with livestock operations being the primary source of ammonia emissions, linked to acidification and particulate matter formation, as well as methane and nitrous oxide. Consequently, implementing effluent application techniques that maximize nutrient efficiency while reducing atmospheric emissions has become imperative. In this context, the present study addresses the optimization of a linear move irrigation system fitted with an articulated boom for fertilization in actively growing maize to maximize immediate nutrient uptake. The main objective was to evaluate the feasibility and efficiency of substituting synthetic fertilizers entirely with adequately treated bovine livestock effluents applied as top-dressing. The field trial, carried out on a commercial farm in the Polesine area (Veneto Plain, Italy), included a detailed assessment of effluent distribution uniformity to ensure consistent and sustainable nutrient application. In particular, the trial involved the study of a new distribution system to replace the existing one, which consisted of simple drop pipes with plate emitters characterized by poor application uniformity. The study revealed that distribution uniformity was suboptimal due to severe nozzle clogging and pressure losses along the distribution line. To improve distribution uniformity, it was first necessary to modify the nozzles. In this regard, nozzles were designed that could be directly attached to the individual drop hoses without modifying the machine, thereby keeping costs low for farmers. The nozzles consist of an external PP (polypropylene) body containing a perforated PVC (Polyvinyl chloride) cylinder; the diameter of the orifice determines the nozzle flow rate.

In addition, four pressure gauges were installed at regular intervals to monitor pressure variations along the line. Furthermore, to further reduce the risk of clogging caused by plant material and small stones, the slurry was homogenized as much as possible through an initial mixing step in the tank before being pumped into the distribution line. Following modifications to the emitters, the coefficient of variation (CV), which represents the standard deviation relative to the mean and is used to evaluate distribution uniformity, improved from 43% to 11%. Moreover, thanks to the implemented modifications, pressure along the entire line was found to be uniform, taking into account head losses due to the line length. Finally, nozzle clogging was reduced by approximately 70–80%, thereby also decreasing the time required by the farmer for machine maintenance. Overall, these measures resulted in a more efficient and robust system, ensuring uniform slurry distribution while substantially reducing clogging and maintenance requirements. The results of this study demonstrate that precision fertigation using treated bovine livestock effluents applied through a linear move irrigation system represents a technically feasible and environmentally sustainable alternative to conventional synthetic fertilization in maize cultivation. The improvement in distribution uniformity achieved through relatively simple system modifications highlights the importance of proper system design and maintenance when applying organic effluents.

1 Università degli studi di Padova, TESAF, Legnaro, Italy

Keywords: Optimization of fertilization systems; Agricultural practices; Effluent application techniques; Nozzle flow rate; Organic effluents.

RÉSUMÉ

L'optimisation des systèmes de fertilisation joue un rôle essentiel dans l'amélioration de l'efficacité de la répartition des éléments nutritifs et la réduction des impacts environnementaux des pratiques agricoles. L'agriculture est largement reconnue comme une source majeure de pollution diffuse des eaux de surface et souterraines, en grande partie en raison de l'application d'engrais de synthèse et d'effluents d'élevage. Elle contribue également de façon importante aux émissions atmosphériques, les activités d'élevage constituant la principale source d'émissions d'ammoniac, associées à l'acidification et à la formation de particules, ainsi que d'émissions de méthane et de protoxyde d'azote. Il est donc devenu indispensable de mettre en œuvre des techniques d'épandage des effluents qui maximisent l'efficacité des éléments nutritifs tout en réduisant les émissions atmosphériques. Dans ce contexte, la présente étude porte sur l'optimisation d'un système d'irrigation à rampe frontale muni d'un bras articulé pour fertiliser le maïs en pleine croissance et maximiser l'absorption immédiate des éléments nutritifs. L'objectif principal consistait à évaluer la faisabilité et l'efficacité du remplacement intégral des engrais de synthèse par des effluents bovins convenablement traités et appliqués en fertilisation de couverture. L'essai au champ, mené dans une exploitation commerciale de la région du Polesine, dans la plaine de Vénétie en Italie, comprenait une évaluation détaillée de l'uniformité de répartition des effluents afin de garantir une application homogène et durable des éléments nutritifs. L'essai portait notamment sur un nouveau système de distribution destiné à remplacer le dispositif existant, constitué de simples tuyaux de descente équipés de diffuseurs à plaque et caractérisé par une faible uniformité d'application. L'étude a révélé que cette uniformité était insuffisante en raison d'un colmatage important des buses et de pertes de pression le long de la conduite de distribution. Pour améliorer l'uniformité de répartition, il a d'abord été nécessaire de modifier les buses. Des buses pouvant être fixées directement sur chaque tuyau de descente, sans modification de la machine, ont ainsi été conçues, ce qui a permis de limiter les coûts pour les agriculteurs. Elles se composent d'un corps extérieur en PP (polypropylène) contenant un cylindre perforé en PVC (polychlorure de vinyle) ; le diamètre de l'orifice détermine le débit de la buse.

En outre, quatre manomètres ont été installés à intervalles réguliers afin de surveiller les variations de pression le long de la conduite. Pour réduire davantage le risque de colmatage causé par des débris végétaux et de petites pierres, le lisier a été homogénéisé autant que possible par un premier mélange dans la cuve avant son pompage dans la conduite de distribution. Après modification des émetteurs, le coefficient de variation (CV), qui représente l'écart-type rapporté à la moyenne et sert à évaluer l'uniformité de répartition, est passé de 43 % à 11 %. De plus, grâce aux modifications mises en œuvre, la pression s'est révélée uniforme sur toute la longueur de la conduite, compte tenu des pertes de charge dues à sa longueur. Enfin, le colmatage des buses a diminué d'environ 70 à 80 %, ce qui a également réduit le temps consacré par l'agriculteur à l'entretien de la machine. Dans l'ensemble, ces mesures ont permis d'obtenir un système plus efficace et plus robuste, assurant une répartition uniforme du lisier tout en réduisant sensiblement le colmatage et les besoins d'entretien. Les résultats de cette étude montrent que la fertigation de précision au moyen d'effluents bovins traités, appliqués par un système d'irrigation à rampe frontale, constitue une solution de remplacement techniquement réalisable et écologiquement durable par rapport à la fertilisation de synthèse conventionnelle en culture de maïs. L'amélioration de l'uniformité de répartition obtenue grâce à des modifications relativement simples du système souligne l'importance d'une conception et d'un entretien appropriés lors de l'application d'effluents organiques.

Mots clés : Optimisation des systèmes de fertilisation; Pratiques agricoles; Techniques d'épandage des effluents; Débit de la buse; Effluents organiques.

HIDRIX FOR CONTINUOUS IMPROVEMENT AND TRACEABILITY IN IRRIGATION MANAGEMENT

HIDRIX POUR L'AMÉLIORATION CONTINUE ET LA TRAÇABILITÉ DE LA GESTION DE L'IRRIGATION

S. Guéry[1], M. del Toro Peters[2], C. Campillo Torres[3], and F. Pascual Bernardo[1]

ABSTRACT

Water-scarce basins increasingly require irrigation that is not only efficient, but also auditable: farms must be able to show how irrigation decisions were made, what was applied, and how performance is improving over time. This paper presents HIDRIX, an on-demand irrigation and fertigation management system developed and demonstrated under the LIFE4DOÑANA initiative, and discusses how its operational design supports continuous improvement and full traceability at farm scale.

HIDRIX combines short-term forecasting of crop water needs with multi-point field monitoring and autonomous execution through the irrigation head unit. A model-based seasonal strategy ("roadmap") is established jointly with farm staff and then refined in near real time using distributed sensors that capture spatial variability. The control loop records the full chain of inputs (weather and evapotranspiration forecasts, crop/soil parameters, sensor streams), decisions (recommended schedules and thresholds) and actions (executed irrigation and fertigation events), enabling objective evaluation and iterative optimisation across campaigns.

Results from commercial-scale demonstrations in strawberry farms and an additional avocado farm show that the approach can reduce irrigation volumes while maintaining production. Across the pilot farms, irrigation volumes were reduced by 15.8% on average, fertiliser inputs were reduced by 11.7% for nitrogen and 13.8% for phosphorus (P2O5), and water productivity increased by 21.2%, with yields maintained (+0.7% on average). Beyond the LIFE demonstration, HIDRIX is now deployed in nine commercial farms, several operating fully on-demand, reporting strong gains in water optimisation, stable or improved production, and a measurable reduction in workload and decision pressure for key farm personnel.

HIDRIX illustrates how innovative irrigation services can evolve from "decision support" to traceable execution, embedding continuous improvement and accountability into daily operations.

Keywords: On-demand irrigation; decision support; automation; Traceability; Water productivity; Fertigation.

RÉSUMÉ

Les bassins déficitaires en eau exigent de plus en plus une irrigation à la fois efficace et vérifiable : les exploitations doivent pouvoir démontrer comment leurs décisions ont été prises, quelles quantités ont été appliquées et comment les performances progressent. Cet article présente HIDRIX, un système de gestion de l'irrigation et de la fertigation à la

1 Gabinete de Iniciativas Europeas, C. Arquitectura 5, 41015 Sevilla, Spain, E-mail: sguery@iniciativaseuropeas.es

2. KNITINK Technologies SL Parque Huelva empresarial, 42, 21007 Huelva, Spain, E-mail:m.deltoro@knitink.com

3. CICYTEX, Agronomy Department, Ctra. A-V, Km372, 06187 Guadajira, Spain, E-mail:carlos.campillo@juntaex.es

demande développé et testé dans le cadre de l'initiative LIFE4DOÑANA, et montre comment sa conception opérationnelle assure l'amélioration continue et une traçabilité complète à l'échelle de l'exploitation.

HIDRIX combine la prévision à court terme des besoins en eau des cultures, un suivi multipoint sur le terrain et une exécution autonome par l'intermédiaire de l'unité de tête du réseau d'irrigation. Une stratégie saisonnière fondée sur un modèle, ou « feuille de route », est définie avec le personnel de l'exploitation, puis ajustée presque en temps réel au moyen de capteurs répartis qui reflètent la variabilité spatiale. La boucle de commande enregistre toute la chaîne : les données d'entrée (prévisions météorologiques et d'évapotranspiration, paramètres de la culture et du sol, données des capteurs), les décisions (calendriers et seuils recommandés) et les actions (irrigations et fertigations exécutées), ce qui permet une évaluation objective et une optimisation itérative d'une campagne à l'autre.

Les démonstrations à l'échelle commerciale menées dans des exploitations de fraises et dans une exploitation d'avocatiers montrent que cette approche réduit les volumes d'irrigation tout en maintenant la production. Dans les exploitations pilotes, ces volumes ont diminué en moyenne de 15,8 %, les apports d'engrais de 11,7 % pour l'azote et de 13,8 % pour le phosphore (P2O5), tandis que la productivité de l'eau a augmenté de 21,2 %, avec des rendements maintenus (+0,7 % en moyenne). Au-delà de la démonstration LIFE, HIDRIX est désormais déployé dans neuf exploitations commerciales, dont plusieurs fonctionnent entièrement à la demande ; celles-ci signalent une forte optimisation de l'eau, une production stable ou accrue et une réduction mesurable de la charge de travail et de la pression décisionnelle du personnel clé.

HIDRIX montre comment des services d'irrigation innovants peuvent évoluer de « l'aide à la décision » vers une exécution traçable, en intégrant l'amélioration continue et la responsabilisation aux opérations quotidiennes.

Mots clés: Irrigation à la demande; Aide à la decision; Automatisation; Traceability; Productivité de l'eau; Fertigation.

A COMPREHENSIVE STUDY ON REAL-TIME MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION FOR EFFICIENT WATER DISTRIBUTION IN CANAL SYSTEMS

ÉTUDE APPROFONDIE DE L'OPTIMISATION MULTIOBJECTIF EN TEMPS RÉEL POUR UNE DISTRIBUTION EFFICACE DE L'EAU DANS LES RÉSEAUX DE CANAUX

Mai Zijun[1], He Yupu[1], Ji Renjing[1], Zhang Wei[1], Qi Wei[1], and Zha Yuanyuan[2]

ABSTRACT

Traditional irrigation scheduling adopts macroscopic water balance, simplifying canals into pipes with fixed losses. These methods fail to capture dynamic water level changes at canal ends and unsteady flow recession, causing ineffective supply and tail-water loss. This paper proposes a method coupling macroscopic reservoir scheduling with microscopic hydrodynamic simulation. First, based on remote sensing and elevation data, the minimum effective water level for gravity flow at each main canal end is determined. An improved Manning formula back-calculates the minimum supply flow lower bound and pre-storage threshold, forming bottom-line constraints. Second, a mixed-integer linear programming (MILP) model minimizing total release, delivery duration, and gate operations is built to obtain reservoir release and canal diversion hydrographs. These serve as upstream boundaries of the 1D unsteady Saint-Venant equations solved by the Preissmann implicit scheme. The downstream boundary switches dynamically based on real-time comparison between canal-end depth and the effective water level. Net effective supply is integrated. The maximum deviation between net effective supply and target demand is the convergence criterion; otherwise, a damping learning rate corrects the macroscopic target, driving macro-micro iteration. A case study in Hubei, China, validates the method. Results show that under different demand scenarios, the method optimizes water distribution, meets gravity-flow requirements, reduces ineffective supply and tail-water loss, shortens delivery time, and decreases gate operations, solving the traditional 'volume satisfied but level insufficient' problem.

Keywords: Irrigation district optimal scheduling; multi-source water supply; effective gravity-flow water level; mixed-integer linear programming; macro–micro coupling.

RÉSUMÉ

Les méthodes classiques de programmation de l'irrigation reposent sur un bilan hydrique macroscopique et assimilent les canaux à des conduites présentant des pertes fixes. Elles ne rendent pas compte des variations dynamiques du niveau d'eau aux extrémités des canaux ni de la décrue en régime d'écoulement non permanent, ce qui entraîne des apports inefficaces et des pertes d'eau en aval. Cet article propose une méthode couplant la programmation macroscopique des réservoirs à une simulation hydrodynamique microscopique. Premièrement, à partir de données de télédétection et d'altitude, le niveau d'eau effectif minimal nécessaire à l'écoulement gravitaire à l'extrémité de chaque canal principal est déterminé. Une formule de Manning améliorée permet de calculer en retour la borne inférieure du débit minimal d'alimentation et le seuil de préstockage, qui constituent les contraintes minimales Deuxièmement, un modèle de programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP), visant à réduire au minimum le volume total lâché, la durée d'acheminement et le nombre

1 Nanjing Hydraulic Research Institute, Rural Water Conservancy Research Institute, Nanjing, China, Email: zjmai@nhri.cn

2 Wuhan University, Wuhan, China Email: 437153280@qq.com

de manœuvres des vannes, est construit afin d'obtenir les hydrogrammes de lâcher des réservoirs et de dérivation dans les canaux. Ceux-ci servent de conditions aux limites amont des équations unidimensionnelles (1D) de Saint-Venant en régime non permanent, résolues par le schéma implicite de Preissmann. La condition limite aval s'ajuste dynamiquement en fonction de la comparaison, en temps réel, entre la profondeur à l'extrémité du canal et le niveau d'eau effectif. L'apport effectif net est ensuite intégré. L'écart maximal entre l'apport effectif net et la demande cible sert de critère de convergence; à défaut, un taux d'apprentissage amorti corrige la cible macroscopique et pilote l'itération macro–micro. Une étude de cas menée dans la province du Hubei, en Chine, valide la méthode. Les résultats montrent que, selon différents scénarios de demande, cette méthode optimise la distribution de l'eau, satisfait les exigences d'écoulement gravitaire, réduit les apports inefficaces et les pertes d'eau en aval, raccourcit la durée d'acheminement et diminue le nombre de manœuvres des vannes, résolvant ainsi le problème classique du « volume satisfait, mais niveau insuffisant ».

Mots clés : Programmation optimale du périmètre irrigué; Approvisionnement en eau provenant de sources multiples; Niveau d'eau effectif gravitaire; Programmation linéaire à nombres entiers mixtes; Couplage macro–micro.

EVALUATING STAKEHOLDER COMMUNICATION AND ADAPTIVE WATER GOVERNANCE IN FARM LEVEL IRRIGATION AREA

ÉVALUATION DE LA COMMUNICATION AVEC LES PARTIES PRENANTES ET DE LA GOUVERNANCE ADAPTATIVE DE L'EAU DANS UNE ZONE IRRIGUÉE À L'ÉCHELLE DES EXPLOITATIONS AGRICOLES

Tsu-Chuan Lee[1] and Paul Abudulai Yelinje[2]

ABSTRACT

The management of water resources in Taiwan has recently focused on various aspects of water policy, including reservoir planning and renewal activation, alternative water resources planning, and smart water management. The Water Resources Agency has implemented several projects to improve water supplies to provide sustainable water use. For water resources to be effectively managed in the future, water agencies will need to work with local-level people to confront water resource challenges. This study focuses on a specific emphasis on the Wufenggang River and Zhoumei irrigation areas. By evaluating agricultural irrigation adaptation under climate change scenarios, this research investigates how localized public participation can build sustainable resilience. Climate change increasingly threatens the stability of water resource utilization, necessitating enhanced resilience and adaptive capacities within agricultural irrigation systems. In Taiwan, water management has transitioned toward a multifaceted policy approach—incorporating reservoir renewal, smart management, and alternative resource planning—to ensure sustainable supplies. The water resources agency has implemented several projects to improve water supplies to provide sustainable water use. For water resources to be effectively managed in the future, water agencies will need to work with local people to confront water resource challenges. Central to this evolution is the recognition that technical solutions must be paired with local engagement to confront emerging water scarcity challenges. This study focuses on the irrigation management office's jurisdiction, specifically the irrigation areas, to explore how socio-hydrological feedback loops and diverse communication strategies can strengthen water governance. Socio-hydrology provides a critical framework for understanding the evolution of human and water systems, advocating for research that enhances social adaptive capacity through the quantification of feedbacks between society and water resources. By evaluating agricultural irrigation adaptation under climate change scenarios, this research investigates how localized public participation can build sustainable resilience.

Keywords: Stakeholder communication; Adaptive water governance; Water resources; Sustainable water use; Public participation.

RÉSUMÉ

À Taïwan, la gestion des ressources en eau s'est récemment concentrée sur plusieurs volets de la politique de l'eau, notamment la planification et la revitalisation des réservoirs, la planification de ressources en eau alternatives et la gestion intelligente de l'eau. L'Agence des ressources en eau a mis en œuvre plusieurs projets destinés à améliorer l'approvisionnement en eau et à assurer une utilisation durable de cette ressource. Pour que les ressources en eau puissent être gérées efficacement à l'avenir,

1 Taiwan International Institute for Water Education, Rm. 425, No. 130, Sec. 3, Keelung Road, Taipei106, Taiwan (R.O.C.)., Email: tsuchuan.tiiwe@gmail.com

2 International Doctoral Program in Agriculture/Nature-based Solutions Research Center, National Chung Hsing University, Taiwan, No. 145 Xingda Rd., South Dist., Taichung City 402, Taiwan (R.O.C.).

les organismes compétents devront collaborer avec les acteurs locaux afin de relever les défis liés à l'eau. Cette étude porte plus particulièrement sur la rivière Wufenggang et les zones irriguées de Zhoumei. En évaluant l'adaptation de l'irrigation agricole selon des scénarios de changement climatique, cette recherche examine comment la participation du public à l'échelle locale peut renforcer une résilience durable. Le changement climatique menace de plus en plus la stabilité de l'utilisation des ressources en eau, ce qui impose de renforcer la résilience et les capacités d'adaptation des systèmes d'irrigation agricole. À Taïwan, la gestion de l'eau a évolué vers une approche politique multidimensionnelle, intégrant la revitalisation des réservoirs, la gestion intelligente et la planification de ressources alternatives, afin de garantir un approvisionnement durable. L'Agence des ressources en eau a mis en œuvre plusieurs projets destinés à améliorer l'approvisionnement en eau et à assurer une utilisation durable de cette ressource. Pour que les ressources en eau puissent être gérées efficacement à l'avenir, les organismes compétents devront collaborer avec les populations locales afin de relever les défis liés à l'eau. Au cœur de cette évolution se trouve la reconnaissance du fait que les solutions techniques doivent s'accompagner d'une mobilisation locale pour faire face aux nouveaux risques de pénurie d'eau. Cette étude se concentre sur le territoire de compétence du bureau de gestion de l'irrigation, et plus précisément sur les zones irriguées, afin d'examiner comment les boucles de rétroaction sociohydrologiques et diverses stratégies de communication peuvent renforcer la gouvernance de l'eau. La sociohydrologie fournit un cadre essentiel pour comprendre l'évolution conjointe des sociétés et des systèmes hydriques ; elle préconise des recherches qui renforcent la capacité d'adaptation sociale grâce à la quantification des rétroactions entre la société et les ressources en eau. En évaluant l'adaptation de l'irrigation agricole selon des scénarios de changement climatique, cette recherche examine comment la participation du public à l'échelle locale peut renforcer une résilience durable.

Mots clés : Communication avec les parties prenantes; Gouvernance adaptative de l'eau; Ressources en eau; Utilisation durable de l'eau; Participation pubique.

CORN GROWING PRACTICES ON CLAY SOILS UNDER DRIP IRRIGATION IN THE STEPPE ZONE OF UKRAINE

PRATIQUES DE CULTURE DU MAÏS SUR SOLS ARGILEUX SOUS IRRIGATION GOUTTE À GOUTTE DANS LA ZONE STEPPIQUE DE L'UKRAINE

M. Romashchenko[1], V. Bohaienko[2], R. Saidak[3], M. Fedko[4], T. Matiash[5] and V. Knysh[6]

ABSTRACT

Field experiments evaluating the effectiveness of surface and subsurface drip irrigation of corn were conducted on clay soils in the Steppe zone of Ukraine under increasing natural moisture deficit. The studied soils have low nitrogen availability, a narrow range of moisture available to plants (90–100% of field capacity), and hydraulic conductivity at −3 kPa below 1.9 cm/day. These properties make crops highly sensitive to suboptimal moisture conditions and necessitate the use of capillary potential to regulate irrigation within the available moisture range. During three years of research several values of pre-irrigation threshold (−20, −40, and −60 kPa) and fertilizer application were studied. It was determined that at the threshold of −40 and −60 kPa, plants failed to compensate for water deficits under frequent atmospheric droughts in the studied conditions. The highest yields were obtained at a pre-irrigation threshold of −20 kPa. Regarding fertilization, with a pre-sowing application of N55.5P25.5K25.5 kg/ha of active substances, treatments included no additional fertilizer application and supplemental fertigation of N80.5P0K44.2, N128.3P1.8K90.2, and N202.9P18.9K161.9 kg/ha of active substances. Yields increased from 9.42 t/ha without additional fertilization to 11.24 t/ha at maximum application, with a correlation coefficient for the dependency between yield and fertigation amount equal to 0.79. Our results confirm the high efficiency of drip irrigation and the applicability of capillary potential for determining irrigation rates and schedules in the studied conditions. However, with high frequency of atmospheric droughts, on clay soils drip irrigation cannot maintain the evapotranspiration required to achieve potential hybrid productivity, primarily due to the inability to form a favorable near-surface air microclimate, which also reduces nutrient use efficiency.

Keywords: drip irrigation; fertigation; corn; clay soils; Ukraine.

RÉSUMÉ

Des essais au champ visant à évaluer l'efficacité de l'irrigation goutte à goutte de surface et souterraine du maïs ont été menés sur des sols argileux de la zone steppique de l'Ukraine, dans un contexte d'accentuation du déficit hydrique naturel. Les sols étudiés présentent une faible disponibilité en azote, une plage étroite d'humidité disponible pour les plantes (90 à 100 % de la capacité au champ) et une conductivité hydraulique à −3 kPa inférieure à 1,9 cm/jour. Ces propriétés rendent les cultures très sensibles aux conditions d'humidité sous-optimales et imposent l'utilisation du potentiel capillaire pour réguler l'irrigation dans la plage d'humidité disponible. Au cours de trois années de recherche, plusieurs valeurs du seuil de

1 Main Researcher, Institute of Water Problems and Land Reclamation, Ukraine, mi.romashchenko@gmail.com
2 Head of Laboratory, VM Glushkov Institute of Cybernetics of NAS of Ukraine, Ukraine, sevab@ukr.net
3 Head of department, Institute of Water Problems and Land Reclamation, Ukraine, saidak_r@ukr.net
4 Scientific and Production Farming Enterprise Company MAIS
5 Head of Deptt., Institute of Water Problems and Land Reclamation, Ukraine, t.v.matiash@gmail.com
6 Senior researcher, Institute of Water Problems and Land Reclamation, Ukraine, iwpim27@gmail.com

déclenchement de l'irrigation (−20, −40 et −60 kPa) et plusieurs niveaux de fertilisation ont été étudiés. Il a été établi qu'aux seuils de −40 et −60 kPa, les plantes ne parvenaient pas à compenser les déficits hydriques dans les conditions étudiées, en raison de sécheresses atmosphériques fréquentes. Les rendements les plus élevés ont été obtenus avec un seuil de déclenchement de −20 kPa. Concernant la fertilisation, après une application avant semis de N55,5P25,5K25,5 kg/ha de substances actives, les traitements comprenaient l'absence d'apport supplémentaire et une fertigation complémentaire de N80,5P0K44,2, N128,3P1,8K90,2 et N202,9P18,9K161,9 kg/ha de substances actives. Les rendements sont passés de 9,42 t/ha sans fertilisation supplémentaire à 11,24 t/ha avec l'apport maximal, avec un coefficient de corrélation de 0,79 entre le rendement et la quantité appliquée par fertigation. Nos résultats confirment la grande efficacité de l'irrigation goutte à goutte et la possibilité d'utiliser le potentiel capillaire pour déterminer les doses et les calendriers d'irrigation dans les conditions étudiées. Toutefois, lorsque les sécheresses atmosphériques sont fréquentes, l'irrigation goutte à goutte ne peut pas maintenir, sur les sols argileux, l'évapotranspiration nécessaire pour atteindre le potentiel de rendement des hybrides, principalement en raison de l'impossibilité de créer un microclimat atmosphérique favorable près de la surface, ce qui réduit également l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs.

Mots clés: Irrigation goutte à goutte; Fertigation, Maïs; Sols argileux; Ukraine.

EARTH OBSERVATION AND SMART METERING TO SPATIALIZE AGRICULTURAL WATER USES IN MEDITERRANEAN CONTEXT

OBSERVATION DE LA TERRE ET COMPTAGE INTELLIGENT POUR SPATIALISER LES USAGES AGRICOLES DE L'EAU EN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN

Mamadou Diarra[1], Arnaud T. Ouedraogo[1], Julien Lecollinet[1] and Nicolas Urruty[1]

ABSTRACT

Mediterranean irrigated agriculture is increasingly exposed to recurrent drought, high evaporative demand and growing competition for water resources. Managing the irrigation systems delivering these precious resources needs new ways of innovation to ensure resilience. In the Provence-Alpes-Cote d'Azur; South region of south-eastern France, water volumes delivered to farms are accurately recorded at irrigation hydrants, but their spatial allocation to irrigated plots and crop types remains difficult. This paper presents the IAGO-ASICs framework, an operational approach designed to spatialize agricultural water uses by combining Earth Observation, in situ measurements and smart-metered consumption data. IAGO produces seasonal land-use and irrigated-area maps from Sentinel-1 and Sentinel-2 time series using Random Forest classification supported by field observations. ASICs then integrates these products with precipitation, OPTRAM-derived surface soil moisture from Sentinel-2 and Landsat 8/9, and REImu smart-meter records to detect irrigation events, identify plausible hydrant-parcel connections and allocate consumed volumes to active irrigated surfaces. By merging Earth Observation outputs with hydrant-level water consumption records, the framework also provides valuable reference information that helps validate and reinforce the quality and reliability of irrigation mapping. Application to a service area ranging over 80,000 ha managed by the Societe du Canal de Provence shows that the framework provides consistent land-use mapping, irrigation detection and operational indicators such as total irrigated area, volume per hectare and crop-specific water demand. The approach supports collective irrigation management by transforming measured volumes into spatially explicit information that can guide planning, monitoring and adaptation under increasing climate constraints.

Keywords: Earth Observation; irrigation mapping; smart metering; soil moisture; OPTRAM; water governance.

RÉSUMÉ

L'agriculture irriguée méditerranéenne est de plus en plus exposée aux sécheresses récurrentes, à une forte demande évaporative et à une concurrence croissante pour les ressources en eau. La gestion des systèmes d'irrigation qui distribuent ces précieuses ressources nécessite de nouvelles approches innovantes afin de garantir leur résilience. Dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, dans le sud-est de la France, les volumes d'eau fournis aux exploitations sont enregistrés avec précision au niveau des bornes d'irrigation, mais leur affectation spatiale aux parcelles irriguées et aux types de cultures reste difficile. Cet article présente le cadre IAGO-ASICs, une approche opérationnelle conçue pour spatialiser les usages agricoles de l'eau en combinant l'observation de la Terre, des mesures in situ et des données de consommation issues de compteurs intelligents. IAGO produit des cartes

1 Société du Canal de Provence, Le Tholonet, CS 70064, 13182 Aix-en-Provence CEDEX 5, France. Email: mamadou.diarra@canal-de-provence.com

saisonnières de l'occupation du sol et des surfaces irriguées à partir de séries temporelles Sentinel-1 et Sentinel-2, au moyen d'une classification par forêts aléatoires étayée par des observations de terrain. ASICs intègre ensuite ces produits aux précipitations, à l'humidité superficielle du sol dérivée d'OPTRAM à partir des données Sentinel-2 et Landsat 8/9, ainsi qu'aux relevés des compteurs intelligents REImu, afin de détecter les épisodes d'irrigation, d'identifier les raccordements plausibles entre bornes et parcelles et d'affecter les volumes consommés aux surfaces irriguées actives. En fusionnant les résultats de l'observation de la Terre avec les relevés de consommation d'eau au niveau des bornes, le cadre fournit également de précieuses informations de référence qui contribuent à valider et à renforcer la qualité et la fiabilité de la cartographie de l'irrigation. Son application à une zone de desserte de plus de 80 000 ha gérée par la Société du Canal de Provence montre que le cadre fournit une cartographie cohérente de l'occupation du sol, une détection fiable de l'irrigation et des indicateurs opérationnels tels que la superficie irriguée totale, le volume par hectare et les besoins en eau propres à chaque culture. Cette approche soutient la gestion collective de l'irrigation en transformant les volumes mesurés en informations spatialement explicites susceptibles d'orienter la planification, le suivi et l'adaptation face à des contraintes climatiques croissantes.

Mots clés : Observation de la terre; Cartographie de l'irrigation; Comptage intelligent; Humidité du sol; OPTRAM; Gouvernance de l'eau.

A PLUG-AND-PLAY IRRIGATION MANAGEMENT SYSTEM BASED ON HYDRAULIC NETWORK MODELLING: TECHNICAL, OPERATIONAL AND ECONOMIC IMPACTS

UN SYSTÈME DE GESTION DE L'IRRIGATION PRÊT À L'EMPLOI FONDÉ SUR LA MODÉLISATION DES RÉSEAUX HYDRAULIQUES : IMPACTS TECHNIQUES, OPÉRATIONNELS ET ÉCONOMIQUES

S. Demech[1]

ABSTRACT

Agricultural irrigation management is facing increasing challenges related to water scarcity, rising energy costs and the growing complexity of irrigation networks. In many agricultural contexts, irrigation systems consist of heterogeneous infrastructures combining pumps, valves, pivots, drip irrigation, fertigation units and multiple sensor technologies. Despite this level of equipment, irrigation is still frequently managed empirically, with limited visibility on the actual hydraulic behaviour of the network. This lack of understanding often results in water losses, excessive energy consumption, uneven water distribution and delayed corrective interventions.

This paper presents an Irrigation Management System (IMS) based on dynamic hydraulic modelling of irrigation networks combined with real-time field data integration. The system is designed as a plug-and-play solution compatible with existing infrastructures. A hydraulic digital twin is used to simulate and monitor network performance. Field deployments across multiple regions demonstrate water savings of 10–25%, energy savings of 10–20%, and a return on investment within 12 to 18 months. The system also improves operational management of field teams, increasing responsiveness and irrigation reliability.

Keywords: Agricultural irrigation management; Water scarcity; Rising energy costs; Corrective interventions; Irrigation reliability.

RÉSUMÉ

La gestion de l'irrigation agricole est confrontée à des difficultés croissantes liées à la rareté de l'eau, à la hausse des coûts énergétiques et à la complexité grandissante des réseaux d'irrigation. Dans de nombreux contextes agricoles, les systèmes d'irrigation reposent sur des infrastructures hétérogènes combinant pompes, vannes, pivots, irrigation goutte à goutte, unités de fertigation et diverses technologies de capteurs. Malgré ce niveau d'équipement, l'irrigation reste souvent gérée de manière empirique, avec une visibilité limitée sur le comportement hydraulique réel du réseau. Cette méconnaissance entraîne fréquemment des pertes d'eau, une consommation énergétique excessive, une répartition inégale de l'eau et des interventions correctives tardives.

Cet article présente un système de gestion de l'irrigation (IMS) fondé sur la modélisation hydraulique dynamique des réseaux d'irrigation, combinée à l'intégration de données de terrain en temps réel. Le système est conçu comme une solution prête à l'emploi, compatible avec les infrastructures existantes. Un jumeau numérique hydraulique est utilisé pour simuler et surveiller les performances du réseau. Des déploiements sur le terrain dans plusieurs régions montrent des économies d'eau de 10 à 25 %, des économies d'énergie de 10 à 20 % et un retour sur investissement en 12 à 18 mois. Le système améliore également la gestion opérationnelle des équipes de terrain, en renforçant leur réactivité et la fiabilité de l'irrigation.

Mots clés : Gestion de l'irrigation agricole; Rareté de l'eau; Hausse des coûts énergétiques; Interventions correctives; Fiabilité de l'irrigation.

1 Telaqua, Marseille, France, Email: sebastien.demech@telaqua.com

GHG EMISSIONS, WATER PRODUCTIVITY AND YIELD PATTERNS IN THE RICE–WHEAT PRODUCTION SYSTEM OF PUNJAB, PAKISTAN

ÉMISSIONS DE GES, PRODUCTIVITÉ DE L'EAU ET PROFILS DE RENDEMENT DANS LE SYSTÈME DE PRODUCTION RIZ–BLÉ DU PENDJAB, AU PAKISTAN

Dr. Abdul Qayyum[1], and Dr. Mirza Waseem Abbas[2]

ABSTRACT

Using Crop Reporting Service (CRS) datasets for 2024–25, this study evaluates greenhouse gas (GHG) emissions, water productivity and yield performance in Punjab's rice–wheat production system. GHG emissions were estimated using the IPCC Tier I methodology. Rice was identified as the largest agricultural emitter (6.839 million t CO2-eq) because of flooded irrigation practices, while wheat contributed 2.985 million t CO2-eq despite occupying the largest cultivated area. Water productivity analysis showed that rice, cotton and sugarcane exert substantial pressure on groundwater resources, whereas maize, pulses, potatoes and fodder crops demonstrated higher water-use efficiency. The study highlights the value of CRS area-frame sampling, digital surveys and crop-cut experiments for climate reporting and agricultural planning. Results support crop diversification, water-efficient irrigation and climate-smart agricultural policies in Punjab.

Keywords: Water productivity; Yield patterns; Rice–wheat production system; Digital surveys; Climate-smart agricultural policies.

RÉSUMÉ

À partir des jeux de données du Crop Reporting Service (CRS) pour 2024–2025, cette étude évalue les émissions de gaz à effet de serre (GES), la productivité de l'eau et les performances de rendement dans le système de production riz–blé du Pendjab. Les émissions de GES ont été estimées selon la méthodologie de niveau 1 du GIEC. Le riz a été identifié comme la principale source d'émissions agricoles (6,839 millions de t éq. CO□) en raison des pratiques d'irrigation par submersion, tandis que le blé a contribué à hauteur de 2,985 millions de t éq. CO□, bien qu'il occupe la plus grande superficie cultivée. L'analyse de la productivité de l'eau a montré que le riz, le coton et la canne à sucre exercent une forte pression sur les ressources en eaux souterraines, tandis que le maïs, les légumineuses à graines, la pomme de terre et les cultures fourragères présentent une meilleure efficience d'utilisation de l'eau. L'étude souligne l'intérêt de l'échantillonnage sur base aréolaire, des enquêtes numériques et des expériences de coupe des récoltes réalisés par le CRS pour l'établissement de rapports climatiques et la planification agricole. Les résultats plaident en faveur de la diversification des cultures, d'une irrigation économe en eau et de politiques d'agriculture intelligente face au climat au Pendjab.

Mots clés : Productivité de l'eau; Profils de rendement; Système de production riz–blé; Enquêtes numériques; Politiques d'agriculture intelligente face au climat.

1 Director General, Crop Reporting Service, Agriculture Department, Government of the Punjab, Pakistan.
2 Deputy Director, Crop Reporting Service, Agriculture Department, Government of the Punjab, Pakistan. Email: wazeem.mirza@gmail.com

USING HIGH-RESOLUTION ORTHOIMAGE FOR UPDATING AND OVERLAYING AGRICULTURAL CANAL GEOSPATIAL DATA

UTILISATION D'ORTHOIMAGES À HAUTE RÉSOLUTION POUR METTRE À JOUR ET SUPERPOSER LES DONNÉES GÉOSPATIALES DES CANAUX AGRICOLES

C. Wijaya[1], H.-Y. Shih[1], Z.-Y. Lee[1] and H.-H. Chan[1]

ABSTRACT

Since the 1990s, the Irrigation Agency in Taiwan has developed GIS maps for agricultural canals. However, early GPS interference and low-resolution aerial imagery caused significant positioning errors between GIS cadastral maps and actual facility locations. To address this, modern Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are utilized to generate high-resolution orthoimages, enabling the correction of route alignments and canal hierarchy relationships in GIS maps.

A crucial application of these updates is supporting the policy of "compensation for the continued use of agricultural facilities land use". UAV high-resolution orthoimages allow the conversion of old data from a polyline format to a polygon format, accurately reflecting the actual width and flow direction of the canals. Once established, this foundational data is overlaid and cross-referenced with cadastral maps and land ownership registries. This generates an accurate inventory of occupied land areas, lot numbers, and ownership details, serving as the basis for official boundary surveys and formal compensation.

Producing 1,000-hectare orthoimages with a Ground Sampling Distance (GSD) of approximately 5 cm takes only about 4 days, demonstrating the rapid acquisition of current-state data. This comprehensive inventory allows management to prioritize compensation based on land use zoning, ownership, and announced land values. Consequently, funds can be raised and compensation plans formulated in advance, thereby accelerating and effectively implementing the continued use policy.

Keywords: Agricultural canals; Unmanned Aerial Vehicles (UAVs); Inventaire précis; High-resolution orthoimages; Land values.

RÉSUMÉ

Depuis les années 1990, l'Agence de l'irrigation de Taïwan élabore des cartes SIG des canaux agricoles. Toutefois, les perturbations affectant les premiers systèmes GPS et la faible résolution des images aériennes ont entraîné d'importantes erreurs de positionnement entre les plans cadastraux du SIG et l'emplacement réel des ouvrages. Pour remédier à ce problème, des véhicules aériens sans pilote (UAV) modernes sont utilisés afin de produire des orthoimages à haute résolution, permettant de corriger l'alignement des tracés et les relations hiérarchiques entre les canaux dans les cartes SIG.

L'une des principales applications de ces mises à jour consiste à soutenir la politique d'« indemnisation pour la poursuite de l'utilisation des terrains occupés par les ouvrages agricoles ». Les orthoimages à haute résolution acquises par UAV permettent de convertir les anciennes données d'un format polyligne en un format polygonal, afin de représenter avec précision la largeur réelle et le sens d'écoulement des canaux. Une fois constituées, ces données

1 Agricultural Engineering Research Center, No. 196-1, Zhongyuan Rd., Zhongli Dist., Taoyuan City 32061, Taiwan. E-mail: rbhung@aerc.org.tw, isacyen@aerc.org.tw, zylee@aerc.org.tw

de référence sont superposées et recoupées avec les plans cadastraux et les registres de propriété foncière. Elles permettent de dresser un inventaire précis des superficies occupées, des numéros de parcelles et des informations relatives aux propriétaires, qui sert de base aux levés officiels des limites et aux procédures formelles d'indemnisation.

La production d'orthoimages couvrant 1 000 hectares, avec une distance d'échantillonnage au sol (GSD) d'environ 5 cm, ne prend qu'environ 4 jours, ce qui démontre la rapidité d'acquisition des données sur l'état actuel. Cet inventaire complet permet aux gestionnaires de hiérarchiser les indemnisations en fonction du zonage de l'utilisation des sols, du régime de propriété et des valeurs foncières publiées. Les fonds peuvent ainsi être mobilisés et les plans d'indemnisation préparés à l'avance, ce qui accélère et facilite la mise en œuvre effective de la politique de poursuite de l'utilisation.

Mots clés : Canaux agricoles; Véhicules aériens sans pilote (UAV); Inventaire précis; Orthoimages à haute résolution; Valeurs foncières.

10 YEARS OF USING PLANT SENSORS TO MANAGE WATER CYCLE OF MEDITERRANEAN CROPS

DIX ANS D'UTILISATION DE CAPTEURS SUR LES PLANTES POUR PILOTER LE CYCLE HYDRIQUE DES CULTURES MÉDITERRANÉENNES

J. Beraud. J. Girard, F. Bustamante and JV. Heckenroth[1] , T. Scholasch and C. Laurent[2]

ABSTRACT

Since the 1960s, the expansion of the Canal de Provence network has been accompanied by support for irrigating farmers: equipment, advice, irrigation management, and automation. The SCP's teams of agronomists and soil scientists have been active on all fronts, particularly in the regional rollout of tensiometry during the 1980s and 1990s.

The 2010s marked a turning point. With the development of digital tools, continuous measurement sensors—particularly plant sensors—have enabled us to take agronomic expertise and consulting to the next level.

- Two "real-time" plant sensors are commonly used by SCP teams:
- The dendrometer, which measures a plant's growth status through microvariations in a twig's diameter
- The sap flow sensor, which assesses water consumption based on the speed of sap flow

This data, collected continuously, is uploaded to the SCP Agridata digital platform—developed in collaboration with Fruition Sciences—for analysis and interpretation. Fruition Sciences bases its tools and expertise on the conviction that the plant itself is the best indicator of water needs: its condition effectively reflects all the physical and biological constraints of the agricultural plot, including the soil.

Through three examples of projects carried out with regional agricultural organizations and producers, we will highlight how the results obtained are helping to advance agricultural practices.

1. Revitalizing diversified Mediterranean agricultural production: the Provence pistachio
2. Assessing the impact of cultivation practices on a crop's water cycle: the grapevine
3. Irrigation management for a flagship crop of the Southern Alps: the apple

Compared to traditional management using similar irrigation equipment (in this case, surface drip irrigation), the observed water savings can be in the range of 20 to 25% Today, the context of climate change and strong societal expectations make water sharing and conservation more essential than ever. In Provence, as elsewhere, the role of agronomists in crop water management shows no signs of waning.

Keywords: Plant sensors; Water cycle; Mediterranean crops; Digital tools; Agricultural practices; Irrigation equipment.

1 SCP - Société du canal de Provence et d'Aménagement de la région provençale, Le Tholonet - CS 70064 - 13182 Aix-en-Provence CEDEX 5 – France Email: jacques.beraud@canal-de-provence.com

2 Fruition Sciences, SAS. MIBI 672 rue du Mas de Verchant 34000 Montpellier Email: thibaut@fruitionsciences.com

RÉSUMÉ

Depuis les années 1960, l'expansion du réseau du Canal de Provence s'est accompagnée d'un soutien aux agriculteurs irrigants : équipements, conseils, gestion de l'irrigation et automatisation. Les équipes d'agronomes et de pédologues de la SCP ont été actives sur tous les fronts, notamment lors du déploiement régional de la tensiométrie dans les années 1980 et 1990.

Les années 2010 ont marqué un tournant. Avec le développement des outils numériques, les capteurs de mesure continue, en particulier les capteurs sur les plantes, nous ont permis de porter l'expertise et le conseil agronomiques à un niveau supérieur.

- Deux capteurs sur les plantes « en temps réel » sont couramment utilisés par les équipes de la SCP :
- Le dendromètre, qui mesure l'état de croissance d'une plante à partir des microvariations du diamètre d'un rameau
- Le capteur de flux de sève, qui évalue la consommation d'eau en fonction de la vitesse de circulation de la sève

Ces données, recueillies en continu, sont transmises à la plateforme numérique SCP Agridata, développée en collaboration avec Fruition Sciences, afin d'être analysées et interprétées. Fruition Sciences fonde ses outils et son expertise sur la conviction que la plante elle-même constitue le meilleur indicateur des besoins en eau : son état reflète en effet l'ensemble des contraintes physiques et biologiques de la parcelle agricole, y compris celles liées au sol.

À travers trois exemples de projets menés avec des organisations agricoles régionales et des producteurs, nous montrerons comment les résultats obtenus contribuent à faire évoluer les pratiques agricoles.

1. Revitaliser une production agricole méditerranéenne diversifiée : la pistache de Provence
2. Évaluer l'incidence des pratiques culturales sur le cycle hydrique d'une culture : la vigne
3. Gérer l'irrigation d'une culture phare des Alpes du Sud : la pomme

Par rapport à une gestion traditionnelle utilisant un équipement d'irrigation comparable, en l'occurrence une irrigation goutte à goutte de surface, les économies d'eau observées peuvent atteindre 20 à 25%.

Aujourd'hui, le changement climatique et les fortes attentes de la société rendent le partage et la préservation de l'eau plus essentiels que jamais. En Provence comme ailleurs, le rôle des agronomes dans la gestion de l'eau destinée aux cultures ne montre aucun signe de recul.

Mots clés : Capteurs sur les plantes; Cycle hydrique; Cultures méditerranéennes; Outils numériques; Pratiques agricoles; Equipement d'irrigation.

ASSESSING DRY SEEDING AND DELAYED FLOODING IN RICE USING REMOTE SENSING IN THE LOWER MONDEGO VALLEY, PORTUGAL

ÉVALUATION DU SEMIS À SEC ET DE LA MISE EN EAU DIFFÉRÉE DU RIZ PAR TÉLÉDÉTECTION DANS LA BASSE VALLÉE DU MONDEGO, AU PORTUGAL

Diana Valente[1], Susana Ferreira[2], José Manuel Gonçalves[3], and Juan Manuel Sánchez[4]

ABSTRACT

Rice cultivation in the Lower Mondego Valley (LMV), Portugal, has traditionally relied on wet sowing with continuous flooding (WFL). Although improvements in land levelling have contributed to water savings, conventional rice production systems still face important challenges related to irrigation water use, energy consumption, production costs, and weed management. Dry seeding with delayed flooding (DFL) has emerged as a promising alternative management strategy with the potential to improve irrigation efficiency and reduce environmental impacts. An experimental study was conducted during the 2022–2025 rice growing seasons in farmers' fields located in the LMV to evaluate the agronomic and hydraulic performance of DFL under Mediterranean conditions. Conventional WFL plots were used as references. The study integrated field monitoring, meteorological observations, water balance calculations, and remote sensing (RS) techniques based on Sentinel-2 and Landsat imagery. Time series of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), processed using the SPIDERwebGIS© platform (University of Castilla-La Mancha, Spain), were used to assess crop development under different irrigation systems. The results showed that DFL reduced irrigation water application and flooding periods compared with WFL management, while maintaining comparable seasonal crop development and similar grain yield. NDVI temporal profiles revealed slower vegetation development during the initial crop stages under DFL conditions due to delayed flooding, followed by rapid canopy recovery after flooding establishment. Maximum NDVI values during mid-season were similar under both irrigation systems, indicating comparable vegetation vigor. Overall, the integration of field measurements and remote sensing techniques provided valuable information for evaluating crop dynamics, irrigation performance, and water use under contrasting rice management systems. The results support the potential adoption of DFL as a more sustainable rice production strategy for Mediterranean rice-growing regions.

Keywords: Dry seeding; Remote sensing; rRice cultivation; Time series; Temporal profiles; Irrigation systems.

RÉSUMÉ

Dans la basse vallée du Mondego (LMV), au Portugal, la riziculture repose traditionnellement sur le semis en conditions humides avec submersion continue (WFL). Bien que l'amélioration du nivellement des terres ait contribué à économiser l'eau, les systèmes rizicoles

1 PhD Student, Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), Spain, Diana.Margarida1@alu.uclm.es; Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior Agrária (IPC-ESAC)
2 Senior Researcher, INIAV – Alcobaça Research Centre, Portugal, susana.ferreira@iniav.pt;
3 Full Professor, Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior Agrária (IPC-ESAC), CERNAS Research Center, Coimbra, Portugal, jmmg@esac.pt;
4 Full Professor, Remote Sensing and GIS group, Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), Albacete, Spain, JuanManuel.Sanchez@uclm.es

conventionnels restent confrontés à d'importants défis liés à l'utilisation de l'eau d'irrigation, à la consommation d'énergie, aux coûts de production et à la gestion des adventices. Le semis à sec avec mise en eau différée (DFL) est apparu comme une stratégie de gestion alternative prometteuse, susceptible d'améliorer l'efficience de l'irrigation et de réduire les impacts environnementaux. Une étude expérimentale a été menée pendant les campagnes rizicoles de 2022 à 2025 dans des parcelles d'agriculteurs situées dans la LMV, afin d'évaluer les performances agronomiques et hydrauliques du DFL en conditions méditerranéennes. Des parcelles conventionnelles conduites en WFL ont servi de référence. L'étude a combiné le suivi au champ, les observations météorologiques, les calculs de bilan hydrique et des techniques de télédétection (RS) fondées sur des images Sentinel-2 et Landsat. Des séries chronologiques de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), traitées au moyen de la plateforme SPIDERwebGIS© (Université de Castille-La Manche, Espagne), ont permis d'évaluer le développement de la culture selon les différents systèmes d'irrigation. Les résultats ont montré que le DFL réduisait les apports d'eau d'irrigation et la durée de submersion par rapport à la conduite en WFL, tout en maintenant un développement saisonnier comparable de la culture et un rendement en grains similaire. Les profils temporels du NDVI ont révélé un développement plus lent de la végétation au cours des premiers stades de la culture sous DFL, en raison de la mise en eau différée, suivi d'une reprise rapide du couvert après l'établissement de la submersion. Les valeurs maximales du NDVI à la mi-saison étaient similaires dans les deux systèmes d'irrigation, indiquant une vigueur végétative comparable. Dans l'ensemble, l'intégration des mesures de terrain et des techniques de télédétection a fourni des informations précieuses pour évaluer la dynamique de la culture, les performances de l'irrigation et l'utilisation de l'eau dans des systèmes rizicoles contrastés. Les résultats confirment le potentiel d'adoption du DFL comme stratégie rizicole plus durable dans les régions méditerranéennes productrices de riz.

Mots clés : Semis à sec; T**élédétection;** Riziculture; Séries chronologiques; Systèmes d'irrigation.

FROM EXPERIENCE TO ALGORITHMS: ADAPTIVE GATE OPERATION FOR WATER-SCARCE IRRIGATION DISTRICTS

DE L'EXPÉRIENCE AUX ALGORITHMES: MANŒUVRE ADAPTATIVE DES VANNES DANS LES PÉRIMÈTRES IRRIGUÉS EN SITUATION DE PÉNURIE D'EAU

Ji-Hyeon Shin[1], and Won-Ho Nam[2]

ABSTRACT

Irrigation districts are increasingly exposed to water scarcity, supply variability, and operational uncertainty, making efficient water management difficult under fixed infrastructure and limited supply conditions. In many districts, gate operation and water distribution are still adjusted using experience-driven approaches, which limits systematic comparison of operating alternatives and identification of improved management strategies. Because irrigation performance involves multiple and often conflicting objectives-such as ponding stability, distribution equity, and operational safety-a structured optimization framework is required. This study presents a simulation-based multi-objective optimization framework for irrigation gate operation management in a small-scale irrigation district. An agricultural irrigation network was modeled using EPA-SWMM, constructed from field investigations of canal geometry, elevations, and channel lengths, together with management office records. Measured reservoir supply data provided by the Korea Rural Community Corporation (KRC) were used as boundary inputs. A structured indicator system was defined and applied to simulation outputs, covering ponding deficit characteristics, spatial discharge balance among upstream, midstream, and downstream zones, and gate operation variability. These indicators serve directly as objective functions in the optimization. Gate opening ratios were treated as weekly decision variables for multiple hydraulic control structures. A multi-objective evolutionary algorithm was used to generate a Pareto set of non-dominated operation schedules representing trade-offs among evaluation indicators. A decision-support procedure was then applied to rank Pareto solutions using nonlinear multi-criteria weights linked to water availability regimes, enabling adaptive selection of recommended operation schedules. The proposed framework was applied to the Geumseok irrigation district (55 ha), where optimization-based gate operation reduced all four performance indicators and improved spatial water distribution balance relative to the baseline operation.

Keywords: Adaptive irrigation management; Gate operation optimization; EPA-SWMM; Multi-objective optimization; Irrigation canal network; Water distribution efficiency

RÉSUMÉ

Les périmètres irrigués sont de plus en plus exposés à la rareté de l'eau, à la variabilité de l'approvisionnement et à l'incertitude opérationnelle, ce qui complique la gestion efficace de l'eau lorsque les infrastructures sont fixes et l'approvisionnement limité. Dans de nombreux périmètres, la manœuvre des vannes et la distribution de l'eau sont encore ajustées selon des approches fondées sur l'expérience, ce qui limite la comparaison systématique des différentes options d'exploitation et l'identification de meilleures stratégies de gestion. Comme les performances de l'irrigation reposent sur des objectifs multiples et souvent

1 Ph.D. student, Department of Integrated Systems Engineering, Hankyong National University, Republic of Korea: jihyeon.shin@hknu.ac.kr

2 Professor, School of Social Safety and Systems Engineering, National Agricultural Water Research Center, Hankyong National University, Republic of Korea: wonho.nam@hknu.ac.kr

contradictoires — tels que la stabilité de la lame d'eau, l'équité de la distribution et la sécurité opérationnelle —, un cadre d'optimisation structuré est nécessaire. Cette étude présente un cadre d'optimisation multiobjectif fondé sur la simulation pour gérer la manœuvre des vannes dans un petit périmètre irrigué. Un réseau d'irrigation agricole a été modélisé au moyen d'EPA-SWMM, à partir de relevés de terrain portant sur la géométrie, l'altitude et la longueur des canaux, ainsi que des registres du bureau de gestion. Les données mesurées d'alimentation du réservoir, fournies par la Korea Rural Community Corporation (KRC), ont été utilisées comme données d'entrée aux limites. Un système structuré d'indicateurs a été défini et appliqué aux résultats de la simulation ; il couvre les caractéristiques du déficit de mise en eau, l'équilibre spatial des débits entre les zones amont, médiane et aval, ainsi que la variabilité de la manœuvre des vannes. Ces indicateurs servent directement de fonctions objectifs dans l'optimisation. Les taux d'ouverture des vannes ont été considérés comme des variables de décision hebdomadaires pour plusieurs ouvrages de régulation hydraulique. Un algorithme évolutionnaire multiobjectif a permis de générer un ensemble de Pareto de calendriers de manœuvre non dominés, représentant les compromis entre les indicateurs d'évaluation. Une procédure d'aide à la décision a ensuite été appliquée pour classer les solutions de Pareto au moyen de pondérations multicritères non linéaires liées aux régimes de disponibilité en eau, permettant ainsi de sélectionner de manière adaptative les calendriers de manœuvre recommandés. Le cadre proposé a été appliqué au périmètre irrigué de Geumseok (55 ha), où la manœuvre des vannes fondée sur l'optimisation a réduit les quatre indicateurs de performance et amélioré l'équilibre spatial de la distribution de l'eau par rapport au fonctionnement de référence.

Mots clés : Gestion adaptative de l'irrigation; Optimisation du fonctionnement des vannes; EPA-SWMM; Optimisation multi-objectifs; Réseau de canaux d'irrigation; Efficacité de la distribution d'eau.

EVALUATION OF NOVEL APPLICATIONS OF LOW COST CAPACITIVE SENSORS FOR IRRIGATION MANAGEMENT

ÉVALUATION DE NOUVELLES APPLICATIONS DE CAPTEURS CAPACITIFS À FAIBLE COÛT POUR LA GESTION DE L'IRRIGATION

G. Ingersoll[1], and C. Leauthaud [2],[3]

ABSTRACT

This study investigates the factors which influence the readings of a low cost soil moisture sensor (SN0308, DF robot) as part of an effort to develop a soil moisture protective coating methods sensing system which is low cost and easily deployable for use in irrigation scheduling. Specifically, this study investigates the influence of temperature, bulk density and three on sensor reading. It was found that there is an intrinsic difference between sensors. While the less robust methods of protection did not have an effect on sensor readings, the readings of sensors treated with an epoxy coating method and a 3D printed cap, the most robust protection method tested, were much lower than all other coatings. Lastly, it was found that sensor readings have a negative relationship with bulk density. These elements must be quantified and accounted for in the practical deployment of these sensors.

This study will continue to investigate the following several factors. It will investigate the relative influence of these factors, and the effect they have in combination. It will investigate the long term robustness of these sensors, and the various protective methods employed. It will investigate the response of these sensors to soil moisture. It will investigate the accuracy of various calibration methods and models. Lastly, it will investigate methods of utilizing the uncalibrated values of the sensor for irrigation scheduling (e.g., identifying wetting fronts).

Keywords: Irrigation management; Soil moisture sensor; Protective coating methods; Irrigation scheduling.

RÉSUMÉ

Cette étude examine les facteurs qui influencent les mesures d'un capteur d'humidité du sol à faible coût (SN0308, DFRobot), dans le cadre du développement d'un système de mesure de l'humidité du sol peu coûteux et facile à déployer pour la programmation de l'irrigation. Plus précisément, elle étudie l'influence de la température, de la masse volumique apparente et de trois méthodes de revêtement protecteur sur les mesures du capteur. Une différence intrinsèque entre les capteurs a été mise en évidence. Si les méthodes de protection les moins robustes n'ont pas eu d'effet sur les mesures, celles des capteurs traités par un revêtement époxy et munis d'un capuchon imprimé en 3D — la méthode de protection la plus robuste parmi celles testées — étaient nettement inférieures à celles obtenues avec tous les autres revêtements. Enfin, les mesures du capteur se sont révélées négativement corrélées à la masse volumique apparente. Ces éléments doivent être quantifiés et pris en compte lors du déploiement pratique de ces capteurs.

L'étude se poursuivra par l'examen de plusieurs facteurs. Elle évaluera leur influence relative ainsi que leurs effets combinés, la robustesse à long terme des capteurs et les différentes

1 University of California, Center for Agroecology, Santa Cruz, United States
2 University of California Agriculture and Natural Resources (ANR), Davis, United States
3 University of California, Santa Cruz, Environmental Studies Department, Santa Cruz, United States Corresponding author: C Leauthaud, UC Santa Cruz, Department of Environmental Studies, 1156 High Street, Santa Cruz, CA 95064, USA. e-mail: crystele.leauthaud@cirad.fr

méthodes de protection employées. Elle étudiera également la réponse des capteurs à l'humidité du sol, la précision de diverses méthodes et de différents modèles d'étalonnage, ainsi que les moyens d'utiliser les valeurs non étalonnées des capteurs pour programmer l'irrigation, par exemple en détectant les fronts d'humectation.

Mots clés : Gestion de l'irrigation; Capteur d'humidité du sol; Méthodes de revêtement protecteur; Programmation de l'irrigation.

COST-EFFECTIVE INTEGRATED OPTIMIZATION OF IRRIGATION SCHEDULING AND PRESSURE REGULATION IN PRESSURIZED IRRIGATION NETWORKS UNDER WATER SCARCITY AND VARIABLE SUPPLY CONDITIONS

OPTIMISATION INTÉGRÉE ET RENTABLE DE LA PROGRAMMATION DE L'IRRIGATION ET DE LA RÉGULATION DE LA PRESSION DANS LES RÉSEAUX D'IRRIGATION SOUS PRESSION EN CONDITIONS DE PÉNURIE D'EAU ET D'APPROVISIONNEMENT VARIABLE

Amin Ketabi[1]. and Mohammad Javad Monem[2]

ABSTRACT

Water scarcity and climate variability, intensified by climate change, are increasingly constraining irrigation systems and require adaptive and efficient management strategies at the farm scale. In pressurized irrigation networks, operational adaptations such as reducing water volumes, reducing irrigated areas, modifying cropping patterns, and adjusting water delivery schedules can significantly alter hydraulic behavior, often resulting in undesirable pressure fluctuations that affect system performance and equity.

This study develops an integrated simulation–optimization framework to control pressure fluctuations under such climate-stressed operational conditions. The model simultaneously optimizes irrigation scheduling, pressure reducing valve (PRV) settings, and PRV locations, while also considering the number of valves as a design parameter. EPANET is coupled with a genetic algorithm (GA) implemented in MATLAB to evaluate the interaction between operational decisions and hydraulic performance under variable reservoir water levels.

The proposed approach is applied to a real irrigation network. Results show that operational optimization significantly improves system performance, reducing pressure violations from 15 to 6 delivery points under the existing configuration. By incorporating PRV location optimization, this number is further reduced to only one point, while the objective function decreases to 119 under the most critical reservoir condition. Across different operating scenarios, objective function values of 395, 228, and 119 were obtained, confirming the effectiveness of the proposed framework.

Analysis of the number of PRVs indicates that increasing the number from two to three yields only marginal improvements (about 7–11%), suggesting that optimal placement and operation are more effective than infrastructure expansion.

Overall, the results demonstrate that data-driven simulation–optimization provides a practical and cost-effective decision-support tool for improving hydraulic performance and operational flexibility in water-stressed irrigation systems. The findings further emphasize the necessity of adaptive infrastructure management and re-evaluation of irrigation systems under climate change conditions.

Keywords: Water scarcity; Climate variability; Pressurized irrigation networks; Irrigation scheduling; Climate change conditions.

1 Abanhayat Consulting Engineering Company, Zanjan, Iran, Email: amin.ketabi@gmail.com
2 Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Email: monem_mj@modares.ac.ir

RÉSUMÉ

La rareté de l'eau et la variabilité climatique, accentuées par le changement climatique, imposent des contraintes croissantes aux systèmes d'irrigation et exigent des stratégies de gestion adaptatives et efficaces à l'échelle de l'exploitation. Dans les réseaux d'irrigation sous pression, les adaptations opérationnelles, telles que la réduction des volumes d'eau et des superficies irriguées, la modification des plans de culture et l'ajustement des calendriers de distribution de l'eau, peuvent modifier considérablement le comportement hydraulique et provoquer souvent des fluctuations de pression indésirables qui nuisent aux performances et à l'équité du système.

Cette étude met au point un cadre intégré de simulation-optimisation destiné à maîtriser les fluctuations de pression dans de telles conditions d'exploitation soumises au stress climatique. Le modèle optimise simultanément la programmation de l'irrigation, les réglages et l'emplacement des réducteurs de pression (PRV), tout en considérant également le nombre de vannes comme un paramètre de conception. EPANET est couplé à un algorithme génétique (GA) mis en œuvre dans MATLAB afin d'évaluer l'interaction entre les décisions opérationnelles et les performances hydrauliques lorsque le niveau d'eau du réservoir varie.

L'approche proposée est appliquée à un réseau d'irrigation réel. Les résultats montrent que l'optimisation opérationnelle améliore sensiblement les performances du système, en faisant passer de 15 à 6 le nombre de points de livraison présentant des pressions non conformes dans la configuration existante. L'optimisation de l'emplacement des PRV ramène ensuite ce nombre à un seul point, tandis que la fonction objectif diminue jusqu'à 119 dans la situation la plus critique du réservoir. Pour différents scénarios d'exploitation, les valeurs de la fonction objectif obtenues sont de 395, 228 et 119, ce qui confirme l'efficacité du cadre proposé.

L'analyse du nombre de PRV indique que son passage de deux à trois n'apporte que des améliorations marginales (environ 7 à 11 %), ce qui laisse penser qu'une implantation et une exploitation optimales sont plus efficaces qu'une extension des infrastructures.

Dans l'ensemble, les résultats démontrent que la simulation-optimisation fondée sur les données constitue un outil pratique et rentable d'aide à la décision pour améliorer les performances hydrauliques et la souplesse d'exploitation des systèmes d'irrigation soumis au stress hydrique. Ils soulignent également la nécessité d'une gestion adaptative des infrastructures et d'une réévaluation des systèmes d'irrigation dans le contexte du changement climatique.

Mots clés : Rareté de l'eau; Variabilité climatique; Réseaux d'irrigation sous pression; Programmation de l'irrigation; Contexte du changement climatique.

WATER-SAVING EFFECTS OF INDIVIDUAL VOLUMETRIC WATER CHARGE SYSTEMS IN JAPANESE IRRIGATION DISTRICTS

EFFETS DES SYSTÈMES INDIVIDUELS DE TARIFICATION VOLUMÉTRIQUE DE L'EAU SUR LES ÉCONOMIES D'EAU DANS LES PÉRIMÈTRES IRRIGUÉS JAPONAIS

Miho Hamano[1], Shien Hasebe[1], Atsushi Ishii[1], and Yohei Asada[2]

ABSTRACT

Global water demand is rising owing to population growth and increasing food demand. As agriculture uses the majority of the world's freshwater, improving irrigation water-use efficiency is essential. Volumetric water charge systems (volumetric systems), which charge farmers based on actual water use, are expected to promote efficient water use by internalizing the economic value of water. However, such systems remain limited in large-scale irrigation districts in Japan and many other regions, where area-based water charge systems typically prevail. Consequently, empirical evidence on the volumetric system remains limited. This study examined the water-saving effects of individual volumetric water charge systems (individual volumetric systems) by focusing on the Miyako and Ishigaki irrigation districts in Japan. These areas represent large-scale irrigation districts that have implemented the individual volumetric system, making them highly exceptional cases both internationally and within Japan. By using water consumption data from farm ponds (FPs) in Miyako and reservoir discharge and farm-level water use data in Ishigaki, an analysis was conducted to evaluate changes in irrigation water use following the introduction of the system. The results showed that in the Miyako irrigation district, annual water use decreased by approximately 20–40% in most FPs after implementation, except during the extreme drought year of 2022. Monthly analysis revealed that the strongest water-saving effects occurred in July, when irrigation demand was the highest. In the Ishigaki irrigation district, the estimated average annual water-saving volume was approximately 177 mm. Furthermore, larger farms exhibited greater water-saving behavior, likely due to their increased cost sensitivity under the volumetric system. These findings suggest that individual volumetric systems can effectively promote agricultural water conservation, particularly during peak demand periods and among larger-scale farms.

Keywords: Irrigation districts; Water demand; Volumetric systems; Agricultural water conservation; Larger-scale farms.

RÉSUMÉ

La demande mondiale en eau augmente sous l'effet de la croissance démographique et de la hausse de la demande alimentaire. L'agriculture utilisant la majeure partie de l'eau douce mondiale, il est essentiel d'améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau d'irrigation. Les systèmes de tarification volumétrique de l'eau (systèmes volumétriques), qui facturent les agriculteurs en fonction de leur consommation réelle, devraient favoriser une utilisation efficace de l'eau en internalisant sa valeur économique. Toutefois, ces systèmes restent peu répandus dans les grands périmètres irrigués du Japon et de nombreuses autres régions, où la tarification est généralement fondée sur la superficie. Par conséquent, les données empiriques relatives aux

1 Master's students and a professor, Graduate School of Science and Technology, University of Tsukuba/1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, Japan. Email: s2521052@u.tsukuba.ac.jp s2221042@s.tsukuba.ac.jp, ishii.atsushi.fu@u.tsukuba.ac.jp

2 Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology/3-8-1 Harumicho, Fuchu, Tokyo, Japan. Email: asada1994@go.tuat.ac.jp

systèmes volumétriques demeurent limitées. Cette étude a examiné les effets des systèmes individuels de tarification volumétrique de l'eau (systèmes volumétriques individuels) sur les économies d'eau, en se concentrant sur les périmètres irrigués de Miyako et d'Ishigaki, au Japon. Ces zones sont de grands périmètres irrigués ayant mis en œuvre un système volumétrique individuel, ce qui en fait des cas tout à fait exceptionnels, tant au niveau international qu'au Japon. Une analyse a été menée à partir des données de consommation d'eau des bassins agricoles (FP) de Miyako ainsi que des données de débit des réservoirs et d'utilisation de l'eau à l'échelle des exploitations à Ishigaki, afin d'évaluer l'évolution de l'utilisation de l'eau d'irrigation après l'instauration du système. Les résultats ont montré que, dans le périmètre irrigué de Miyako, l'utilisation annuelle d'eau avait diminué d'environ 20 à 40 % dans la plupart des FP après la mise en œuvre du système, sauf pendant l'année de sécheresse extrême de 2022. L'analyse mensuelle a révélé que les économies d'eau les plus importantes avaient été réalisées en juillet, lorsque la demande d'irrigation était la plus élevée. Dans le périmètre irrigué d'Ishigaki, le volume annuel moyen d'eau économisé a été estimé à environ 177 mm. En outre, les grandes exploitations ont adopté des comportements plus économes en eau, probablement en raison de leur plus grande sensibilité aux coûts dans le cadre du système volumétrique. Ces résultats indiquent que les systèmes volumétriques individuels peuvent favoriser efficacement les économies d'eau en agriculture, en particulier pendant les périodes de pointe de la demande et dans les exploitations de plus grande taille.

Mots clés : P**érimètres irrigués;** Demande en eau; Systèmes volumétriques; Economies d'eau en agriculture; Exploitations de plus grande taille.

SATELLITE-POWERED IRRIGATION INTELLIGENCE: A DECISION-SUPPORT SYSTEM FOR RESILIENT AGRICULTURE

INTELLIGENCE SATELLITAIRE AU SERVICE DE L'IRRIGATION: UN SYSTÈME D'AIDE À LA DÉCISION POUR UNE AGRICULTURE RÉSILIENTE

Ivana Radošević[1], and Damir Matić[2]

ABSTRACT

Climate change is increasing drought risk and water-management pressure in agricultural systems, creating a need for practical tools that support strategic irrigation planning rather than only short-term drought response. This paper presents a satellite-based decision-support system for mapping irrigation suitability in agricultural areas of eastern Croatia. The system was developed as a proof of concept to identify areas where irrigation investments are technically feasible, economically justified and likely to contribute to long-term agricultural resilience.

The methodology integrates Sentinel-2 imagery, terrain data, soil properties, crop-specific parameters and infrastructure information within a Multi-Criteria Analysis framework. Five criteria were used: infrastructure proximity, soil irrigation suitability, slope suitability, Management Allowable Depletion and Vegetation Stress Index. The criteria were normalized to a common suitability scale and weighted using the Analytic Hierarchy Process. The final output is a spatially continuous Irrigation Suitability Map, classified into suitability categories and delivered through a WebGIS platform for visualization, comparison and interpretation by agricultural stakeholders and public authorities.

The analysis covered approximately 150 km² of agricultural land, while validation and interpretation were supported by in situ soil water content measurements collected by FAZOS within a 250 ha test site during the 2025 growing season. Measurements were available for three representative soil types and multiple depths within the active root zone. The comparison showed that soil water content and irrigation suitability describe complementary processes. Soil water content reflects short-term climatic and field conditions, while the suitability map identifies long-term structural potential for irrigation development. The results demonstrate that areas with low soil water content and high irrigation suitability can be considered priority zones for strategic irrigation development. Conversely, areas with low soil water content but low suitability indicate locations where irrigation may be technically difficult, costly or less sustainable. By explicitly distinguishing irrigation need from irrigation suitability, the proposed system supports evidence-based planning and more sustainable allocation of limited water resources.

Keywords: Irrigation suitability, Sentinel-2, multi-criteria analysis, WebGIS, soil water content, resilient agriculture.

RÉSUMÉ

Le changement climatique accroît le risque de sécheresse et la pression sur la gestion de l'eau dans les systèmes agricoles, ce qui crée un besoin d'outils pratiques favorisant une planification stratégique de l'irrigation plutôt qu'une simple réponse à court terme à la sécheresse. Cet article présente un système d'aide à la décision fondé sur les données

1 Earth Observation Project Coordinator, Hidrocibalae, Vinkovci, Croatia, E-mail: ivana.radosevic@hidrocibalae.hr

2 Head of Technology, Hidrocibalae, Vinkovci, Croatia, E-mail: damir.matic@hidrocibalae.hr

satellitaires pour cartographier l'aptitude à l'irrigation dans les zones agricoles de l'est de la Croatie. Le système a été développé comme preuve de concept afin de repérer les zones où les investissements dans l'irrigation sont techniquement réalisables, économiquement justifiés et susceptibles de contribuer à la résilience agricole à long terme.

La méthodologie intègre des images Sentinel-2, des données topographiques, les propriétés des sols, des paramètres propres aux cultures et des informations sur les infrastructures dans un cadre d'analyse multicritère. Cinq critères ont été utilisés : la proximité des infrastructures, l'aptitude des sols à l'irrigation, l'aptitude liée à la pente, le déficit hydrique maximal admissible et l'indice de stress de la végétation. Les critères ont été normalisés sur une échelle commune d'aptitude et pondérés au moyen du processus d'analyse hiérarchique. Le résultat final est une carte spatialement continue de l'aptitude à l'irrigation, répartie en catégories d'aptitude et mise à disposition sur une plateforme WebGIS afin que les acteurs agricoles et les autorités publiques puissent la visualiser, la comparer et l'interpréter.

L'analyse a porté sur environ 150 km² de terres agricoles. Sa validation et son interprétation ont été étayées par des mesures in situ de la teneur en eau du sol, recueillies par FAZOS sur un site d'essai de 250 ha pendant la campagne agricole de 2025. Les mesures étaient disponibles pour trois types de sols représentatifs et à plusieurs profondeurs dans la zone racinaire active. La comparaison a montré que la teneur en eau du sol et l'aptitude à l'irrigation décrivent des processus complémentaires. La teneur en eau du sol reflète les conditions climatiques et parcellaires à court terme, tandis que la carte d'aptitude permet de déterminer le potentiel structurel à long terme pour le développement de l'irrigation.

Les résultats montrent que les zones présentant une faible teneur en eau du sol et une forte aptitude à l'irrigation peuvent être considérées comme prioritaires pour le développement stratégique de l'irrigation. À l'inverse, une faible teneur en eau du sol associée à une faible aptitude signale des zones où l'irrigation pourrait être techniquement difficile, coûteuse ou moins durable. En distinguant explicitement le besoin d'irrigation de l'aptitude à l'irrigation, le système proposé favorise une planification fondée sur des données probantes et une répartition plus durable des ressources en eau limitées.

Mots clés : Aptitude à l'irrigation; Sentinel-2;,Analyse multicritère; WebGIS; Teneur en eau du sol; Agriculture résiliente,

MULTI-SCALE SOIL MOISTURE METROLOGY IN MODELLING TOOLS FOR CLIMATE-RESILIENT AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT

MÉTROLOGIE MULTI-ÉCHELLE DE L'HUMIDITÉ DU SOL DANS LES OUTILS DE MODÉLISATION POUR UNE GESTION DE L'EAU AGRICOLE RÉSILIENTE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

B. Cheviron [1], and R. Cvejić [2]

ABSTRACT

The role played by metrology is a blind spot in the decision-making processes that govern agricultural water management at plot, farm and territorial scales, hence covering both the water abstraction and water allocation strategies. Firmly grounded on fundamental arguments, as knowledge of the elementary biophysical processes, thorough understanding of the principles of measurement, and the absence of any commercial statement, the academic world should provide its operational and institutional partners with insights and recommendations on the contextually relevant technologies and practices. The shared, applied and systemic objectives are to evaluate the environmental fluxes and soil-plant water budget dynamics as well as the effects of errors committed on their determination (missing data, large uncertainties, poor representativeness). Those errors propagate in the decision chains in two different ways. In some cases, decisions stem directly from the measures, e.g. the attainment of an irrigation-triggering soil moisture content. In other cases, decisions are taken from the results of models previously fitted against datasets of insufficient quality or containing insufficient information. In all cases, a systemic view is needed, and proposed here, to locate metrology in the comprehensive picture of direct and indirect levers for action in agricultural water management. The latter should rely on a contextual and agreed definition of "water need" depending on the crop, soil, climate, yield target and constrained irrigation strategy applied, informed by metrology or (and) modelling. Ultimately, the reasoning set out here applies primarily to situations of water scarcity, but should also be applicable to situations of occasional abundance and excess, as one of the challenges set by climate change is to perform the joint optimisation of irrigation and control of runoff, erosion and anoxic or hydromorphic conditions.

Keywords: Multi-scale soil moisture metrology; Climate-resilient agriculture; Water management; Water scarcity; Hydromorphic conditions.

RÉSUMÉ

Le rôle de la métrologie constitue un angle mort des processus décisionnels qui régissent la gestion de l'eau agricole à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et du territoire, et qui couvrent donc à la fois les stratégies de prélèvement et de répartition de l'eau. Fort de fondements essentiels — connaissance des processus biophysiques élémentaires, compréhension approfondie des principes de mesure et absence de tout parti pris commercial —, le monde universitaire devrait fournir à ses partenaires opérationnels et institutionnels des éclairages et des recommandations sur les technologies et les pratiques adaptées au contexte. Les objectifs communs, appliqués et systémiques consistent à évaluer les flux environnementaux et la dynamique du bilan hydrique sol-plante, ainsi que les effets des erreurs commises lors de leur détermination (données manquantes, fortes incertitudes, faible représentativité). Ces erreurs se propagent dans les chaînes de décision de deux manières différentes. Dans certains cas,

1 INRAE, AQUA, Montpellier, France Email: bruno.cheviron@inrae.fr
2 University of Ljubljana, Biotechnical faculty, Ljubljana, Slovenia Email: rozalija.cvejic@bf.uni-lj.si

les décisions découlent directement des mesures, par exemple lorsqu'un seuil d'humidité du sol déclenchant l'irrigation est atteint. Dans d'autres, elles sont prises à partir des résultats de modèles préalablement ajustés sur des jeux de données de qualité insuffisante ou contenant trop peu d'informations. Dans tous les cas, une vision systémique est nécessaire ; elle est proposée ici afin de situer la métrologie dans le tableau d'ensemble des leviers d'action directs et indirects de la gestion de l'eau agricole. Cette dernière devrait reposer sur une définition contextuelle et convenue du « besoin en eau », qui dépend de la culture, du sol, du climat, de l'objectif de rendement et de la stratégie d'irrigation sous contrainte appliquée, et qui est éclairée par la métrologie et/ou la modélisation. Enfin, le raisonnement exposé ici s'applique principalement aux situations de pénurie d'eau, mais devrait également convenir aux situations d'abondance ou d'excès ponctuels, car l'un des défis posés par le changement climatique consiste à optimiser conjointement l'irrigation et la maîtrise du ruissellement, de l'érosion et des conditions anoxiques ou hydromorphes.

Mots clés : Métrologie multi-échelle de l'humidité du sol; Agriculture résiliente au changement climatique ; Gestion d'eau; Pénurie d'eau; Conditions hydromorphes.

RESEARCH ON WATER AND NITROGEN MONITORING AND DECISION-MAKING TECHNOLOGY OF CHILI BASED ON UAV HYPERSPECTRAL REMOTE SENSING

RECHERCHE SUR LES TECHNOLOGIES DE SUIVI ET D'AIDE À LA DÉCISION POUR LA GESTION DE L'EAU ET DE L'AZOTE DU PIMENT FONDÉES SUR LA TÉLÉDÉTECTION HYPERSPECTRALE PAR DRONE

Qi Wei, He Yupu[1], Zhang Wei, Huang Richao, and Gu Nan

ABSTRACT

Guizhou Province is one of the most important chili production bases in China, and chili cultivation plays an irreplaceable role in promoting local agricultural development, increasing farmers' income, and supporting rural revitalization. However, traditional irrigation and nitrogen fertilization management in chili production still heavily depends on empirical operation, which often leads to excessive or unreasonable water and fertilizer input, low water and nitrogen use efficiency, and even potential risks of soil degradation and non-point source pollution. Therefore, developing rapid, non-destructive, and large-scale monitoring and decision-making technologies is of great practical significance for the high-quality and green development of chili cultivation. Unmanned aerial vehicle (UAV) hyperspectral remote sensing, with its advantages of high efficiency, high spatial resolution, and real-time performance, provides a promising approach for water and nitrogen monitoring and decision-making in chili cultivation. In this study, field experiments were conducted in Liupanshui, Guizhou province, with different irrigation and nitrogen fertilization treatments. Three irrigation levels (low, medium and high) were performed with irrigation upper limits respectively at 50%, 65%, and 80% of field water capacity. Nitrogen fertilization was classified as low nitrogen (0, 50, 100 $kg \cdot hm^{-2}$), medium nitrogen (200, 250, 300 $kg \cdot hm^{-2}$), and high nitrogen (400, 500 $kg \cdot hm^{-2}$). During the growing season, the total nitrogen content (TN) and dry matter (DM) of chili, and the soil moisture content (SMC) were measured periodically. Hyperspectral images were synchronously obtained using an M350 RTK UAV equipped with an LR1601-IRIS hyperspectral camera. The results showed that TN and DM of chili responded differently to nitrogen application. With the increase in nitrogen application amount, TN increased continuously, while DM at the seedling stage increased under low nitrogen condition and decreased under high nitrogen condition. In addition, water-nitrogen coupling improved nitrogen use efficiency of chili. The suitable water-nitrogen regimes were medium water with low/medium nitrogen at the seedling stage, medium water with medium nitrogen at the early flowering stage and the early fruiting stage. The most sensitive vegetation indices for SMC were 2RVI2 and EVI, and the index for TN was DVI. By integrating the most sensitive spectral bands and vegetation indices, machine learning-based monitoring models of SMC and TN of chili were constructed, with coefficients of determination of 0.758 and 0.879, respectively. The critical nitrogen content curve of chili was calibrated based on the experimental data, and the nitrogen nutrition index (NNI) was proposed to evaluate nitrogen status of chili during cultivation. When NNI equals 0, it indicates that the nitrogen nutrition level of chili is at an optimal state; when NNI is less than 0, it signifies nitrogen deficiency in chili; when NNI is greater than 0, it denotes nitrogen excess in chili. A nitrogen deficit prediction model was further developed with a high coefficient of determination of 0.928. The models proposed in this study could rapidly obtain soil moisture and nitrogen deficit information from UAV hyperspectral images, providing theoretical and technical support for dynamic monitoring, rapid diagnosis, and precise decision-making of water and nitrogen management for chili at the field scale, and thus effectively improving water and nitrogen use efficiency in chili cultivation.

1 Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, China

Keywords: Chili; UAV hyperspectral remote sensing; Water-nitrogen monitoring; Nitrogen deficit.

RÉSUMÉ

La province du Guizhou est l'une des principales régions productrices de piments en Chine, et la culture du piment joue un rôle irremplaçable dans la promotion du développement agricole local, l'augmentation des revenus des agriculteurs et la revitalisation rurale. Toutefois, la gestion traditionnelle de l'irrigation et de la fertilisation azotée repose encore largement sur l'expérience, ce qui entraîne souvent des apports excessifs ou inadaptés en eau et en engrais, une faible efficience d'utilisation de l'eau et de l'azote, voire des risques de dégradation des sols et de pollution diffuse. Le développement de technologies rapides, non destructives et applicables à grande échelle pour le suivi et l'aide à la décision revêt donc une grande importance pratique pour une production de piments durable et de qualité. Grâce à sa grande efficacité, à sa haute résolution spatiale et à ses capacités en temps réel, la télédétection hyperspectrale par véhicule aérien sans pilote (UAV) constitue une approche prometteuse pour le suivi de l'eau et de l'azote et l'aide à la décision en culture du piment. Dans cette étude, des essais au champ comportant différents traitements d'irrigation et de fertilisation azotée ont été menés à Liupanshui, dans la province du Guizhou. Trois niveaux d'irrigation (faible, moyen et élevé) ont été appliqués, avec des limites supérieures respectives de 50 %, 65 % et 80 % de la capacité au champ. La fertilisation azotée a été répartie en trois catégories: faible (0, 50 et 100 $kg \cdot hm^{-2}$), moyenne (200, 250 et 300 $kg \cdot hm^{-2}$) et élevée (400 et 500 $kg \cdot hm^{-2}$). Pendant la période de végétation, la teneur totale en azote (TN) et la matière sèche (DM) du piment, ainsi que la teneur en eau du sol (SMC), ont été mesurées périodiquement. Des images hyperspectrales ont été acquises simultanément au moyen d'un UAV M350 RTK équipé d'une caméra hyperspectrale LR1601-IRIS. Les résultats ont montré que la TN et la DM du piment réagissaient différemment à l'apport d'azote. À mesure que la dose d'azote augmentait, la TN progressait continuellement, tandis qu'au stade plantule, la DM augmentait sous faible apport d'azote et diminuait sous fort apport. En outre, l'interaction eau-azote a amélioré l'efficience d'utilisation de l'azote par le piment. Les régimes eau-azote appropriés correspondaient à un niveau d'eau moyen associé à un apport d'azote faible ou moyen au stade plantule, puis à un niveau d'eau moyen associé à un apport d'azote moyen au début de la floraison et au début de la fructification. Les indices de végétation les plus sensibles à la SMC étaient 2RVI2 et EVI, tandis que DVI était le plus sensible à la TN. L'intégration des bandes spectrales et des indices de végétation les plus sensibles a permis de construire, par apprentissage automatique, des modèles de suivi de la SMC et de la TN du piment, avec des coefficients de détermination respectifs de 0,758 et 0,879. La courbe critique de teneur en azote du piment a été étalonnée à partir des données expérimentales, et l'indice de nutrition azotée (NNI) a été proposé pour évaluer l'état azoté du piment au cours de la culture. Une valeur de NNI égale à 0 indique un niveau optimal de nutrition azotée ; une valeur inférieure à 0 traduit une carence en azote, tandis qu'une valeur supérieure à 0 indique un excès d'azote. Un modèle de prévision du déficit azoté a ensuite été mis au point, avec un coefficient de détermination élevé de 0,928. Les modèles proposés dans cette étude permettent d'obtenir rapidement, à partir d'images hyperspectrales acquises par UAV, des informations sur l'humidité du sol et le déficit azoté. Ils apportent ainsi un appui théorique et technique au suivi dynamique, au diagnostic rapide et à la prise de décision précise pour la gestion de l'eau et de l'azote du piment à l'échelle de la parcelle, améliorant ainsi efficacement l'efficience d'utilisation de ces deux ressources.

Mots clés : Chili; Télédétection hyperspectrale acquise par UAV; Surveillance de l'eau et de l'azote; Déficit en azote.

UNDERSTANDING SORGHUM WATER USE TO CONTRASTED IRRIGATION REGIMES UNDER CONTROLLED FIELD CONDITIONS

COMPRENDRE L'UTILISATION DE L'EAU PAR LE SORGHO SOUMIS À DES RÉGIMES D'IRRIGATION CONTRASTÉS EN CONDITIONS CONTRÔLÉES AU CHAMP

Larsonneau Pierre[1], Gendre Sophie and Moynier Jean-Louis[2]

ABSTRACT

In the context of climate change characterized by increasing water stress, this study investigates the response of grain sorghum to different water regimes under controlled conditions. A two-year field experiment (2024–2025) conducted under mobile rain shelters compared four irrigation treatments (ETM, 50% of ETM, late-season stress, and rainfed conditions applied to two varieties differing in earliness (Arsky and ES Shamal). Water stress was quantified using the ETa/ETc ratio simulated by the Irrelis model and subsequently related to grain yield, its components, and water use efficiency.

The results show that yield is strongly influenced by water availability, with reductions of up to 45% under rainfed conditions. However, late-season water stress did not result in a significant yield decrease compared to optimal irrigation, unlike early water stress. Yield reductions were mainly associated with a decrease in thousand-kernel weight, while the number of grains remained relatively stable. Water use efficiency values confirm the good adaptation of sorghum, with a decrease in the marginal productivity of water as water inputs increase.

Keywords: Contrasted irrigation regimes; Controlled field conditions; Context of climate change; Water stress; Water availability.

RÉSUMÉ

Dans un contexte de changement climatique caractérisé par une aggravation du stress hydrique, cette étude examine la réponse du sorgho grain à différents régimes hydriques en conditions contrôlées. Une expérimentation au champ menée pendant deux ans (2024-2025) sous des abris mobiles contre la pluie a comparé quatre traitements d'irrigation (ETM, 50 % de l'ETM, stress de fin de cycle et conditions pluviales), appliqués à deux variétés de précocité différente (Arsky et ES Shamal). Le stress hydrique a été quantifié au moyen du rapport ETa/ETc simulé par le modèle Irrelis, puis mis en relation avec le rendement en grains, ses composantes et l'efficience d'utilisation de l'eau.

Les résultats montrent que le rendement est fortement influencé par la disponibilité en eau, avec des baisses pouvant atteindre 45 % en conditions pluviales. Toutefois, contrairement à un stress hydrique précoce, un stress de fin de cycle n'a pas entraîné de diminution significative du rendement par rapport à une irrigation optimale. Les baisses de rendement étaient principalement liées à une diminution du poids de mille grains, tandis que le nombre de grains restait relativement stable. Les valeurs de l'efficience d'utilisation de l'eau confirment la bonne adaptation du sorgho, la productivité marginale de l'eau diminuant à mesure que les apports augmentent.

Mots clés : Régimes d'irrigation contrastés; Conditions contrôlées au champ; Contexte de changement climatique; Stress hydrique; Disponibilité en eau.

1 Arvalis, 6 Chemin de la Côté Vieille, 31450 Baziège, France, Email: p.larsonneau@arvalis.frArvalis, 6 Chemin de la Côté Vieille, 1450 Baziège, France, email : s.gendre@arvalis.fr

2 Arvalis, Domaine expérimental du Magneraud, 17700 Saint-Pierre-d'Amilly, Email : jl.moynier@arvalis.fr

FROM FRUIT BIOWASTE TO FIELD SCALE WATER SAVINGS: EVALUATING A NATURAL SUPERABSORBENT POLYMER FOR IMPROVED IRRIGATION PRACTICES AND WATER INPUTS

DES BIODÉCHETS FRUITIERS AUX ÉCONOMIES D'EAU À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE: ÉVALUATION D'UN POLYMÈRE SUPERABSORBANT NATUREL POUR AMÉLIORER LES PRATIQUES D'IRRIGATION ET LES APPORTS EN EAU

Ritu Panwar[1*] and Narayan Lal Gurjar[2]

ABSTRACT

Agriculture accounts for approximately 70% of global freshwater use, rising to over 80% in arid regions, where water scarcity endangers food production amid climate variability, depleting groundwater, and rising demands. Conventional irrigation methods in crops like wheat, tomato, and okra suffer from high losses via evaporation and percolation, reducing water use efficiency (WUE) and yields in semi-arid areas. Superabsorbent polymers (SAPs) offer a viable solution by enhancing soil water retention, but sustainable bio-based variants are needed to minimize environmental impacts. This study assessed Fasal Amrit, a bio-SAP from fruit waste, in field trials on wheat (Rabi 2022-23), tomato, and okra in India using randomized block designs. SAP doses ranged from 0-20 kg ha^{-1}, combined with varying irrigation regimes (IW/CPE 1.0-0.6 for tomato; 3–7-day intervals for okra; five irrigations for wheat and fertilizer levels of Recommended Dose of Fertilizer (RDF) at 100% or 85% RDF. Key metrics encompassed growth, yield, WUE, soil moisture, nutrient uptake, and economics, analyzed via ANOVA and Duncan›s test ($p<0.05$). In wheat, 20 kg ha^{-1} SAP with RDF reduced water use by 19% (66.33 acre-inches vs. 81.66 in control), increased soil moisture to 23.73%, and raised grain yield to 42.86 q ha^{-1} (12% gain), with net returns of Rs. 58,233 ha^{-1} and B:C ratio of 1.83. Tomato at 20 kg ha^{-1} and 0.6 IW/CPE achieved 21.66 t ha^{-1}, matching controls while saving 40% water. Okra with 20 kg ha^{-1} extended intervals to 7 days, yielding 136.83 q ha^{-1} (10% increase) and WUE of 304.07 kg ha^{-1} cm^{-1}. Seedling tests delayed wilting by 15 days. A laboratory hygroscopic study with 1% EF Polymer in soil showed higher residual moisture over a 12day drying period while sustaining viable bacterial populations, suggesting compatibility with soil microbial activity. Bio-SAPs improve water retention, yields, and profitability across crops, offering scalable solutions for water-scarce farming. Doses of 15-20 kg ha^{-1} are recommended for rainfed and irrigated systems in arid zones.

Keywords: Superabsorbent polymer, Sustainability, Irrigation efficiency, Water use efficiency, Soil moisture retention, Nutrient uptake.

RÉSUMÉ

L'agriculture représente environ 70 % de l'utilisation mondiale d'eau douce, et cette proportion dépasse 80 % dans les régions arides, où la rareté de l'eau menace la production alimentaire dans un contexte de variabilité climatique, d'épuisement des eaux souterraines et de demande croissante. Les méthodes d'irrigation conventionnelles appliquées à des cultures telles que le blé, la tomate et le gombo subissent d'importantes pertes par évaporation et percolation, ce qui réduit l'efficience d'utilisation de l'eau (WUE) et les rendements dans les zones semi-arides. Les polymères superabsorbants (SAP) offrent une solution viable en améliorant la

1 Research & Development Manager, EF Polymer Pvt. Ltd., Udaipur, Rajasthan, India (Presenting Author), Email: ritu.panwar@efpolymer.com
2 Founder & CEO, EF Polymer Pvt. Ltd., Email: narayan@efpolymer.com Corresponding author: ritu.panwar@efpolymer.com

rétention de l'eau dans le sol, mais des variantes biosourcées durables sont nécessaires pour réduire au minimum les impacts environnementaux. Cette étude a évalué Fasal Amrit, un bio-SAP issu de déchets de fruits, lors d'essais au champ sur le blé (Rabi 2022-2023), la tomate et le gombo en Inde, selon des dispositifs en blocs randomisés. Des doses de SAP comprises entre 0 et 20 kg ha^{-1} ont été associées à différents régimes d'irrigation (IW/CPE de 1,0 à 0,6 pour la tomate; intervalles de 3 à 7 jours pour le gombo ; cinq irrigations pour le blé) et à des niveaux de fertilisation correspondant à 100 % ou 85 % de la dose d'engrais recommandée (RDF). Les principaux paramètres comprenaient la croissance, le rendement, la WUE, l'humidité du sol, l'absorption des éléments nutritifs et les résultats économiques; ils ont été analysés par ANOVA et au moyen du test de Duncan ($p < 0,05$). Chez le blé, l'application de 20 kg ha^{-1} de SAP avec la RDF a réduit l'utilisation d'eau de 19 % (66,33 acre-pouces contre 81,66 pour le témoin), porté l'humidité du sol à 23,73 % et accru le rendement en grains à 42,86 q ha^{-1} (gain de 12 %), avec des recettes nettes de 58 233 Rs. ha^{-1} et un rapport bénéfices/coûts (B:C) de 1,83. Pour la tomate, la combinaison de 20 kg ha^{-1} et d'un rapport IW/CPE de 0,6 a permis d'obtenir 21,66 t ha^{-1}, soit un rendement équivalent à celui des témoins tout en économisant 40 % d'eau. Pour le gombo, 20 kg ha^{-1} ont permis de porter l'intervalle d'irrigation à 7 jours, avec un rendement de 136,83 q ha^{-1} (hausse de 10 %) et une WUE de 304,07 kg ha^{-1} cm^{-1}. Les essais sur les plantules ont retardé le flétrissement de 15 jours. Une étude hygroscopique en laboratoire, réalisée avec 1 % d'EF Polymer dans le sol, a révélé une humidité résiduelle plus élevée pendant une période de séchage de 12 jours, tout en maintenant des populations bactériennes viables, ce qui suggère une compatibilité avec l'activité microbienne du sol. Les bio-SAP améliorent la rétention de l'eau, les rendements et la rentabilité de différentes cultures, et offrent ainsi des solutions transposables à grande échelle pour l'agriculture confrontée à la rareté de l'eau. Des doses de 15 à 20 kg ha^{-1} sont recommandées pour les systèmes pluviaux et irrigués des zones arides.

Mots clés : Polymères superabsorbants; Durabilité; Efficacité de l'irrigation; Efficacité de l'utilisation de l'eau ; Rétention d'humidité du sol; Eléments nutritifs.

TRANSFORMING IRRIGATION THROUGH AUTOMATION - INSIGHTS FROM INDIA'S NLBC MODERNISATION AND GLOBAL LEARNINGS

TRANSFORMER L'IRRIGATION PAR L'AUTOMATISATION – ENSEIGNEMENTS TIRÉS DE LA MODERNISATION DU NLBC EN INDE ET DES EXPÉRIENCES MONDIALES

Praveen Prakash[1], Varun Ravi[2], and Venkata Kowshik[3]

ABSTRACT

The NLBC modernisation project in Karnataka showcases how canal automation can enhance water-use efficiency, equity, and crop productivity. Integrating advanced technologies with local capacity building, it sets a scalable model for sustainable irrigation in India and globally, aligning with national water goals and climate-resilient agricultural development.

Keywords: Canal Automation, Total Channel Control (TCC), Irrigation Efficiency, NLBC Modernisation, Water Use Efficiency, Gravity-fed Irrigation, Smart Irrigation, Digital Water Management, Agricultural Productivity, Climate-resilient Agriculture, Water Vision 2047, Sustainable Water Management, On-demand Irrigation, Rural Infrastructure, Farmer Equity.

RÉSUMÉ

Le projet de modernisation du NLBC au Karnataka montre comment l'automatisation des canaux peut améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau, l'équité et la productivité des cultures. En associant des technologies avancées au renforcement des capacités locales, il établit un modèle transposable pour une irrigation durable en Inde et dans le monde, en cohérence avec les objectifs nationaux relatifs à l'eau et le développement d'une agriculture résiliente au climat.

Mots-clés : Automatisation des canaux; Contrôle total des canaux (TCC); Efficacité de l'irrigation; Modernisation du NLBC, Efficacité de l'utilisation de l'eau; Irrigation gravitaire; Irrigation intelligente; Gestion numérique de l'eau; Productivité agricole, Agriculture résiliente au climat; Water Vision 2047; Gestion durable de l'eau; Irrigation à la demande; Infrastructure rurale; Equité des agriculteurs.

1 General Manager India, Rubicon Water Ltd, Australia, Praveen.Prakash@Rubiconwater.com
2 Head of Operations & Delivery - India, Rubicon Water Ltd, Australia, Varun.Ravi@Rubiconwater.com
3 Manager Marketing, Medha Servo Drives, venkatakowshikk@medha.com

ENHANCING WATER USE EFFICIENCY UNDER CLIMATE VARIABILITY: A MULTI-SCALE REVIEW OF IRRIGATION SYSTEMS IN MALAYSIA

AMÉLIORATION DE L'EFFICIENCE D'UTILISATION DE L'EAU FACE À LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE: UNE REVUE MULTI-ÉCHELLE DES SYSTÈMES D'IRRIGATION EN MALAISIE

Y. Hj Mohd Sani[1], and M.A.A. Jamaari[2]

ABSTRACT

Water is a critical resource for agricultural production and food security particularly in countries where irrigation supports intensive crop cultivation. In Malaysia, irrigation systems are central to paddy production within major granary areas that collectively contribute the majority of domestic rice supply. However, climate variability characterized by changing rainfall patterns, increasing temperatures, prolonged droughts and more frequent flood events is placing significant pressure on irrigation infrastructure and water resource management. This paper presents a multi-scale review of irrigation water use efficiency (WUE) in Malaysia examining irrigation performance from national, river basin, irrigation scheme and farm levels. The review synthesizes findings from irrigation performance assessments, climate impact studies, water productivity analyses, agricultural statistics and national policy frameworks. Evidence indicates that irrigation efficiency remains below international benchmarks in several major schemes, resulting in substantial conveyance and operational losses. Climate projections suggest increasing variability in water availability, requiring adaptive irrigation management strategies. Emerging technologies such as evapotranspiration-based irrigation scheduling, Internet of Things (IoT) sensors, remote sensing, automation and precision water management provide opportunities to improve irrigation performance and climate resilience. The paper proposes a climate-resilient irrigation framework integrating technological innovation, institutional strengthening and policy support to improve water productivity, reduce water losses and strengthen national food security. Findings provide insights for policymakers, irrigation managers and researchers seeking sustainable approaches for agricultural water management under future climate conditions.

Keywords: Water use efficiency, climate variability, irrigation systems, water productivity, climate adaptation, Malaysia.

RÉSUMÉ

L'eau est une ressource essentielle à la production agricole et à la sécurité alimentaire, en particulier dans les pays où l'irrigation soutient des cultures intensives. En Malaisie, les systèmes d'irrigation sont au cœur de la production de riz dans les principales zones de grenier à riz, lesquelles fournissent ensemble la majeure partie de l'approvisionnement national. Toutefois, la variabilité climatique, caractérisée par l'évolution des régimes de précipitations, la hausse des températures, des sécheresses prolongées et des inondations plus fréquentes, exerce une pression considérable sur les infrastructures d'irrigation et la gestion des ressources en eau. Cet article présente une revue multi-échelle de l'efficience d'utilisation de l'eau d'irrigation (WUE) en Malaisie, en examinant les performances de l'irrigation aux échelles nationale, du bassin hydrographique, du périmètre irrigué et de

1 Ministry of Agriculture and Food Security, Division of Irrigation and Agriculture Drainage, Putrajaya, Malaysia Email: yuslina@water.gov.my

2 Ministry of Agriculture and Food Security, Division of Irrigation and Agriculture Drainage, Putrajaya, Malaysia Email: aliifaimran@water.gov.my

l'exploitation. La revue synthétise les résultats d'évaluations des performances de l'irrigation, d'études d'impact climatique, d'analyses de la productivité de l'eau, de statistiques agricoles et de cadres politiques nationaux. Les données disponibles indiquent que, dans plusieurs grands périmètres, l'efficience de l'irrigation demeure inférieure aux références internationales, ce qui entraîne d'importantes pertes lors du transport et de l'exploitation. Les projections climatiques laissent prévoir une variabilité accrue de la disponibilité en eau, nécessitant des stratégies adaptatives de gestion de l'irrigation. Des technologies émergentes, telles que la programmation de l'irrigation fondée sur l'évapotranspiration, les capteurs de l'Internet des objets (IoT), la télédétection, l'automatisation et la gestion de précision de l'eau, offrent des possibilités d'améliorer les performances de l'irrigation et la résilience climatique. L'article propose un cadre d'irrigation résilient au climat, intégrant l'innovation technologique, le renforcement institutionnel et l'appui des politiques publiques, afin d'améliorer la productivité de l'eau, de réduire les pertes et de renforcer la sécurité alimentaire nationale. Les résultats apportent des éclairages aux responsables des politiques publiques, aux gestionnaires de l'irrigation et aux chercheurs qui recherchent des approches durables pour gérer l'eau agricole dans les conditions climatiques futures.

Mots-clés : Efficacité de l'utilisation de l'eau; Variabilité climatique; Systèmes d'irrigation; Productivité de l'eau; Adaptation au climat; Malaisie.

A DIGITAL TWIN FRAMEWORK FOR PLOT-SCALE IRRIGATION MANAGEMENT

UN CADRE DE JUMEAU NUMÉRIQUE POUR LA GESTION DE L'IRRIGATION À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE

María Belén Pedoja Balparda[1], Juan Antonio Rodríguez Díaz[1], María Pilar Montesinos Barrios[1], and Rafael González Perea[1]

ABSTRACT

Efficient irrigation management increasingly requires integrated tools capable of combining field observations, spatial variability, and process-based modelling within a single operational environment. This work presents the development of a modular Digital Twin (DT) framework for precision irrigation, implemented within the QGIS environment.

The proposed framework integrates hydraulic simulation, sensor data, agro-climatic information, satellite imagery, canopy cover estimation, irrigation scheduling, and AquaCrop-based crop modelling into a single operational architecture. The system is structured into interoperable modules, including a Hydraulic Module based on EPANET, a Sensors Module for managing heterogeneous real-time and near-real-time data streams, an Irrigation Module based on a FAO-56 daily soil water balance, a Satellite Image Module, a Canopy Cover estimation module, and an AquaCrop Spatial Module for pixel-based crop simulation. DT enables the configuration of hydraulic and agronomic scenarios, the incorporation of sensor and climatic data, the estimation of spatially varied canopy cover from satellite imagery, and the generation of crop performance outputs such as canopy development, biomass, and yield. The resulting prototype provides an integrated environment for monitoring and simulating irrigation performance under different management and climatic conditions to make informed management decisions.

Keywords: precision irrigation; remote sensing; AquaCrop; EPANET; canopy cover; decision support system.

RÉSUMÉ

La gestion efficace de l'irrigation nécessite de plus en plus des outils intégrés capables de combiner les observations de terrain, la variabilité spatiale et la modélisation fondée sur les processus au sein d'un environnement opérationnel unique. Ce travail présente le développement d'un cadre modulaire de jumeau numérique (DT) pour l'irrigation de précision, mis en œuvre dans l'environnement QGIS.

Le cadre proposé réunit, dans une architecture opérationnelle unique, la simulation hydraulique, les données de capteurs, les informations agroclimatiques, l'imagerie satellitaire, l'estimation de la couverture végétale, la programmation de l'irrigation et la modélisation des cultures fondée sur AquaCrop. Le système est structuré en modules interopérables, notamment un module hydraulique fondé sur EPANET, un module de capteurs destiné à gérer des flux de données hétérogènes en temps réel et quasi réel, un module d'irrigation fondé sur un bilan hydrique journalier du sol selon FAO-56, un module d'imagerie satellitaire, un module d'estimation de la couverture végétale et un module spatial AquaCrop pour la simulation des cultures à l'échelle du pixel. Le DT permet de configurer des scénarios hydrauliques et agronomiques, d'intégrer des données de capteurs et des données climatiques, d'estimer à partir d'images satellitaires la couverture végétale et sa variabilité spatiale, et de produire

1 Department of Agronomy, University of Cordoba, Campus Rabanales, Cordoba 14071, Spain Corresponding author: z32pebam@uco.es

des résultats sur les performances des cultures, tels que le développement du couvert, la biomasse et le rendement. Le prototype obtenu offre un environnement intégré pour surveiller et simuler les performances de l'irrigation selon différentes conditions de gestion et différents contextes climatiques, afin d'éclairer les décisions de gestion.

Mots clés : Irrigation de précision; Télédétection; AquaCrop; EPANET; Couvert végétal; Système d'aide à la décision.

TECHNOLOGY ADOPTION AND DATA-DRIVEN IRRIGATION MANAGEMENT IN NEPAL: STATUS, BARRIERS, AND A ROADMAP FOR WATER-USE EFFICIENCY

ADOPTION DES TECHNOLOGIES ET GESTION DE L'IRRIGATION FONDÉE SUR LES DONNÉES AU NÉPAL : ÉTAT DES LIEUX, OBSTACLES ET FEUILLE DE ROUTE POUR L'EFFICIENCE D'UTILISATION DE L'EAU

Saroj Karki[1], Suchana Acharya[2*], Sanjeeb Baral[3], and Tikaram Baral[4]

ABSTRACT

Nepal's irrigation sector is central to agricultural productivity, rural livelihoods, and climate adaptation, yet it operates within one of the world's most demanding hydro-geomorphic contexts: steep hills, sediment-laden rivers, highly seasonal flows, and increasing climate variability. The Department of Water Resources and Irrigation (DWRI) manages 32 Agency-Managed Irrigation Systems (AMIS) alongside over 16,000 Farmer-Managed Irrigation Systems (FMIS), collectively covering approximately 1.5 million hectares of the 2.5 million hectare irrigable potential. Major investments have improved infrastructure; however, the transition toward a measure-manage-improve paradigm remains uneven. This paper assesses the current status of technology adoption and data-driven practices across Nepal's irrigation landscape and documents DWRI's concrete steps toward digital transformation—specifically the Nepal Irrigation Management Information System (NIMIS) and the Nepal Irrigation Infrastructure Monitoring System (NIIMS). The paper further identifies persistent barriers and proposes a practical modernization roadmap. Farm-level adoption is progressing, but system-level monitoring and institutional use of data remain weak. Key constraints include supply-driven operations, weak O&M financing, fragmented datasets, skill deficits, and insufficient performance-oriented incentives. Nepal's modernization must prioritize closing the data-to-decision gap through minimum monitoring packages, interoperable data systems, remote sensing, participatory monitoring, and selective automation—treating digital irrigation as a service transformation rather than a technology rollout.

Keywords: Irrigation modernization; Water-use efficiency; Nepal; FMIS; IMIS; Remote sensing, Performance assessment; Digital irrigation.

RÉSUMÉ

Le secteur de l'irrigation au Népal joue un rôle central dans la productivité agricole, les moyens de subsistance ruraux et l'adaptation au climat, mais il évolue dans l'un des contextes hydrogéomorphologiques les plus exigeants au monde : versants abrupts, rivières fortement chargées en sédiments, débits très saisonniers et variabilité climatique croissante. Le Département des ressources en eau et de l'irrigation (DWRI) gère 32 systèmes d'irrigation administrés par l'État (AMIS), parallèlement à plus de 16 000 systèmes d'irrigation gérés par les agriculteurs (FMIS) ; ensemble, ils couvrent environ 1,5 million d'hectares sur un potentiel irrigable de 2,5 millions d'hectares. D'importants investissements ont amélioré les infrastructures ; toutefois, la transition vers un paradigme « mesurer-gérer-améliorer » reste inégale. Cet article évalue l'état actuel de l'adoption des technologies et des pratiques fondées

1 Ministry of Water Supply, Irrigation and Energy, Koshi Province, Nepal
2 Department of Water Resources and Irrigation, Lalitpur, Nepal (acharyasuchana@gmail.com)
3 Water Resources and Energy Research Center, Lalitpur, Nepal
4 Water and Energy Commission Secretariat, Kathmandu, Nepal

sur les données dans l'ensemble du secteur népalais de l'irrigation. Il présente également les mesures concrètes prises par le DWRI en faveur de la transformation numérique, notamment le Système népalais d'information sur la gestion de l'irrigation (NIMIS) et le Système népalais de suivi des infrastructures d'irrigation (NIIMS). L'article recense en outre les obstacles persistants et propose une feuille de route pratique pour la modernisation. L'adoption progresse à l'échelle des exploitations, mais le suivi à l'échelle des systèmes et l'utilisation institutionnelle des données restent faibles. Les principales contraintes comprennent une exploitation guidée par l'offre, un financement insuffisant de l'exploitation et de la maintenance (O&M), des jeux de données fragmentés, un déficit de compétences et des incitations trop peu axées sur les performances. La modernisation du Népal doit en priorité combler l'écart entre les données et la décision grâce à des dispositifs minimaux de suivi, des systèmes de données interopérables, la télédétection, le suivi participatif et une automatisation sélective, en considérant l'irrigation numérique comme une transformation des services plutôt que comme un simple déploiement technologique.

Mots-clés : Modernisation de l'irrigation; Efficacité de l'utilisation de l'eau; Népal; FMIS, IMIS, Télédétection; Evaluation des performances; Irrigation numérique.

RESEARCH ON ANTI-CLOGGING PERFORMANCE OF SELF-FLUSHING EMITTERS IN SANDY WATER CONDITIONS

ÉTUDE DES PERFORMANCES ANTI-COLMATAGE DE GOUTTEURS À AUTO-RINÇAGE EN CONDITIONS D'EAU CHARGÉE DE SABLE

Qiameng Du[1], Yan Mo[2], and Baolin Yao[3]

ABSTRACT

An auto-flush emitter (AFE) designed for sediment-laden water was developed in this study. The AFE consists primarily of an emitter core and an elastomer. When the inlet pressure (H_0) exceeds a step pressure (H_j), the elastomer undergoes a sudden deformation and detaches from the energy-dissipating channel, switching the operating state from the normal supply stage to the auto-flush stage and discharging deposited materials from the channel. Three emitter cores (EMI1, EMI2, EMI3) were assembled with silicone (SI) and polyurethane (PU) to form six AFEs, while polytetrafluoroethylene (PTFE) was assembled with the same cores as three non-flushing controls (CK). Nine emitters were tested under clean water (CW) and sediment-laden water (SW) conditions; the elastomer Shore hardness ranked as SI < PU < PTFE. Under CW, the discharge (q_{CW}) of all AFEs exhibited a stepwise increase with increasing H_0, with H_j = 0.07–0.10 MPa. When $H_0 > H_j$, q_{CW} of the SI-assembled AFEs was 1.96–17.88% higher than that of the PU-assembled AFEs and 9.18–50.58% higher than that of CK. Under SW, the average relative discharge (*Dra*) of all emitters decreased with operating time (*T*). The decline became less pronounced with increasing H_0 and with decreasing elastomer hardness. At H_0 = 0.15 MPa, *Dra* of SI-assembled AFEs remained >75% after 540 min, whereas *Dra* of PU-assembled AFEs and CK dropped below 75% after 480 and 360 min, respectively. At *T* = 360 min, *Dra* of SI-assembled AFEs increased by 3.88–17.65% compared with PU-assembled AFEs and by 0.23–39.41% compared with CK. The hourly decline in *Dra* (Δ*Dra*) was significantly affected by core type, elastomer type and H_0 ($P < 0.05$). With increasing H_0, the channel cross-sectional area (*S*) increased and the mean velocity (*v*) decreased for AFEs, while *v* increased for CK. Compared with PU-assembled AFEs and CK, *S* of SI-assembled AFEs increased by 3.71–6.79% and 66.91%–249.13%, respectively. The *v* of SI-assembled AFEs (0.24–0.41 m/s) covered most of the incipient motion velocity range (U_c = 0.06–0.67 m/s) for the tested sediments. Based on comparisons between *v* and U_c and Pearson correlation analyses among Δ*Dra*, deposited-sediment proportion (η), *S*, *v* and q_{CW}, the improved anti-clogging mechanism of SI-assembled AFEs is attributed to maintaining *v* at 0.34–0.41 m/s while enlarging *S* during the auto-flush stage to facilitate the discharge of deposited particles, thereby enhancing anti-clogging performance. The findings provide a basis for AFE development and support drip irrigation applications with sediment-laden water.

Keywords: Elastomer; Threshold pressure; Relative discharge; Average flow velocity in energy-dissipation channel; Sediment incipient velocity.

1 China Institute of Water Resources and Hydropower Research Institute of Water Conservancy, Beijing 100048, China. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Tarim University, Alaer 843300, China. Email: 2847368652@qq.com

2 State Key Laboratory of Basin Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China. China Institute of Water Resources and Hydropower Research Institute of Water Conservancy, Beijing 100048, China. Email: moyansdi@163.com

3 College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Tarim University, Alaer 843300, China. Email:528727673@qq.com

RÉSUMÉ

Un goutteur à auto-rinçage (AFE) conçu pour les eaux chargées en sédiments a été développé dans cette étude. L'AFE se compose principalement d'un noyau de goutteur et d'un élastomère. Lorsque la pression d'entrée (H_0) dépasse une pression de seuil (H_j), l'élastomère se déforme brusquement et se décolle du canal dissipateur d'énergie, faisant passer le fonctionnement du régime normal d'alimentation au régime d'auto-rinçage et évacuant les matières déposées dans le canal. Trois noyaux de goutteur (EMI1, EMI2 et EMI3) ont été associés au silicone (SI) et au polyuréthane (PU) pour former six AFE, tandis que du polytétrafluoroéthylène (PTFE) a été assemblé avec les mêmes noyaux afin de constituer trois témoins sans rinçage (CK). Neuf goutteurs ont été testés avec de l'eau claire (CW) et de l'eau chargée en sédiments (SW) ; la dureté Shore des élastomères suivait l'ordre SI < PU < PTFE. Avec l'eau claire, le débit (q_{CW}) de tous les AFE augmentait par paliers avec H_0, pour H_j = 0,07-0,10 MPa. Lorsque $H_0 > H_j$, le q_{CW} des AFE associés au SI était supérieur de 1,96 à 17,88 % à celui des AFE associés au PU, et de 9,18 à 50,58 % à celui des CK. Avec l'eau chargée en sédiments, le débit relatif moyen (*Dra*) de tous les goutteurs diminuait avec la durée de fonctionnement (*T*). Cette diminution s'atténuait à mesure que H_0 augmentait et que la dureté de l'élastomère baissait. À H_0 = 0,15 MPa, le *Dra* des AFE associés au SI restait supérieur à 75 % après 540 min, tandis que celui des AFE associés au PU et des CK passait sous 75 % après respectivement 480 et 360 min. À *T* = 360 min, le *Dra* des AFE associés au SI augmentait de 3,88 à 17,65 % par rapport à celui des AFE associés au PU, et de 0,23 à 39,41 % par rapport à celui des CK. La diminution horaire du *Dra* (Δ*Dra*) était significativement influencée par le type de noyau, le type d'élastomère et H_0 (P < 0,05). Lorsque H_0 augmentait, l'aire de la section transversale du canal (*S*) augmentait et la vitesse moyenne (*v*) diminuait pour les AFE, tandis que *v* augmentait pour les CK. Par rapport aux AFE associés au PU et aux CK, le *S* des AFE associés au SI augmentait respectivement de 3,71 à 6,79 % et de 66,91 à 249,13 %. La *v* des AFE associés au SI (0,24-0,41 m/s) couvrait la majeure partie de la plage de vitesse d'amorce du mouvement (U_c = 0,06-0,67 m/s) des sédiments testés. D'après les comparaisons entre *v* et U_c et les analyses de corrélation de Pearson entre Δ*Dra*, la proportion de sédiments déposés (η), *S*, *v* et q_{CW}, l'amélioration du mécanisme anti-colmatage des AFE associés au SI est attribuée au maintien de *v* entre 0,34 et 0,41 m/s, parallèlement à l'augmentation de *S* pendant la phase d'auto-rinçage, ce qui facilite l'évacuation des particules déposées et renforce ainsi les performances anti-colmatage. Ces résultats constituent une base pour le développement des AFE et favorisent leur application à l'irrigation goutte à goutte avec une eau chargée en sédiments.

Mots-clés : Élastomère ; Pression seuil ; Débit relatif ; Vitesse d'écoulement moyenne dans le canal de dissipation d'énergie ; Vitesse naissante des sédiments.

COMPARING IRRIGATION SCHEDULING TOOLS USED IN PRAIRIE CROP ROTATIONS

COMPARAISON DES OUTILS DE PROGRAMMATION DE L'IRRIGATION UTILISÉS DANS LES ROTATIONS CULTURALES DES PRAIRIES

Erin Karppinen[1], Evan Derdall[2], and Ashebir Godebo[3]

ABSTRACT

Irrigation schedules are designed to maintain plant available water (PAW; field capacity – permanent wilting point) so that soil moisture levels are between field capacity and the maximum allowed depletion, typically set at 50% of PAW. When irrigation scheduling methods and tools are used, producers can increase crop yield and improve water use efficiency (WUE) by maintaining adequate soil moisture for optimal crop production. There is limited information comparing different irrigation scheduling tools and the effects on crop yield, quality, and WUE in the prairies. To address this gap, a small-plot trial using a typical irrigated crop rotation (oilseed-pulse-cereal) was established to (i) compare the irrigation requirements and agronomic outcomes associated with irrigation scheduling tools and (ii) asses their return on investment. Treatments included weather- and soil-based scheduling tools that are commercially available to producers. Soil moisture was monitored throughout the growing season to match water application with the recommendations from provided by each tool, enabling evaluation of WUE and the agronomic and economic performance of each treatment. In this study, all of the scheduling tools effectively maintained soil moisture within the target range of 50-100% of PAW, and total irrigation applied by each tool was dependent on crop type, local environmental conditions, and sensor technology. Differences in moisture use and WUE did not affect yield or quality; however, reduced water use offers both economic and social benefits through lower pumping costs and more efficient use of available water resources. Initial economic assessments indicate that tools that enable more precise irrigation management can offer economic advantages. In years with adequate precipitation, all irrigation scheduling tools performed similarly in terms of yield and crop performance. Differences among tools were primarily related to irrigation amounts and soil moisture dynamics rather than agronomic outcomes, highlighting opportunities for improved water conservation without compromising yield.

Keywords: Irrigation scheduling tools; Prairie crop rotations; Soil moisture levels; Water application; Crop performance; Sensor technology.

RÉSUMÉ

Les calendriers d'irrigation sont conçus pour maintenir l'eau disponible pour les plantes (PAW ; capacité au champ – point de flétrissement permanent), de sorte que l'humidité du sol reste comprise entre la capacité au champ et le déficit maximal admissible, généralement fixé à 50 % de la PAW. L'utilisation de méthodes et d'outils de programmation de l'irrigation permet aux producteurs d'accroître le rendement des cultures et d'améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau (WUE), en maintenant une humidité du sol suffisante pour une production optimale.

1 Agriculture and Agri-Food Canada, CanadaSaskatchewan Irrigation Diversification Centre, 901 McKenzie Street South, Outlook, SK S0L 2N0, Canada, erin.karppinen@agr.gc.ca

2 Agriculture and Agri-Food Canada, Saskatoon Research and Development Centre, Saskatoon, SK S7N 0X2, Canada, evan.derdall@agr.gc.ca

3 Irrigation Saskatchewan, CanadaSaskatchewan Irrigation Diversification Centre, 901 McKenzie Street South, Outlook, SK S0L 2N0, Canada, ashebir.godebo@irrigationsaskatchewan.com

Il existe peu d'informations comparant les différents outils de programmation de l'irrigation et leurs effets sur le rendement, la qualité et la WUE des cultures dans les Prairies. Pour combler cette lacune, un essai sur petites parcelles, fondé sur une rotation irriguée typique (oléagineux-légumineuse-céréale), a été mis en place afin (i) de comparer les besoins d'irrigation et les résultats agronomiques associés aux outils de programmation de l'irrigation et (ii) d'évaluer leur retour sur investissement. Les traitements comprenaient des outils de programmation fondés sur les données météorologiques ou sur le sol et disponibles dans le commerce pour les producteurs. L'humidité du sol a été suivie pendant toute la saison de végétation afin d'adapter les apports d'eau aux recommandations fournies par chaque outil, ce qui a permis d'évaluer la WUE ainsi que les performances agronomiques et économiques de chaque traitement. Dans cette étude, tous les outils de programmation ont maintenu efficacement l'humidité du sol dans la plage cible de 50 à 100 % de la PAW, et le volume total d'irrigation appliqué par chaque outil dépendait du type de culture, des conditions environnementales locales et de la technologie des capteurs. Les différences d'utilisation de l'humidité du sol et de WUE n'ont pas influé sur le rendement ni sur la qualité ; toutefois, la réduction de l'utilisation d'eau procure des avantages économiques et sociaux grâce à la baisse des coûts de pompage et à une utilisation plus efficace des ressources en eau disponibles. Les premières évaluations économiques indiquent que les outils permettant une gestion plus précise de l'irrigation peuvent offrir des avantages financiers. Les années où les précipitations étaient suffisantes, tous les outils de programmation de l'irrigation ont donné des résultats similaires en matière de rendement et de performances culturales. Les différences entre les outils concernaient principalement les volumes d'irrigation et la dynamique de l'humidité du sol plutôt que les résultats agronomiques, ce qui met en évidence des possibilités d'améliorer les économies d'eau sans compromettre le rendement.

Mots-clés : Programmation de l'irrigation utilisés; Rotations culturales des prairies; Niveaux de l'humidité du sol; Application d'eau; Performance de culture; Technologie des capteurs.

DIGITAL INTELLIGENCE-DRIVEN INNOVATION AND PRACTICE FOR WATER RESOURCE MANAGEMENT IN IRRIGATION DISTRICTS

INNOVATION ET PRATIQUES GUIDÉES PAR L'INTELLIGENCE NUMÉRIQUE POUR LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU DANS LES PÉRIMÈTRES IRRIGUÉS

Yizhi Wang[1]. and Di Wu[2]

ABSTRACT

Against the backdrop of global climate change, extreme hydrological events such as droughts and floods occur frequently, exacerbating the uneven spatial and temporal distribution of freshwater resources. Agricultural irrigation, as the largest consumer of global freshwater resources, faces the dual pressures of increasing uncertainty in water supply and growing water demand. Improving agricultural water use efficiency and implementing refined irrigation system management have become a global consensus and common action to ensure food security and promote sustainable agriculture. Digital intelligence technologies, represented by digital twin, Internet of Things (IoT) and big data, have provided a brand-new technical path for innovating water resource management methods in irrigation districts. The construction of digital twin irrigation districts has emerged as a key approach to achieving precise monitoring, intelligent scheduling and efficient management of irrigation water resources. Based on global trends in agricultural water resource management and combined with China's pioneering pilot practices in digital twin irrigation districts, this paper systematically elaborates the technical framework and implementation principles of irrigation district water resource management supported by digital intelligence. It summarizes practical achievements including the improvement of information infrastructure, integrated application of water conservancy models, and enhancement of irrigation and drainage services. The paper also analyzes existing challenges such as inadequate data sharing mechanisms, insufficient technical scenario adaptation, and shortage of professional talents, and proposes corresponding optimization countermeasures. These findings can provide practical references for the digital transformation of water resource management in irrigation districts worldwide.

Keywords: Digital Twin; Irrigation District; Digital Intelligence; Irrigation Water Resources Management.

RÉSUMÉ

Dans le contexte du changement climatique mondial, les phénomènes hydrologiques extrêmes, tels que les sécheresses et les inondations, surviennent fréquemment et aggravent la répartition inégale des ressources en eau douce dans l'espace et dans le temps. L'irrigation agricole, qui constitue le principal usage des ressources mondiales en eau douce, subit la double pression d'une incertitude croissante de l'approvisionnement en eau et d'une demande en hausse. Améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau en agriculture et mettre en œuvre une gestion fine des systèmes d'irrigation sont devenus un consensus mondial et une action commune pour garantir la sécurité alimentaire et promouvoir une agriculture durable. Les technologies d'intelligence numérique, représentées par le jumeau numérique, l'Internet des objets (IoT) et les mégadonnées, ouvrent une voie technique entièrement nouvelle pour faire évoluer les méthodes de gestion des ressources en eau dans les périmètres irrigués. La création de périmètres irrigués à jumeau numérique est devenue une approche essentielle

1 China Irrigation and Drainage Development Center, Beijing, China Email: wangyizhi@126.com
2 Email: wudisyau075@163.com

pour assurer un suivi précis, une programmation intelligente et une gestion efficace des ressources en eau d'irrigation. En s'appuyant sur les tendances mondiales de la gestion de l'eau agricole et sur les pratiques pilotes innovantes menées en Chine dans les périmètres irrigués à jumeau numérique, cet article expose systématiquement le cadre technique et les principes de mise en œuvre d'une gestion des ressources en eau des périmètres irrigués soutenue par l'intelligence numérique. Il résume les résultats pratiques obtenus, notamment l'amélioration des infrastructures d'information, l'application intégrée de modèles hydrauliques et le renforcement des services d'irrigation et de drainage. L'article analyse également les difficultés existantes, telles que l'insuffisance des mécanismes de partage des données, l'adaptation limitée des technologies aux scénarios d'usage et la pénurie de professionnels qualifiés, puis propose des mesures d'optimisation correspondantes. Ces résultats peuvent fournir des références pratiques pour la transformation numérique de la gestion des ressources en eau dans les périmètres irrigués du monde entier.

Mots-clés : Digital Twin; Périmètres irrigués; Intelligence numérique; Gestion des ressources en eau d'irrigation.

SEASONAL FORECASTS FOR DECISION-MAKING IN MEDITERRANEAN AGRICULTURE

PRÉVISIONS SAISONNIÈRES POUR LA PRISE DE DÉCISION DANS L'AGRICULTURE MÉDITERRANÉENNE

Daniel Garcia[1], João Rolim[1], João Santos[2], and Paula Paredes[1]

ABSTRACT

Water scarcity is a growing challenge for Mediterranean agriculture, as climate change and variability intensify the imbalance between water availability and irrigation demand, making crop and water management increasingly complex. Uninformed or delayed decisions often lead to economic and environmental losses, highlighting the need for tools that support early decision-making. This study assesses the performance of ECMWF SEAS5 seasonal weather forecasts (SF) and their potential to estimate crop cycles and irrigation requirements in the Mediterranean region. Daily ensemble forecasts with a seven-month lead time (April-October) were analysed for Coruche, Central Portugal, using 1987-2016 as baseline and 2017-2024 for evaluation. The AgERA5 reanalysis dataset, bias-corrected with observational data, served as reference.

Forecasts were evaluated for accumulated precipitation and reference evapotranspiration (ET_o), with indirect validation through maize cycle duration, estimated with the growing degree days approach, and crop water needs using a simplified water balance. Results showed that precipitation exhibited a modest probabilistic skill (CRPSS = 0.13), with no systematic bias but high ensemble spread (CV = 34%), reflecting its inherently low seasonal predictability in the Mediterranean region. ET_o and crop-related forecasts exhibited higher anomaly correlations (ACC = 0.69-0.83) but may have suffered from a systematic cold bias, driving consistent underestimation of ET_o and crop water needs (~8%), maize cycle overestimation (~11 days), and probabilistic skill equal or below the climatological reference. Overall, this study demonstrates that SF integration into crop and water balance models can improve early-season predictions of crop development and water needs. The primary limitation identified was not an absence of dynamic predictability but likely the systematic cold biases, suggesting that SF corrections could substantially improve operational usability. Further research should address these biases and extend assessments across broader Mediterranean agricultural contexts.

Keywords: Climate variability; Crop development; Irrigation requirements; Portugal; Maize.

RÉSUMÉ

La rareté de l'eau constitue un défi croissant pour l'agriculture méditerranéenne, car le changement et la variabilité climatiques accentuent le déséquilibre entre la disponibilité en eau et la demande d'irrigation, rendant la gestion des cultures et de l'eau de plus en plus complexe. Des décisions insuffisamment éclairées ou tardives entraînent souvent des pertes économiques et environnementales, ce qui souligne la nécessité d'outils favorisant une prise

1 LEAF - Linking Landscape, Environment, Agriculture and Food Research Center, Associate Laboratory TERRA, Instituto Superior de Agronomia, ISA, Universidade de Lisboa, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal, dgarcia@isa.ulisboa.pt, joaorolim@isa.utl.pt, pparedes@isa.ulisboa.pt

2 CITAB - Centre for the Research and Technology of Agro-Environmental and Biological Sciences, Inov4Agro - Institute for Innovation, Capacity Building, and Sustainability of Agri-Food Production, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, UTAD, P.O. Box 1013, 5000-801 Vila Real, Portugal, jsantos@utad.pt

de décision précoce. Cette étude évalue les performances des prévisions météorologiques saisonnières ECMWF SEAS5 (SF) et leur capacité à estimer les cycles culturaux et les besoins d'irrigation dans la région méditerranéenne. Des prévisions journalières d'ensemble, avec une échéance de sept mois (avril-octobre), ont été analysées pour Coruche, dans le centre du Portugal, en utilisant la période 1987-2016 comme référence et la période 2017-2024 pour l'évaluation. Le jeu de données de réanalyse AgERA5, corrigé des biais à l'aide de données d'observation, a servi de référence. Les prévisions ont été évaluées pour les précipitations cumulées et l'évapotranspiration de référence (ET_o), avec une validation indirecte au moyen de la durée du cycle du maïs, estimée par l'approche des degrés-jours de croissance, et des besoins en eau de la culture, calculés à l'aide d'un bilan hydrique simplifié. Les résultats ont montré que les précipitations présentaient une compétence probabiliste modeste (CRPSS = 0,13), sans biais systématique mais avec une forte dispersion de l'ensemble (CV = 34 %), ce qui reflète leur faible prévisibilité saisonnière intrinsèque dans la région méditerranéenne. Les prévisions de l'ET_o et celles liées aux cultures présentaient des corrélations d'anomalies plus élevées (ACC = 0,69-0,83), mais elles pourraient avoir été affectées par un biais froid systématique, entraînant une sous-estimation constante de l'ET_o et des besoins en eau des cultures (environ 8 %), une surestimation de la durée du cycle du maïs (environ 11 jours) et une compétence probabiliste égale ou inférieure à celle de la référence climatologique. Dans l'ensemble, cette étude montre que l'intégration des SF dans les modèles de culture et de bilan hydrique peut améliorer les prévisions, en début de saison, du développement des cultures et de leurs besoins en eau. La principale limite mise en évidence ne résidait pas dans une absence de prévisibilité dynamique, mais vraisemblablement dans les biais froids systématiques, ce qui laisse penser que la correction des SF pourrait améliorer sensiblement leur utilité opérationnelle. Des recherches complémentaires devraient corriger ces biais et étendre les évaluations à des contextes agricoles méditerranéens plus vastes.

Mots-clés : Variabilité climatique; Développement des cultures; Besoins en irrigation; Portugal; Maïs.

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A NOVEL HIGH-PRECISION INTEGRATED MEASUREMENT AND CONTROL GATE

CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT D'UNE NOUVELLE VANNE INTÉGRÉE DE MESURE ET DE RÉGULATION DE HAUTE PRÉCISION

Ziming Li[1], Wenyong Wu[2], Yaqi Hu[3], and Aike Guo[4]

ABSTRACT

Against the global demand for intelligent water conservancy and refined open-channel management, this paper proposes a novel precision integrated flow measurement and control gate based on ultrasonic layered velocity measurement and dual-mode closed-loop control. The research aims to overcome the common defects of traditional integrated gates, including low accuracy caused by layered data missing, unstable measurement under variable water levels, and single control function. An improved open-channel ultrasonic flow calculation model is established using the travel-time difference method to measure layered velocity, combined with the sectional velocity-area method and embedded sluice orifice flow formula, which ensures high precision across full water-level conditions. To solve the problem of missing layered signals in field applications, the SAITS (Self-Attention-based Imputation for Time Series) model is adopted to reconstruct incomplete velocity data, significantly enhancing the robustness of the measurement system. The gate adopts modular hardware and software design, consisting of a main control unit, multi-layer ultrasonic acquisition, step motor drive, solar power supply, and 4G/LoRa communication. An adaptive PID algorithm is applied to realize autonomous switching and stable operation between constant water level control and constant flow control. The mechanical structure integrates an optimized gate body, sealed frame, actuating mechanism, and dedicated ultrasonic measurement column, featuring compact layout, reliable water stop, corrosion resistance, and easy installation. Experiments are conducted in a rectangular open channel with a length of 5.92m and a width of 1.00m. Results show that the SAITS imputation model achieves a MAPE of 1.77% under missing layers, and the overall flow measurement error is controlled within ±2%. This integrated gate effectively improves the accuracy, stability, and flexibility of open-channel measurement and control, providing a practical technical solution for intelligent water resources allocation and smart irrigation construction worldwide.

Keywords: Integrated Measurement and Control Gate, Precision Irrigation, Automatic Control, Water Resources Management, Irrigation District Modernization.

RÉSUMÉ

Face à la demande mondiale en faveur d'une gestion intelligente de l'eau et d'une gestion fine des canaux à surface libre, cet article propose une nouvelle vanne intégrée de mesure et de régulation précise du débit, fondée sur la mesure ultrasonore de la vitesse par couches et sur une commande en boucle fermée à deux modes. La recherche vise à remédier aux défauts

1 Assistant Professor, Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, China, E-mail:lizm@iwhr.com
2 Professor, Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, China, E-mail:wenyongwu@126.com
3 Assistant Professor, Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, China, E-mail:huyaqi@iwhr.com
4 Doctor, Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, China

courants des vannes intégrées classiques, notamment la faible précision due à l'absence de données pour certaines couches, l'instabilité des mesures lorsque le niveau d'eau varie et la présence d'une seule fonction de commande. Un modèle amélioré de calcul ultrasonore du débit en canal à surface libre est établi : il utilise la méthode de la différence des temps de parcours pour mesurer la vitesse par couches, combinée à la méthode vitesse-section et à une formule intégrée d'écoulement par orifice de vanne, ce qui garantit une grande précision sur toute la plage des niveaux d'eau. Pour résoudre le problème des signaux de couches manquants dans les applications de terrain, le modèle SAITS (Self-Attention-based Imputation for Time Series) est utilisé afin de reconstituer les données de vitesse incomplètes, ce qui renforce sensiblement la robustesse du système de mesure. La vanne adopte une conception modulaire du matériel et du logiciel, comprenant une unité de commande principale, un dispositif d'acquisition ultrasonore multicouche, un entraînement par moteur pas à pas, une alimentation solaire et des communications 4G/LoRa. Un algorithme PID adaptatif permet le basculement autonome et le fonctionnement stable entre la régulation à niveau d'eau constant et la régulation à débit constant. La structure mécanique intègre un corps de vanne optimisé, un cadre étanche, un mécanisme d'actionnement et une colonne dédiée à la mesure ultrasonore ; elle se caractérise par une disposition compacte, une étanchéité fiable, une résistance à la corrosion et une installation aisée. Des essais ont été réalisés dans un canal rectangulaire à surface libre de 5,92 m de long et de 1,00 m de large. Les résultats montrent que le modèle d'imputation SAITS atteint une MAPE de 1,77 % lorsque des couches sont manquantes et que l'erreur globale de mesure du débit reste comprise dans une plage de ±2 %. Cette vanne intégrée améliore efficacement la précision, la stabilité et la souplesse de la mesure et de la régulation en canal à surface libre, et offre ainsi une solution technique pratique pour la répartition intelligente des ressources en eau et le développement de l'irrigation intelligente à l'échelle mondiale.

Mots-clés : Vanne de mesure et de contrôle intégrée; Irrigation de precision; Contrôle automatique; Gestion des ressources en eau; Modernisation du perimètre irrigué.

VEGETATION BLOCKAGE ASSESSMENT FOR IRRIGATION CHANNELS USING COMPUTER VISION

ÉVALUATION DE L'OBSTRUCTION DES CANAUX D'IRRIGATION PAR LA VÉGÉTATION AU MOYEN DE LA VISION PAR ORDINATEUR

Kai-Yu Cheng[1], and Bing-Chen Jhong[2]

ABSTRACT

Climate change has increased the frequency and intensity of extreme rainfall events, placing greater hydraulic pressure on agricultural irrigation and drainage channels. Although vegetation within channels provides ecological benefits, excessive vegetation growth can reduce conveyance capacity and increase flow resistance. Current maintenance practices still rely largely on visual field inspections, which are labor-intensive and lack quantitative evaluation criteria. To address this issue, this study proposes a vegetation Blockage Index (BI) based on frontal projected area (FPA) analysis and computer vision techniques. The framework integrates Depth Anything and YOLOv8-seg in three stages: monocular depth estimation for channel geometry reconstruction and distant vegetation filtering, vegetation segmentation into herbaceous, shrub, and arboreal classes, and gridded FPA analysis within the effective flow conveyance region. A resistance-weighted BI is then calculated using class-specific FPA distributions to represent vegetation-induced hydraulic blockage conditions. Results show that the proposed framework can reduce subjectivity in maintenance assessment while improving evaluation consistency and efficiency. In addition, the method provides spatial visualization of vegetation blockage conditions along channel reaches, allowing identification of sections with relatively high hydraulic resistance. Compared with conventional field inspections, the proposed approach enables continuous and high-resolution assessment along the channel length and supports more targeted vegetation maintenance. The framework provides an objective assessment tool for irrigation channel vegetation management under increasing hydraulic stress conditions.

Keywords: Irrigation and Drainage, Channel Maintenance, Blockage Index, YOLOv8-seg, Monocular Depth Estimation.

RÉSUMÉ

Le changement climatique a accru la fréquence et l'intensité des épisodes de précipitations extrêmes, ce qui soumet les canaux agricoles d'irrigation et de drainage à une pression hydraulique plus forte. Bien que la végétation présente dans les canaux procure des avantages écologiques, sa croissance excessive peut réduire la capacité de transport et augmenter la résistance à l'écoulement. Les pratiques d'entretien actuelles reposent encore largement sur des inspections visuelles de terrain, qui nécessitent beaucoup de main-d'œuvre et ne disposent pas de critères d'évaluation quantitatifs. Pour remédier à ce problème, cette étude propose un indice d'obstruction par la végétation (BI), fondé sur l'analyse de l'aire projetée frontale (FPA) et sur des techniques de vision par ordinateur. Le cadre intègre Depth Anything et YOLOv8-seg en trois étapes : l'estimation monoculaire de la profondeur pour reconstruire la géométrie du canal et filtrer la végétation éloignée ; la segmentation de la végétation en classes herbacée, arbustive et arborée ; et l'analyse maillée de la FPA dans la zone utile

1 Department of Marine Environment and Engineering, National Sun Yat-sen University, Kaohsiung 80424, Taiwan (R.O.C.), Email: kylecheng930618@gmail.com

2 Department of Marine Environment and Engineering, National Sun Yat-sen University, Kaohsiung 80424, Taiwan (R.O.C.), E-mail: jhongbc@mail.nsysu.edu.tw

de transport de l'écoulement. Un BI pondéré par la résistance est ensuite calculé à partir des distributions de la FPA propres à chaque classe, afin de représenter les conditions d'obstruction hydraulique dues à la végétation. Les résultats montrent que le cadre proposé peut réduire la subjectivité de l'évaluation de l'entretien tout en améliorant la cohérence et l'efficacité de cette évaluation. En outre, la méthode fournit une visualisation spatiale des conditions d'obstruction par la végétation le long des tronçons de canal, ce qui permet de repérer les sections présentant une résistance hydraulique relativement élevée. Par rapport aux inspections de terrain classiques, l'approche proposée permet une évaluation continue et à haute résolution sur toute la longueur du canal, et favorise un entretien plus ciblé de la végétation. Ce cadre constitue un outil d'évaluation objectif pour gérer la végétation des canaux d'irrigation dans un contexte de contraintes hydrauliques croissantes.

Mots-clés : Irrigation et drainage; Entretien des canaux; Indice de blocage; YOLOv8-seg; Estimation de la profondeur monoculaire.

A NOVEL APPROACH TO WATERSHED WATER BALANCE USING ADVANCED PADDY WATER METRICS

UNE NOUVELLE APPROCHE DU BILAN HYDRIQUE À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT AU MOYEN DE MÉTRIQUES HYDRIQUES AVANCÉES DES RIZIÈRES

Dong-Hyun Yoon[1], and Won-Ho Nam[2]

ABSTRACT

Quantifying agricultural water balance is essential for effective irrigation management and water policy design. In South Korea, however, national-scale assessments are often constrained by simplified assumptions, including fixed return-flow ratios, integrated treatment of reservoirs and river facilities, and omission of river water balance processes. This study presents a watershed-scale agricultural water balance framework that integrates individual hydraulic structures with river systems in rural water districts and applies updated paddy water requirements reflecting current cultivation practices. The framework was applied to the Anseongcheon mid-watershed and validated using 5-day streamflow observations at eight gauging sites, showing satisfactory performance ($R^2 \geq 0.81$, NSE ≥ 0.65). Water balance components including supply rate, shortage characteristics, and return-flow ratio were evaluated across ten rural water districts over a 50-year simulation period (1975–2024). The estimated return-flow ratio ranged from approximately 20% to 60%, indicating substantial seasonal and inter-annual variability beyond conventional fixed-ratio assumptions. Results further showed that both facility-level supply-network representation and paddy water demand assumptions significantly influence watershed water balance outcomes. These findings suggest that incorporating distributed hydraulic structures and river-network connectivity can improve agricultural water balance assessment in managed irrigation systems. The proposed framework provides a practical and transferable approach for watershed-scale agricultural water management and may support improved drought response and irrigation planning under changing hydroclimatic conditions.

Keywords: Agricultural water balance; Paddy water requirement; Return-flow ratio; Rural water district; Watershed hydrology; Irrigation water management.

RÉSUMÉ

La quantification du bilan hydrique agricole est essentielle à une gestion efficace de l'irrigation et à la conception des politiques de l'eau. En Corée du Sud, toutefois, les évaluations à l'échelle nationale sont souvent limitées par des hypothèses simplificatrices, notamment l'emploi de rapports fixes de retour d'eau, le traitement intégré des réservoirs et des ouvrages fluviaux, ainsi que l'omission des processus de bilan hydrique des cours d'eau. Cette étude présente un cadre de bilan hydrique agricole à l'échelle du bassin versant qui intègre les ouvrages hydrauliques individuels aux réseaux fluviaux dans les districts hydrauliques ruraux et applique des besoins en eau des rizières actualisés afin de refléter les pratiques culturales actuelles. Le cadre a été appliqué au sous-bassin versant d'Anseongcheon et validé à l'aide d'observations du débit à pas de cinq jours sur huit stations de jaugeage, avec des performances satisfaisantes ($R^2 \geq 0{,}81$; NSE ≥ 0,65). Les composantes du bilan

1 Senior Researcher, National Agricultural Water Research Center, Hankyong National University, Republic of Korea, donghyun.yoon@hknu.ac.kr

2 Professor, School of Social Safety and Systems Engineering, National Agricultural Water Research Center, Hankyong National University, Republic of Korea, wonho.nam@hknu.ac.kr

hydrique, notamment le taux d'approvisionnement, les caractéristiques des pénuries et le rapport de retour d'eau, ont été évaluées dans dix districts hydrauliques ruraux sur une période de simulation de 50 ans (1975–2024). Le rapport de retour d'eau estimé variait d'environ 20 % à 60 %, révélant une variabilité saisonnière et interannuelle importante qui dépasse les hypothèses conventionnelles fondées sur un rapport fixe. Les résultats montrent également que la représentation du réseau d'approvisionnement à l'échelle des ouvrages et les hypothèses relatives à la demande en eau des rizières influent fortement sur les résultats du bilan hydrique du bassin versant. Ces constatations indiquent que la prise en compte des ouvrages hydrauliques distribués et de la connectivité du réseau fluvial peut améliorer l'évaluation du bilan hydrique agricole dans les systèmes d'irrigation aménagés. Le cadre proposé constitue une approche pratique et transférable de la gestion de l'eau agricole à l'échelle du bassin versant et peut contribuer à améliorer la réponse aux sécheresses et la planification de l'irrigation dans un contexte d'évolution des conditions hydroclimatiques.

Mots-clés : Bilan hydrique agricole; Besoins en eau des rizières; Rapport retour-débit; Périmètre hydraulique rural; Hydrologie des bassins versants; Gestion de l'eau d'irrigation.

COMPREHENSIVE SIMULATION OF COTTON PRODUCTION UNDER INITIAL SOIL SALINITY SPATIAL VARIABILITY CONDITIONS: ASSESSING THE EFFECT OF DRIP HYDRAULIC PERFORMANCE AT THE SUBUNIT LEVEL

SIMULATION GLOBALE DE LA PRODUCTION DE COTON DANS DES CONDITIONS DE VARIABILITÉ SPATIALE DE LA SALINITÉ INITIALE DU SOL: ÉVALUATION DE L'EFFET DES PERFORMANCES HYDRAULIQUES DU GOUTTE-À-GOUTTE À L'ÉCHELLE DE LA SOUS-UNITÉ

Zhen Wang*[1], Zhanghao Sun[1, 2], and Jiusheng Li[1]

ABSTRACT

Highly initial soil salinity is a critical factor constraining agricultural sustainability in arid regions. Field soils generally exhibit substantial spatial variability in salinity at the drip subunit level, but appropriate design standards for drip hydraulic performance under this condition remain to be explored further. Multiple process at the subunit level, including water delivery in drip networks, soil water/solute transport, and crop growth, were simulated through a coupled model under conditions of spatial variability in soil salinity. The results indicated that the spatial distributions of the soil water content, EC_e, and cotton yield within the subunits exhibited spatial structures similar to those of drip hydraulic performance under low initial soil salinity. As the initial soil EC_e and its variability increase, the initial soil salinity conditions progressively become the dominant factor governing the distribution patterns of the three indices. The increase in initial salinity exacerbated the nonuniformity of the EC_e during the irrigation period, with an average 27% decrease in salinity uniformity as the initial EC_e variability increased from 20% to 60%. The deterioration of initial salinity conditions severely restricts cotton production, with both the subunit yield and yield uniformity beginning to decline significantly when the initial salinity level and its variability exceed 6.78 dS m^{-1} and 33%, respectively. The increase in drip hydraulic performance optimized the spatial distribution of soil water/salinity during the irrigation period, with the uniformity of the soil water content and EC_e increasing by 5% and 7%, respectively, when the drip hydraulic performance improved from 72% to 93%. A well–designed drip irrigation system created an optimal soil water/salt environment for cotton growth, achieving up to a 5% (6%) improvement in yield (yield uniformity) at the subunit level. In summary, the optimization of drip hydraulic performance remained highly adaptable for enhancing cotton production in subunits with severe initial soil salinity conditions, with a hydraulic uniformity of 83% recommended as the design standard under such conditions.

Keywords: Drip subunit; Coupled model; Spatial variability; Distribution uniformity; Design standard.

RÉSUMÉ

Une salinité initiale élevée du sol constitue un facteur critique limitant la durabilité de l'agriculture dans les régions arides. Les sols agricoles présentent généralement une forte variabilité spatiale de la salinité à l'échelle de la sous-unité de goutte-à-goutte, mais les normes de conception appropriées pour les performances hydrauliques du goutte-à-goutte

1 State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, China, Email: wangzhen-686@163.com (Wang Z.); 15733223580@163.com (Sun Z.); jiushengli@126.com (Li J.)

2 Department of Hydraulic Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou, China

dans ces conditions doivent encore être approfondies. Plusieurs processus à l'échelle de la sous-unité, notamment l'acheminement de l'eau dans les réseaux de goutte-à-goutte, le transport de l'eau et des solutés dans le sol et la croissance des cultures, ont été simulés au moyen d'un modèle couplé dans des conditions de variabilité spatiale de la salinité du sol. Les résultats indiquent que, lorsque la salinité initiale du sol est faible, les distributions spatiales de la teneur en eau du sol, de l'EC_e et du rendement du coton au sein des sous-unités présentent des structures spatiales similaires à celles des performances hydrauliques du goutte-à-goutte. À mesure que l'EC_e initiale du sol et sa variabilité augmentent, les conditions initiales de salinité du sol deviennent progressivement le facteur dominant qui régit les modes de distribution des trois indices. L'augmentation de la salinité initiale a accentué la non-uniformité de l'EC_e pendant la période d'irrigation, l'uniformité de la salinité diminuant en moyenne de 27 % lorsque la variabilité initiale de l'EC_e passait de 20 % à 60 %. La dégradation des conditions initiales de salinité limite fortement la production de coton : le rendement de la sous-unité et son uniformité commencent tous deux à diminuer de manière significative lorsque le niveau initial de salinité et sa variabilité dépassent respectivement 6,78 dS m^{-1} et 33 %. L'amélioration des performances hydrauliques du goutte-à-goutte a optimisé la distribution spatiale de l'eau et de la salinité du sol pendant la période d'irrigation; l'uniformité de la teneur en eau du sol et celle de l'EC_e ont augmenté respectivement de 5 % et 7 % lorsque les performances hydrauliques du goutte-à-goutte sont passées de 72 % à 93 %. Un système d'irrigation goutte à goutte bien conçu a créé un environnement hydrique et salin optimal pour la croissance du coton, permettant une amélioration allant jusqu'à 5 % du rendement et 6 % de son uniformité à l'échelle de la sous-unité. En résumé, l'optimisation des performances hydrauliques du goutte-à-goutte demeure très adaptée à l'amélioration de la production de coton dans les sous-unités soumises à des conditions sévères de salinité initiale du sol ; une uniformité hydraulique de 83 % est recommandée comme norme de conception dans de telles conditions.

Mots-clés : Sous-unité de goutte; Modèle couplé; Variabilité spatiale; Uniformité de distribution; Standard de conception.

SYNERGIZING MACHINE LEARNING AND SYSTEM DYNAMICS FOR ADAPTIVE WATER MANAGEMENT IN AGRICULTURAL RESERVOIRS

MISE EN SYNERGIE DE L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE ET DE LA DYNAMIQUE DES SYSTÈMES POUR UNE GESTION ADAPTATIVE DE L'EAU DANS LES RÉSERVOIRS AGRICOLES

Mi-Hye Yang[1], and Won-Ho Nam[2]

ABSTRACT

The increasing frequency and severity of droughts associated with climate change have intensified the need for prediction-based decision-making in agricultural reservoir management. Although machine learning models effectively capture nonlinear hydrological relationships, their prediction uncertainty often increases during rapid storage fluctuations, limiting operational reliability under drought conditions. This study proposes an integrated modeling framework that combines machine learning-based storage prediction, residual correction, and System Dynamics (SD)-based operational simulation for adaptive drought management in agricultural reservoirs. The framework was developed using dekadal (10-day interval) reservoir storage data. The primary prediction model employed gradient boosting-based ensemble learning to simulate nonlinear storage dynamics, while temporally correlated prediction errors were corrected using a recurrent neural network (RNN)-based auxiliary model trained on lagged residual sequences. The corrected storage trajectories were subsequently coupled with an SD model to evaluate threshold-based operational interventions under drought conditions. Reservoir storage was represented as a state variable, and intervention scenarios were simulated by adjusting storage decline rates through a control coefficient. The proposed framework was applied to the Sinjeong Reservoir in Asan, South Korea. Results showed that the hybrid gradient boosting-LSTM model achieved a prediction RMSE of 7.1%p during the 2024 irrigation season. Under a hypothetical severe drought scenario based on 2021 conditions, SD simulations indicated that interventions initiated during the second dekad of July could reduce end-of-season storage decline by 2.9–25.9 percentage points depending on intervention intensity (α = 0.10–0.90). The results demonstrate that early intervention substantially outperforms delayed response, highlighting the potential of integrated machine learning and SD frameworks for adaptive drought operation in aging agricultural reservoir systems.

Keywords: Agricultural reservoir management; Hybrid machine learning; System dynamics; Reservoir storage prediction; Adaptive drought operation; Decision support.

RÉSUMÉ

L'augmentation de la fréquence et de la gravité des sécheresses associées au changement climatique a renforcé la nécessité d'une prise de décision fondée sur la prévision pour la gestion des réservoirs agricoles. Bien que les modèles d'apprentissage automatique capturent efficacement les relations hydrologiques non linéaires, l'incertitude de leurs prévisions augmente souvent lors de fluctuations rapides du stockage, ce qui limite leur fiabilité opérationnelle en période de sécheresse. Cette étude propose un cadre de modélisation intégré combinant la prévision du stockage fondée sur l'apprentissage automatique, la

1 Ph.D. student, Department of Integrated Systems Engineering, Hankyong National University, Republic of Korea: mihye.yang@hknu.ac.kr

2 Professor, School of Social Safety and Systems Engineering, National Agricultural Water Research Center, Hankyong National University, Republic of Korea: wonho.nam@hknu.ac.kr

correction des résidus et une simulation opérationnelle fondée sur la dynamique des systèmes (SD), en vue d'une gestion adaptative de la sécheresse dans les réservoirs agricoles. Le cadre a été élaboré à partir de données de stockage des réservoirs à l'échelle décadaire (intervalle de 10 jours). Le modèle de prévision principal reposait sur un apprentissage d'ensemble par boosting de gradient afin de simuler la dynamique non linéaire du stockage, tandis que les erreurs de prévision corrélées dans le temps ont été corrigées au moyen d'un modèle auxiliaire fondé sur un réseau neuronal récurrent (RNN), entraîné sur des séquences de résidus décalés. Les trajectoires de stockage corrigées ont ensuite été couplées à un modèle SD afin d'évaluer des interventions opérationnelles fondées sur des seuils en conditions de sécheresse. Le stockage du réservoir a été représenté comme une variable d'état, et les scénarios d'intervention ont été simulés en ajustant les taux de diminution du stockage au moyen d'un coefficient de contrôle. Le cadre proposé a été appliqué au réservoir de Sinjeong, à Asan, en Corée du Sud. Les résultats montrent que le modèle hybride de boosting de gradient-LSTM a atteint une RMSE de prévision de 7,1 points de pourcentage pendant la saison d'irrigation 2024. Dans un scénario hypothétique de sécheresse sévère fondé sur les conditions de 2021, les simulations SD indiquent que des interventions amorcées au cours de la deuxième décade de juillet pourraient réduire la baisse du stockage en fin de saison de 2,9 à 25,9 points de pourcentage, selon l'intensité de l'intervention (α = 0,10–0,90). Les résultats démontrent qu'une intervention précoce est nettement plus efficace qu'une réponse tardive, ce qui met en évidence le potentiel des cadres intégrant l'apprentissage automatique et la dynamique des systèmes pour l'exploitation adaptative des réservoirs agricoles vieillissants en période de sécheresse.

Mots-clés : Gestion des réservoirs agricoles; Apprentissage automatique hybride; Dynamique des systèmes; Prédiction du stockage des réservoirs; Fonctionnement adaptatif en cas de sécheresse; Aide à la decision.

PARTICIPATORY WATER RESOURCES MANAGEMENT FOR SUSTAINABLE AGRICULTURAL WATER ALLOCATION: A CASE STUDY OF THE MARUN-JARAHI BASIN, SOUTHWEST IRAN

GESTION PARTICIPATIVE DES RESSOURCES EN EAU POUR UNE ALLOCATION DURABLE DE L'EAU AGRICOLE : ÉTUDE DE CAS DU BASSIN DE MARUN-JARAHI, DANS LE SUD-OUEST DE L'IRAN

Ali Shahbazi *[1], Abbas Sadrianfar[2], Ali Sharifi[3], Fatemeh Zakerihosseini[4], Arash Mahjobi[5], Nooroddin Bazgir[6], Narges Zohrabi[7], Masoud Asadi[8], and Seyyed Hossein Mousavi[9]

ABSTRACT

Sustainable water resources management in arid and semi-arid regions has become one of the most complex governance challenges of the twenty-first century, driven by intensifying climate variability and growing competition among water-use sectors. While traditional, centralized management approaches are no longer sufficient to cope with hydrological uncertainty and rising social demands, emerging governance paradigms emphasize the integration of technical planning, stakeholder participation, and multi-level dialogue. This paper examines the design, implementation, and evolution of a participatory management structure in the Marun-Jarahi basin in southwest Iran. This structure emerged in response to the severe 2021 drought and the ensuing social tensions caused by water scarcity, unequal resource distribution, and declining public trust in water management processes, and matured through a gradual four-year process. Using a parallel, participation-based approach, it involved representatives of the counties located along the Marun River, including county governors, representatives of agricultural unions, progressive farmers, and water allocation and planning managers, in decision-making, planning, implementation, and monitoring processes.

In this model, the county was selected as the smallest unit of participation in order to preserve social convergence and practical consensus while preventing excessive growth in the number of stakeholders and the complexity of decision-making. Participatory management meetings were held at key stages of water resources and water allocation management, including seasonal cropping plans, water releases, irrigation scheduling, and inter-county water allocation. The decision-making process was based on integrating technical analyses, climate forecasts, hydrological data, and direct stakeholder participation in risk assessment and the formulation of implementation plans. Implementation monitoring was carried out using a hydrometric network, satellite imagery, and drone-based systems, and the data were shared transparently among members of the participatory management task force.

The results showed that implementing this structure led to improved water use efficiency, strengthened food security, and better water governance indicators in the basin. Production

1 Deputy of Comprehensive Water Resources Studies, Khuzestan Water and Power Authority (K.W.P.A), Iran, Email: alish1980@gmail.com(Corresponding Author)
2 CEO and Chairman of the Board of Directors, (K.W.P.A), Iran.
3 Director of Reservoir and River Planning Management, (K.W.P.A), Iran.
4 Director of Water Resources Integration and Accounting Group, (K.W.P.A), Iran. Email:zakerfatemeh@gmail.com
5 Deputy of Irrigation and Drainage Networks, (K.W.P.A), Iran. Email: Arashmahjoobi@Gmail.com
6 Deputy of Water Resources Protection and Utilization, (K.W.P.A), Iran.
7 Associate Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, Email: narges.zohrabi@iau.ac.ir, nargezohrabi@gmail.com
8 Chairman of the Khuzestan Agricultural Farmers Guild, Iran.
9 Chairman of the Coordination Council of Agricultural Guilds of Khuzestan Province, Iran.

of strategic autumn crops, especially wheat, increased significantly under reduced water consumption conditions; water-intensive crops such as rice were removed from the basin cropping pattern through stakeholder consensus; and the sustainable supply of water to the vulnerable date palm groves of Shadegan was maintained even under severe drought conditions. In addition, information transparency, direct stakeholder participation, and the creation of a shared understanding of water resource constraints contributed to improved water equity, increased public trust, and enhanced social stability. This study shows that participatory governance within the IWRM framework can be an effective strategy for strengthening socio-hydrological resilience, improving drought management, and reducing water-related conflicts in stressed basins.

Keywords: participatory water governance, IWRM, stakeholder participation, Marun-Jarahi basin, Iran, drought management, socio-hydrological resilience.

RÉSUMÉ

La gestion durable des ressources en eau dans les régions arides et semi-arides est devenue l'un des défis de gouvernance les plus complexes du XXIe siècle, sous l'effet de l'intensification de la variabilité climatique et de la concurrence croissante entre les secteurs utilisateurs de l'eau. Alors que les approches traditionnelles et centralisées de gestion ne suffisent plus à faire face à l'incertitude hydrologique et à l'augmentation des demandes sociales, les nouveaux paradigmes de gouvernance mettent l'accent sur l'intégration de la planification technique, de la participation des parties prenantes et du dialogue à plusieurs niveaux. Cet article examine la conception, la mise en œuvre et l'évolution d'une structure de gestion participative dans le bassin de Marun-Jarahi, dans le sud-ouest de l'Iran. Cette structure est apparue en réponse à la grave sécheresse de 2021 et aux tensions sociales qui ont suivi, provoquées par la rareté de l'eau, la répartition inégale des ressources et le recul de la confiance du public dans les processus de gestion de l'eau ; elle a ensuite mûri progressivement pendant quatre ans. Fondée sur une approche parallèle et participative, elle a associé aux processus de prise de décision, de planification, de mise en œuvre et de suivi des représentants des comtés situés le long de la rivière Marun, notamment les gouverneurs de comté, les représentants des syndicats agricoles, les agriculteurs pionniers ainsi que les responsables de l'allocation de l'eau et de la planification.

Dans ce modèle, le comté a été retenu comme plus petite unité de participation afin de préserver la convergence sociale et le consensus pratique, tout en évitant une augmentation excessive du nombre de parties prenantes et de la complexité du processus décisionnel. Des réunions de gestion participative ont été organisées aux étapes clés de la gestion des ressources et de l'allocation de l'eau, notamment pour les plans culturaux saisonniers, les lâchers d'eau, la programmation de l'irrigation et l'allocation de l'eau entre comtés. Le processus décisionnel reposait sur l'intégration d'analyses techniques, de prévisions climatiques, de données hydrologiques et de la participation directe des parties prenantes à l'évaluation des risques et à l'élaboration des plans de mise en œuvre. Le suivi de la mise en œuvre a été assuré au moyen d'un réseau hydrométrique, d'images satellitaires et de systèmes fondés sur des drones, et les données ont été partagées en toute transparence entre les membres du groupe de travail sur la gestion participative.

Les résultats montrent que la mise en œuvre de cette structure a amélioré l'efficience d'utilisation de l'eau, renforcé la sécurité alimentaire et fait progresser les indicateurs de gouvernance de l'eau dans le bassin. La production des cultures stratégiques d'automne, en particulier du blé, a augmenté de manière significative malgré une réduction de la consommation d'eau ; les cultures à forte consommation d'eau, comme le riz, ont été retirées du schéma cultural du bassin par consensus des parties prenantes ; et l'approvisionnement durable en eau des palmeraies dattières vulnérables de Shadegan a été maintenu même

dans des conditions de sécheresse sévère. En outre, la transparence de l'information, la participation directe des parties prenantes et la création d'une compréhension commune des contraintes liées aux ressources en eau ont contribué à améliorer l'équité dans l'accès à l'eau, à accroître la confiance du public et à renforcer la stabilité sociale. Cette étude montre que la gouvernance participative dans le cadre de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) peut constituer une stratégie efficace pour renforcer la résilience sociohydrologique, améliorer la gestion de la sécheresse et réduire les conflits liés à l'eau dans les bassins soumis à de fortes pressions.

Mots-clés : Gouvernance participative de l'eau; IWRM; Participation des parties prenantes; Bassin de Marun-Jarahi; Iran; Gestion de la sécheresse; Résilience socio-hydrologique.

SOIL SALINITY MAPPING USING POINT TO FIELD LEVEL REMOTE SENSING TECHNIQUES

CARTOGRAPHIE DE LA SALINITÉ DES SOLS AU MOYEN DE TECHNIQUES DE TÉLÉDÉTECTION, DE L'ÉCHELLE PONCTUELLE À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE

José L. Chávez[1], Muhammad Fawad[2], Kieri Karpa[3], Timothy K. Gates[4], Allan A. Andales[5] and Huihui Zhang[6]

ABSTRACT

Soil salinity constrains crop production in irrigated, semi-arid regions by reducing plant water uptake, altering nutrient availability, and potentially degrading soil structure. In Colorado's South Platte River Basin (SPRB), salinity risk is shaped by an intensively managed stream–aquifer system, irrigation return flows through salt-bearing geologic formations, shallow groundwater, and progressive reuse of water as it moves downstream. This paper presents a multi-scale study effort to map soil salinity expressed as electrical conductivity of the saturated paste extract (EC_e, dS/m) by linking point observations, field-scale ground surveys, satellite remote sensing, and controlled-environment hyperspectral data analysis. Two existing remote sensing-based soil salinity algorithms were evaluated using Landsat 8/9 (2000–2023) and PlanetDove mini-satellites (2020–2024) surface reflectance products, depicting a weak transferability to the SPRB conditions. In a first phase, locally calibrated, crop-specific regression EC_e models were then developed for irrigated maize using vegetation indices (NDVI, Crop Response to Salinity Index, and Crop Water Stress Index) combined with weather variables, producing improved performance with R^2 values approaching 0.64 and normalized errors near 6% for the best EC_e model. Then, in a second phase, a greenhouse experiment (five irrigation-water salinity levels) was implemented to identify salinity effects on maize plants across the hyperspectral (350–2500 nm) electro-magnetic spectrum. Sensitivity analyses helped identify salinity-sensitive visible-edge and near-infrared (VIS/NIR) wavelengths and supported selection of several greenhouse-derived wavelengths (bandwidths) for future field EC_e modeling. Using field leaf spectra paired with location-specific soil EC_e observations and leave-one-out cross-validation, preliminary candidate equations achieved small errors (RMSE ≈ 0.71 dS m^{-1}), but normalized errors remained somewhat high, indicating the need for expanded ground truth and independent validation before operational mapping can be implemented at a large scale.

Keywords: Soil salinity mapping; Remote sensing techniques; Semi-arid regions; Reuse of water; Salinity effects on maize plants.

1 Civil and Environmental Department, Colorado State University, 1372 Campus Delivery, Fort Collins, Colorado, United States Email: jose.chavez@colostate.edu
2 Civil and Environmental Department, Colorado State University, 1372 Campus Delivery, Fort Collins, Colorado, United States Email: muhammad.fawad@colostate.edu
3 Civil and Environmental Department, Colorado State University, 1372 Campus Delivery, Fort Collins, Colorado, United States Email: kieri.karpa@colostate.edu
4 Civil and Environmental Department, Colorado State University, 1372 Campus Delivery, Fort Collins, Colorado, United States Email: timothy.gates@colostate.edu
5 Soil and Crop Sciences Department, Colorado State University, Campus Delivery, Fort Collins, Colorado, United States Email: allan.andales@colostate.edu
6 Water Management and Systems Research Unit, USDA-Agricultural Research Service, 2150 Center Avenue, NRRC Building D, Fort Collins, Colorado, United States Email: huihui.zhang@usda.gov

RÉSUMÉ

La salinité des sols limite la production végétale dans les régions irriguées semi-arides en réduisant l'absorption de l'eau par les plantes, en modifiant la disponibilité des nutriments et en pouvant dégrader la structure du sol. Dans le bassin de la South Platte (SPRB), au Colorado, le risque de salinité est déterminé par un système cours d'eau–aquifère géré de manière intensive, par les retours d'irrigation traversant des formations géologiques salifères, par la faible profondeur de la nappe et par la réutilisation progressive de l'eau à mesure qu'elle s'écoule vers l'aval. Cet article présente une étude multi-échelle visant à cartographier la salinité du sol, exprimée par la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (EC_e, dS/m), en reliant des observations ponctuelles, des relevés de terrain à l'échelle de la parcelle, la télédétection satellitaire et l'analyse de données hyperspectrales en environnement contrôlé. Deux algorithmes existants de salinité des sols fondés sur la télédétection ont été évalués à l'aide de produits de réflectance de surface issus de Landsat 8/9 (2000–2023) et des minisatellites PlanetDove (2020–2024), ce qui a révélé une faible transférabilité aux conditions du SPRB. Dans une première phase, des modèles de régression de l'EC_e, étalonnés localement et propres au maïs irrigué, ont ensuite été élaborés au moyen d'indices de végétation (NDVI, Crop Response to Salinity Index et Crop Water Stress Index) combinés à des variables météorologiques ; les performances se sont améliorées, avec des valeurs de R^2 proches de 0,64 et des erreurs normalisées d'environ 6 % pour le meilleur modèle d'EC_e. Dans une deuxième phase, une expérience en serre comportant cinq niveaux de salinité de l'eau d'irrigation a été réalisée afin d'identifier les effets de la salinité sur les plants de maïs dans l'ensemble du spectre électromagnétique hyperspectral (350–2500 nm). Les analyses de sensibilité ont permis d'identifier des longueurs d'onde sensibles à la salinité dans la bordure du visible et le proche infrarouge (VIS/NIR), et ont guidé la sélection de plusieurs longueurs d'onde (bandes passantes) issues des essais en serre pour la future modélisation de l'EC_e au champ. À partir de spectres foliaires mesurés au champ, associés à des observations de l'EC_e du sol propres à chaque emplacement, et d'une validation croisée par retrait d'une observation, les premières équations candidates ont obtenu de faibles erreurs (RMSE ≈ 0,71 dS m^{-1}), mais les erreurs normalisées sont restées relativement élevées, ce qui indique qu'il faut davantage de données de terrain et une validation indépendante avant de pouvoir mettre en œuvre une cartographie opérationnelle à grande échelle.

Mots clés : Cartographie de la salinité des sols; Techniques de télédétection; Régions semi-arides; Réutilisation de l'eau; Effets de la salinité sur les plants de maïs.

ENHANCING FARM-LEVEL WATER EFFICIENCY AND CLIMATE RESILIENCE THROUGH AN INTELLIGENT IRRIGATION MANAGEMENT PLATFORM (IFARM)

AMÉLIORATION DE L'EFFICIENCE D'UTILISATION DE L'EAU À L'ÉCHELLE DE L'EXPLOITATION ET DE LA RÉSILIENCE CLIMATIQUE GRÂCE À UNE PLATEFORME INTELLIGENTE DE GESTION DE L'IRRIGATION (IFARM)

Somchai Donjadee[1], Varawoot Vudhivanich[2], Nimit Cherdchanpipat[3], and Phatchareeya Waiphara[4]*

ABSTRACT

Improving water use efficiency is necessary to sustain agricultural productivity and resilience under climate uncertainty. However, irrigation practices in rural Thailand still depend on farmer experience and conventional practices. This study presents the development of iFarm (Intelligent Farm), a smart irrigation management platform designed to improve water use efficiency, economic performance, and climate resilience at the farm level. The platform was developed and evaluated in agricultural areas of the Klong Suan Mak and Klong Klung river basins in Thailand, where the irrigation water availability is affected by climate variability. The system integrates IoT-based automated irrigation control, weather and rainfall forecasts, and satellite-derived information to estimate soil moisture depletion and determine irrigation requirements across 18 pilot farms.

Results from pilot fields indicated that iFarm improved irrigation system performance and water use efficiency. The average irrigation efficiency achieved across the study plots was 70%. During the rainy season of 2024 and the dry season of 2024–2025, water productivity was higher than 0.1 USD per cubic meter, which is higher than the national agricultural average of 0.06 USD per cubic meter reported in Thailand. These improvements were achieved through reductions in over-irrigation, minimization of water losses, and improved alignment between crop water demand and irrigation supply. Economic analysis highlights the feasibility and scalability of the iFarm system. The average installation cost was approximately 440 USD per plot, with an estimated payback period of 2.27 months. An ex-ante economic analysis indicated that the system is economically viable when operational efficiency is fully functional and farmer adoption rates exceed 40%. Under these conditions, the project generated a net present value (NPV) of 147,000 - 150,000 USD, benefit–cost ratios ranged from 3.51 to 3.54, and the internal rate of return was approximately 34%, indicating long-term economic potential.

Overall, iFarm provides an effective framework for evaluating and improving irrigation practices at the farm levels through the integration of technological innovation with decision-support platforms tailored to farmers' needs. The results indicate that iFarm is a feasible and scalable platform to improve water use efficiency, reduce production costs, and boost sustainable water resource management in climate-vulnerable areas.

Keywords: intelligent farm, irrigation management platform, water use efficiency.

1 Associated professor, Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen,Kasetsart University, Nakhon Pathom 73140, Thailand, E-mail: fengscd@ku.ac.th
2 Associated professor, Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Nakhon Pathom 73140, Thailand, E-mail: fengvwv@ku.ac.th
3 Assistant professor, Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Nakhon Pathom 73140, Thailand, E-mail: fengnmc@ku.ac.th
4 Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Nakhon Pathom 73140, Thailand, E-mail: fengpew@ku.ac.th

RÉSUMÉ

L'amélioration de l'efficience d'utilisation de l'eau est nécessaire pour préserver la productivité agricole et la résilience face à l'incertitude climatique. Cependant, les pratiques d'irrigation dans les zones rurales de Thaïlande reposent encore sur l'expérience des agriculteurs et sur des pratiques conventionnelles. Cette étude présente le développement d'iFarm (Intelligent Farm), une plateforme intelligente de gestion de l'irrigation conçue pour améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau, les performances économiques et la résilience climatique à l'échelle de l'exploitation. La plateforme a été développée et évaluée dans des zones agricoles des bassins des rivières Klong Suan Mak et Klong Klung, en Thaïlande, où la disponibilité de l'eau d'irrigation est affectée par la variabilité climatique. Le système intègre une commande automatisée de l'irrigation fondée sur l'Internet des objets (IoT), des prévisions météorologiques et pluviométriques ainsi que des informations dérivées des satellites, afin d'estimer l'épuisement de l'humidité du sol et de déterminer les besoins d'irrigation dans 18 exploitations pilotes.

Les résultats obtenus dans les parcelles pilotes indiquent qu'iFarm a amélioré les performances du système d'irrigation et l'efficience d'utilisation de l'eau. L'efficience moyenne de l'irrigation atteinte dans l'ensemble des parcelles étudiées était de 70 %. Pendant la saison des pluies 2024 et la saison sèche 2024–2025, la productivité de l'eau a dépassé 0,1 USD par mètre cube, soit une valeur supérieure à la moyenne agricole nationale de 0,06 USD par mètre cube rapportée en Thaïlande. Ces améliorations ont été obtenues grâce à la réduction de la surirrigation, à la diminution des pertes d'eau et à une meilleure adéquation entre les besoins en eau des cultures et l'apport d'irrigation. L'analyse économique met en évidence la faisabilité et l'évolutivité du système iFarm. Le coût moyen d'installation était d'environ 440 USD par parcelle, pour une période de récupération estimée à 2,27 mois. Une analyse économique ex ante a indiqué que le système est économiquement viable lorsque l'efficacité opérationnelle est pleinement assurée et que le taux d'adoption par les agriculteurs dépasse 40 %. Dans ces conditions, le projet a généré une valeur actualisée nette (VAN) de 147 000 à 150 000 USD, des ratios avantages-coûts compris entre 3,51 et 3,54, et un taux de rendement interne d'environ 34 %, ce qui indique un potentiel économique à long terme.

Dans l'ensemble, iFarm fournit un cadre efficace pour évaluer et améliorer les pratiques d'irrigation à l'échelle de l'exploitation, en intégrant l'innovation technologique à des plateformes d'aide à la décision adaptées aux besoins des agriculteurs. Les résultats indiquent qu'iFarm est une plateforme viable et évolutive permettant d'améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau, de réduire les coûts de production et de renforcer la gestion durable des ressources en eau dans les zones exposées aux aléas climatiques.

Mots-clés : Ferme intelligente; Plateforme de gestion d'irrigation; Efficacité de l'utilisation de l'eau.

USING DISTRIBUTION UNIFORMITY TO EVALUATE IRRIGATION PERFORMANCE UNDER FARMER-MANAGED CONDITIONS IN THE JORDAN VALLEY

UTILISATION DE L'UNIFORMITÉ DE DISTRIBUTION POUR ÉVALUER LES PERFORMANCES DE L'IRRIGATION EN CONDITIONS DE GESTION PAR LES AGRICULTEURS DANS LA VALLÉE DU JOURDAIN

S. Talozi[1], A. Namarneh[2], and S. Saleh[2]

ABSTRACT

Jordan is among the most water-scarce countries in the world, with annual renewable freshwater availability of approximately 61 m³ per capita, far below the absolute water scarcity threshold of 500 m³ per capita (MWI, 2023). Agriculture is the dominant water-consuming sector, making improvement of farm-level irrigation performance essential for water productivity and agricultural livelihoods. This study evaluated irrigation performance on 100 randomly selected farms across the Northern, Middle, and Southern Jordan Valley, covering citrus, greenhouse vegetables, open-field vegetables, and date palms under micro-irrigation systems. Emission uniformity (EU) was assessed through direct field measurements of emitter discharge and classified using the Merriam and Keller (1978) criteria. Irrigation supply adequacy was evaluated using Relative Water Supply (RWS) and Relative Irrigation Supply (RIS), with crop water requirements estimated using CROPWAT procedures based on FAO-56 methods (Allen et al., 1998).

EU values generally ranged from acceptable to excellent, indicating that the hydraulic condition of most micro-irrigation systems was technically adequate. However, farms applying similar seasonal water volumes did not necessarily achieve similar irrigation performance, as differences in emitter clogging, pressure variation, filter cleaning, line flushing, and leak repair affected water distribution uniformity. In several cases, technically adequate systems were still associated with over-irrigation or under-irrigation because scheduling was based on farmer experience and visual assessment rather than calculated crop water requirements. The findings demonstrate that micro-irrigation infrastructure alone is not sufficient to ensure efficient water use. Emission uniformity must be interpreted together with applied irrigation volume, crop water demand, maintenance practices, and scheduling behavior. The study highlights the need for practical irrigation scheduling tools, routine system maintenance, farmer record-keeping, and regular field-based uniformity assessment.

Keywords: emission uniformity; irrigation scheduling; maintenance practices; micro-irrigation; Jordan Valley; water productivity; relative water supply.

RÉSUMÉ

La Jordanie compte parmi les pays les plus pauvres en eau au monde, avec une disponibilité annuelle en eau douce renouvelable d'environ 61 m³ par habitant, très inférieure au seuil de pénurie d'eau absolue de 500 m³ par habitant (MWI, 2023). L'agriculture est le principal secteur consommateur d'eau, ce qui rend indispensable l'amélioration des performances de l'irrigation à l'échelle de l'exploitation pour accroître la productivité de l'eau et préserver les moyens de subsistance agricoles. Cette étude a évalué les performances de l'irrigation dans 100 exploitations sélectionnées aléatoirement dans les parties nord, centrale et sud de

1 Jordan University of Science and Technology, Civil Engineering, Irbid, Jordan
2 Methods for Irrigation and Agriculture, Amman, Jordan

la vallée du Jourdain, couvrant les agrumes, les légumes sous serre, les légumes de plein champ et les palmiers dattiers cultivés sous micro-irrigation. L'uniformité d'émission (EU) a été évaluée par des mesures directes du débit des émetteurs sur le terrain et classée selon les critères de Merriam et Keller (1978). L'adéquation de l'approvisionnement en eau d'irrigation a été évaluée au moyen de l'approvisionnement relatif en eau (RWS) et de l'approvisionnement relatif en eau d'irrigation (RIS), les besoins en eau des cultures étant estimés selon les procédures CROPWAT fondées sur les méthodes FAO-56 (Allen et al., 1998). Les valeurs d'EU se situaient généralement entre des niveaux acceptables et excellents, ce qui indique que l'état hydraulique de la plupart des systèmes de micro-irrigation était techniquement adéquat. Toutefois, des exploitations appliquant des volumes d'eau saisonniers similaires n'obtenaient pas nécessairement des performances d'irrigation comparables, car l'obstruction des émetteurs, les variations de pression, le nettoyage des filtres, le rinçage des conduites et la réparation des fuites influaient sur l'uniformité de distribution de l'eau. Dans plusieurs cas, des systèmes techniquement adéquats restaient associés à une surirrigation ou à une sous-irrigation, la programmation reposant sur l'expérience des agriculteurs et l'évaluation visuelle plutôt que sur les besoins calculés en eau des cultures. Les résultats montrent que l'infrastructure de micro-irrigation ne suffit pas, à elle seule, à garantir une utilisation efficace de l'eau. L'uniformité d'émission doit être interprétée conjointement avec le volume d'irrigation appliqué, les besoins en eau des cultures, les pratiques d'entretien et les modalités de programmation. L'étude souligne la nécessité d'outils pratiques de programmation de l'irrigation, d'un entretien régulier des systèmes, de la tenue de registres par les agriculteurs et d'évaluations régulières de l'uniformité sur le terrain.

Mots-clés : Uniformité des émissions; programmation de l'irrigation; Pratiques d'entretien; Micro-irrigation; Vallée du Jourdain; Productivité de l'eau; Approvisionnement relatif en eau.

BARRIERS TO AWD ADOPTION IN GRAVITY-FED IRRIGATION SYSTEMS AND PERSPECTIVES FOR FUTURE IMPLEMENTATION

OBSTACLES À L'ADOPTION DE L'AWD DANS LES SYSTÈMES D'IRRIGATION GRAVITAIRE ET PERSPECTIVES DE MISE EN ŒUVRE FUTURE

Jo Hamaguchi[1], Muhamad Khoiru Zaki[2], Tasuku Kato[3], and Keigo Noda[4]

ABSTRACT

AWD is a water management technique that simultaneously reduces methane emissions from paddy fields and conserves irrigation water, yet its adoption remains markedly skewed by irrigation type: stagnant under gravity-fed systems—which account for the majority of the world's irrigated paddy—while progressing relatively smoothly under pump-fed systems. Although previous studies have individually illuminated various determinants, few have systematically organized these factors as structural characteristics inherent to gravity-fed irrigation itself. This study aims to systematically identify the barriers to AWD adoption in gravity-fed irrigation through a comparison with pump-fed irrigation. Using SWOT analysis as the analytical framework, we extracted the strengths, weaknesses, opportunities, and threats of both irrigation types from cases in three countries (the Philippines, Bangladesh, and Vietnam), and derived strategies through a TOWS matrix. The analysis reveals that the core barrier lies in a structural mismatch: decision-making authority over water management rests with the collective (water user organizations), whereas promotion-scheme incentives target individual farmers. This mismatch—absent in pump-fed systems, where authority and incentive beneficiaries coincide—cannot be overcome merely by changing the type of economic incentive. Because the greenhouse-gas-reduction effect of AWD is a global externality scarcely returned to individual farmers, external payment is justified; and because authority is collective in gravity-fed systems, that payment should be designed as a collective Payment for Ecosystem Services (PES) directed to water user organizations, thereby aligning decision-making authority with beneficiaries. However, such collective incentive design depends on a prerequisite: the establishment of methods to quantitatively evaluate AWD effects at the irrigation-district scale, since current individual-field-level measurement cannot provide a payment basis. The collective governance of gravity-fed irrigation is thus simultaneously a weakness and a latent strength for wide-area AWD implementation.

Keywords: Water management technique; Gravity-fed irrigation; Economic incentive; Individual farmers; Collective governance.

RÉSUMÉ

L'AWD est une technique de gestion de l'eau qui réduit simultanément les émissions de méthane des rizières et économise l'eau d'irrigation. Son adoption demeure toutefois très inégale selon le type d'irrigation : elle stagne dans les systèmes gravitaires — qui représentent la majorité

1 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 1135841 Japan, Email: hamaguchijo@g.ecc.u-tokyo.ac.jp
2 Department of Agricultural and Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Technology, Gadja Mada University, Jln. Flora 1. Bulaksumur 55281 Yogyakarta, Indonesia. Email: zakimuhamad30@gmail.com
3 United Graduate School of Agricultural Science, Tokyo University of Agriculture and Technology, 3-5-8 Saiwai-cho, Fuchu-shi, Tokyo 1838509, Japan. Email: taskkato@go.tuat.ac.jp
4 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 1135841 Japan, Email: nodakeigo@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

des rizières irriguées dans le monde — alors qu'elle progresse relativement facilement dans les systèmes alimentés par pompage. Bien que des études antérieures aient mis en lumière divers déterminants pris séparément, rares sont celles qui ont organisé systématiquement ces facteurs comme des caractéristiques structurelles inhérentes à l'irrigation gravitaire elle-même. Cette étude vise à identifier systématiquement les obstacles à l'adoption de l'AWD dans l'irrigation gravitaire en la comparant à l'irrigation alimentée par pompage. En utilisant l'analyse SWOT comme cadre analytique, nous avons extrait les forces, les faiblesses, les possibilités et les menaces propres aux deux types d'irrigation à partir de cas dans trois pays (Philippines, Bangladesh et Vietnam), puis élaboré des stratégies au moyen d'une matrice TOWS. L'analyse révèle que l'obstacle central réside dans une inadéquation structurelle : le pouvoir décisionnel en matière de gestion de l'eau appartient au collectif (organisations d'usagers de l'eau), tandis que les incitations des programmes de promotion ciblent les agriculteurs individuellement. Cette inadéquation — absente des systèmes alimentés par pompage, où le détenteur du pouvoir et les bénéficiaires des incitations coïncident — ne peut être surmontée par un simple changement du type d'incitation économique. Comme l'effet de réduction des gaz à effet de serre de l'AWD constitue une externalité mondiale dont les agriculteurs individuels ne bénéficient guère, un paiement externe est justifié ; et puisque le pouvoir est collectif dans les systèmes gravitaires, ce paiement devrait prendre la forme d'un paiement collectif pour services écosystémiques (PSE) destiné aux organisations d'usagers de l'eau, afin d'aligner le pouvoir décisionnel sur les bénéficiaires. Cependant, la conception d'une telle incitation collective dépend d'un préalable : la mise au point de méthodes permettant d'évaluer quantitativement les effets de l'AWD à l'échelle du district d'irrigation, car les mesures actuellement réalisées à l'échelle des parcelles individuelles ne peuvent fournir une base de paiement. La gouvernance collective de l'irrigation gravitaire constitue donc à la fois une faiblesse et un atout latent pour la mise en œuvre de l'AWD à grande échelle.

Mots clés : Technique de gestion de l'eau; Irrigation gravitaire; Incitation économique; Agriculteurs individuels; Gouvernance collective.

GMIS AS A CATALYST FOR SUSTAINABLE GROUNDWATER GOVERNANCE IN PUNJAB, PAKISTAN

LE GMIS COMME CATALYSEUR D'UNE GOUVERNANCE DURABLE DES EAUX SOUTERRAINES AU PENDJAB, PAKISTAN

Mohsin Hafeez[1], Kaleem Ullah[1], Naveed Iqbal[1], Jehanzaib Cheema[1], Hafsa Aeman[1], Habib Ullah Bodla[1], Salman Siddiqui[1], Zohaib Shahid[1], and Mohammad Ashraf[1]

ABSTRACT

Groundwater is a critical yet largely invisible component of global water security, underpinning food systems, urban supply, and climate resilience. Across many regions, unsustainable abstraction, declining water quality, and fragmented governance threaten the long-term sustainability of aquifers. Pakistan exemplifies these challenges: groundwater supplies over 60 percent of irrigation water, approximately 90% of domestic supply, and nearly all industrial demand, yet regulation and monitoring remain weak. Nowhere are these pressures more acute than in Punjab, Pakistan's agricultural heartland, where intensive cropping systems, rapid expansion of tubewells from approximately 4,500 in 1960 to more than 1.36 million by 2024, climate variability, and urban growth have driven widespread depletion and localized degradation of quality.

This paper presents the Groundwater Management Information System (GMIS), developed under the FCDO-funded Water Resource Accountability in Pakistan (WRAP) Program and CGIAR Policy Innovations Science Program, as a governance-enabling response to Punjab's groundwater crisis. GMIS integrates heterogeneous datasets, including approximately 1.32 million geotagged tubewells, over 2,000 piezometer sites, near-real-time data from 182 Conductivity–Temperature–Depth (CTD) sensors installed in Okara, Chakwal, and Rahim Yar Khan districts, groundwater quality records covering more than 60,000 locations, aquifer and soil characteristics, approximately 1,500 lithological borehole logs, 8,000 geophysical surveys, and remote-sensing products from global datasets into a centralized, decision-support platform. The paper documents the pilot districts where primary monitoring infrastructure was deployed, the secondary data sources at the province level, the integration methodology, the system's core modules, and the governance applications that have enabled evidence-based implementation of the Punjab Water Act 2019. GMIS was formally handed over to the Punjab Irrigation Department (PID) on 18 September 2024. By bridging data, policy, and governance, GMIS offers a blueprint for sustainable groundwater management in water-stressed regions, underscoring the urgency of holistic frameworks to balance agricultural demand with long-term aquifer sustainability.

Keywords: GMIS**,** groundwater governance; decision-support systems; water policy; hotspot identification; Punjab Water Act.

RÉSUMÉ

Les eaux souterraines constituent une composante essentielle, quoique largement invisible, de la sécurité hydrique mondiale, dont dépendent les systèmes alimentaires, l'approvisionnement urbain et la résilience climatique. Dans de nombreuses régions, les prélèvements non durables, la dégradation de la qualité de l'eau et la fragmentation de la gouvernance menacent la pérennité des aquifères. Le Pakistan illustre ces difficultés : les eaux souterraines fournissent plus de 60 % de l'eau d'irrigation, environ 90 % de

1 International Water Management Institute (IWMI), Lahore, Pakistan

l'approvisionnement domestique et la quasi-totalité de la demande industrielle, alors que la réglementation et le suivi demeurent insuffisants. Ces pressions sont particulièrement fortes au Pendjab, cœur agricole du Pakistan, où les systèmes de culture intensive, l'augmentation rapide du nombre de puits tubulaires — d'environ 4 500 en 1960 à plus de 1,36 million en 2024 —, la variabilité climatique et la croissance urbaine ont entraîné une baisse généralisée des niveaux et une dégradation localisée de la qualité.

Cet article présente le Groundwater Management Information System (GMIS), développé dans le cadre du programme Water Resource Accountability in Pakistan (WRAP), financé par le FCDO, et du CGIAR Policy Innovations Science Program, comme une réponse permettant de renforcer la gouvernance face à la crise des eaux souterraines au Pendjab. Le GMIS intègre des ensembles de données hétérogènes, notamment environ 1,32 million de puits tubulaires géoréférencés, plus de 2 000 sites piézométriques, des données en temps quasi réel provenant de 182 capteurs de conductivité, température et profondeur (CTD) installés dans les districts d'Okara, de Chakwal et de Rahim Yar Khan, des relevés de qualité des eaux souterraines couvrant plus de 60 000 emplacements, les caractéristiques des aquifères et des sols, environ 1 500 diagraphies lithologiques de forages, 8 000 levés géophysiques et des produits de télédétection issus d'ensembles de données mondiaux, le tout au sein d'une plateforme centralisée d'aide à la décision. L'article décrit les districts pilotes dans lesquels l'infrastructure principale de suivi a été déployée, les sources de données secondaires à l'échelle provinciale, la méthode d'intégration, les modules centraux du système et les applications de gouvernance qui ont permis une mise en œuvre fondée sur des données probantes du Punjab Water Act 2019. Le GMIS a été officiellement remis au Punjab Irrigation Department (PID) le 18 septembre 2024. En reliant les données, les politiques et la gouvernance, le GMIS offre un modèle de gestion durable des eaux souterraines dans les régions soumises au stress hydrique et souligne l'urgence d'adopter des cadres globaux permettant d'équilibrer la demande agricole et la durabilité à long terme des aquifères.

Mots-clés : GMIS; Gouvernance des eaux souterraines; Systèmes d'aide à la décision; Politique de l'eau; Identification des points chauds; Loi d'eau de Pendjab.

ELECTRICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY: NEW PERSPECTIVES FOR INTEGRATED SOIL WATER MONITORING

SPECTROSCOPIE D'IMPÉDANCE ÉLECTRIQUE: NOUVELLES PERSPECTIVES POUR UNE SURVEILLANCE INTÉGRÉE DE L'EAU DU SOL

Mario Nohra[1], Paul Vandôme[2], François Bernier[3], Gilles Belaud[2], and Sylvain Blayac[1]

ABSTRACT

Effective soil and water management requires reliable estimation of soil moisture and related physical properties under dynamically evolving field conditions. However, most commercial dielectric moisture sensors rely on empirical calibration relationships that are strongly influenced by salinity, texture, and soil structure, resulting in limited robustness and temporal stability.

This work investigates broadband Electrical Impedance Spectroscopy (EIS) in the intermediate frequency range (1 kHz–10 MHz) as a physics-based approach for multiparametric soil characterization. Analytical dielectric modeling combined with effective medium approximations was used to evaluate the coupled influence of volumetric water content, pore-water salinity, and porosity on the complex dielectric permittivity spectrum. Simulated results predict that each parameter produces a distinct spectral signature: moisture and salinity induce characteristic polarization peak shifts, while porosity primarily modifies spectral amplitude with comparatively limited peak displacement.

To experimentally evaluate these predictions, a non-contact broadband impedance measurement platform was developed and tested on agricultural soils under controlled laboratory conditions. Preliminary measurements reproduced the principal spectral behaviors predicted by the analytical framework, demonstrating qualitative agreement between simulations and experiments despite remaining discrepancies associated with simplified effective medium assumptions.

These results support the feasibility of inverse spectral modeling for simultaneous estimation of multiple soil physical properties from a single broadband dielectric measurement. Ongoing work focuses on automated high-throughput validation experiments and the development of a mobile in-situ sensing platform for field-scale agricultural measurements.

Keywords: Soil and water management; Soil moisture; Controlled laboratory conditions; Eielectric measurement; Agricultural measurements.

RÉSUMÉ

La gestion efficace du sol et de l'eau exige une estimation fiable de l'humidité du sol et des propriétés physiques associées dans des conditions de terrain en évolution dynamique. Toutefois, la plupart des capteurs diélectriques commerciaux d'humidité reposent sur des relations d'étalonnage empiriques fortement influencées par la salinité, la texture et la structure du sol, ce qui limite leur robustesse et leur stabilité dans le temps.

1 Mines Saint-Etienne, Centre of Microelectronics in Provence, Department of Flexible Electronics, Gardanne, France, Email:mario.nohra@emse.fr Email: blayac@emse.fr

2 G-EAU, Univ. Montpellier, Institut Agro, Cirad, INRAE, AgroParisTech, BRGM, IRD, Montpellier, France, Email: paul.vandome@hsti.co Email: gilles.belaud@supagro.fr

3 Mines Saint-Etienne, Centre of Microelectronics in Provence, ID-Fab, Gardanne, France Email: francois.bernier@emse.fr

Ce travail étudie la spectroscopie d'impédance électrique (EIS) à large bande dans la gamme de fréquences intermédiaires (1 kHz–10 MHz) comme approche fondée sur la physique pour une caractérisation multiparamétrique du sol. Une modélisation diélectrique analytique, combinée à des approximations de milieu effectif, a servi à évaluer l'influence couplée de la teneur volumique en eau, de la salinité de l'eau interstitielle et de la porosité sur le spectre complexe de permittivité diélectrique. Les résultats simulés prédisent que chaque paramètre produit une signature spectrale distincte : l'humidité et la salinité induisent des déplacements caractéristiques des pics de polarisation, tandis que la porosité modifie principalement l'amplitude spectrale, avec un déplacement des pics comparativement limité.

Afin d'évaluer expérimentalement ces prédictions, une plateforme de mesure d'impédance à large bande sans contact a été mise au point et testée sur des sols agricoles dans des conditions contrôlées de laboratoire. Les mesures préliminaires ont reproduit les principaux comportements spectraux prédits par le cadre analytique, montrant un accord qualitatif entre les simulations et les expériences malgré les écarts persistants liés aux hypothèses simplifiées de milieu effectif.

Ces résultats confirment la faisabilité de la modélisation spectrale inverse pour estimer simultanément plusieurs propriétés physiques du sol à partir d'une seule mesure diélectrique à large bande. Les travaux en cours portent sur des expériences automatisées de validation à haut débit et sur le développement d'une plateforme mobile de détection in situ destinée aux mesures agricoles à l'échelle du terrain.

Mots-clés : Gestion efficace du sol et de l'eau; Humidité du sol; Conditions contrôlées de laboratoire Mesure diélectrique; Mesures agricoles.

IMPROVING IRRIGATION PRACTICE AND TECHNOLOGY FOR A WATER-SECURE AND CLIMATE-RESILIENT SYSTEM: THE CASE OF STA. MARIA; RIVER IRRIGATION SYSTEM

AMÉLIORATION DES PRATIQUES ET TECHNOLOGIES D'IRRIGATION POUR LA SÉCURITÉ HYDRIQUE ET LA RÉSILIENCE CLIMATIQUE: LE CAS DU SYSTÈME D'IRRIGATION DE LA RIVIÈRE STA. MARIA

Mona Liza F. and Delos Reyes[1]

ABSTRACT

Modern technology and innovative water management solutions such as micro irrigation, precision irrigation, and deficit irrigation present means to address water scarcity, increase water use efficiency, and improve climate change adaptation. However, their objectives and operational requirements do not always align well with the system designs, traditional irrigation practices and local preferences. Making modern technology and solutions work in older or traditional irrigation systems require critical stocktaking of current situations in terms of existing technology and practices, irrigation goals and philosophies, preferences, operation and management skills set, and incentives vis-à-vis achievement, potentials, and prospects.

This paper presents the results of a case study that examined the irrigation physical structure, operation and management, irrigation goals, technology used, natural physical environment and institutional settings, issues and challenges, and potentials from the technocrats' and farmers' perspectives to identify appropriate irrigation water management and technology options and mechanisms for their sustainable adoption by farmers. The case study used focus group discussions (FGD), logic design analysis, and pragmatic adoption of Mapping System Services for Canal Operation Technique (MASSCOTE) methodology to gather information and assess potential improvement in technology, farmers' knowledge and management skills at the system and on-farm levels.

The study found that the farmers have good appreciation of the issues, constraints and potentials of their irrigation system and openly talked about their proposed solutions and course of actions during their formal meetings. They are responsive to technical advisory, planning their cropping schedules and method of water distribution accordingly and flexible to any adjustments necessary based on real-time weather and water supply situations. They are receptive to alternate wetting and drying (AWD) as water-saving technology and to development of supplemental irrigation using groundwater as water supplies from the dams are limited. The results of the study indicated a logical inconsistency with the rotational irrigation or AWD practices and presence of unauthorized ungated direct offtakes. These offtakes were either deemed necessary for easy access of irrigation water or just tolerated by some farmers to maintain social cohesion. A list of technology and management options was identified based on farmers' feedback and system analysis. A capacity enhancement program for farmer-irrigators with emphasis on coherent combinations of irrigation objectives and flow control structures and a decision-support system for planning cropping calendar and water delivery to specific turnout service areas are proposed.

Keywords: Irrigation practice and technology; River irrigation system; Water management solutions; Alternate wetting and drying(AWD); System analysis.

1 Institute of Agriculture and Biosystem Engineering, College of Engineering and Agro-industrial Technology, University of the Philippines Los Baños, Philippines, Email: mfdelosreyes@up.edu.ph

RÉSUMÉ

Les technologies modernes et les solutions innovantes de gestion de l'eau, telles que la micro-irrigation, l'irrigation de précision et l'irrigation déficitaire, offrent des moyens de remédier à la pénurie d'eau, d'accroître l'efficience d'utilisation de l'eau et d'améliorer l'adaptation au changement climatique. Toutefois, leurs objectifs et leurs exigences opérationnelles ne s'accordent pas toujours avec la conception des systèmes, les pratiques d'irrigation traditionnelles et les préférences locales. Pour rendre ces technologies et solutions efficaces dans des systèmes d'irrigation anciens ou traditionnels, il faut dresser un bilan critique de la situation actuelle au regard des technologies et pratiques existantes, des objectifs et philosophies d'irrigation, des préférences, des compétences en matière d'exploitation et de gestion, ainsi que des incitations, par rapport aux réalisations, aux potentialités et aux perspectives.

Cet article présente les résultats d'une étude de cas qui a examiné les infrastructures physiques d'irrigation, l'exploitation et la gestion, les objectifs d'irrigation, les technologies utilisées, l'environnement physique naturel et le cadre institutionnel, les problèmes et défis, ainsi que les potentialités perçues par les techniciens et les agriculteurs, afin de déterminer des options et des mécanismes appropriés de gestion de l'eau d'irrigation et de technologie permettant leur adoption durable par les agriculteurs. L'étude de cas a eu recours à des discussions de groupe (FGD), à une analyse de conception logique et à une adaptation pragmatique de la méthodologie Mapping System Services for Canal Operation Technique (MASSCOTE) pour recueillir des informations et évaluer les améliorations possibles des technologies, des connaissances des agriculteurs et des compétences de gestion aux échelles du système et de l'exploitation.

L'étude a montré que les agriculteurs ont une bonne compréhension des problèmes, des contraintes et des potentialités de leur système d'irrigation et qu'ils ont discuté ouvertement des solutions et des mesures qu'ils proposent lors de leurs réunions formelles. Ils sont réceptifs aux conseils techniques, planifient en conséquence leurs calendriers culturaux et leur méthode de distribution de l'eau, et s'adaptent avec souplesse aux ajustements nécessaires en fonction des conditions météorologiques et de l'approvisionnement en eau en temps réel. Ils sont favorables à l'alternance d'humidification et d'assèchement (AWD) comme technologie d'économie d'eau, ainsi qu'au développement d'une irrigation d'appoint utilisant les eaux souterraines, les apports des barrages étant limités. Les résultats ont mis en évidence une incohérence logique entre les pratiques d'irrigation en rotation ou d'AWD et la présence de prises directes non autorisées et dépourvues de vannes. Ces prises étaient soit jugées nécessaires pour faciliter l'accès à l'eau d'irrigation, soit simplement tolérées par certains agriculteurs afin de préserver la cohésion sociale. Une liste d'options technologiques et de gestion a été établie à partir des observations des agriculteurs et de l'analyse du système. Il est proposé de mettre en place un programme de renforcement des capacités destiné aux agriculteurs-irrigants, mettant l'accent sur des combinaisons cohérentes d'objectifs d'irrigation et d'ouvrages de régulation des débits, ainsi qu'un système d'aide à la décision pour planifier le calendrier cultural et la distribution de l'eau à des zones de desserte précises.

Mots clés : Pratiques et technologies d'irrigation; Système d'irrigation de la rivière; Solutions de gestion de l'eau; Alternance d'humidification et d'assèchement (AWD); System analysis.

EVALUATING TRADITIONAL AND IMPROVED WATER HARVESTING TECHNIQUES USING THE FAO AQUACROP MODEL

ÉVALUATION DES TECHNIQUES TRADITIONNELLES ET AMÉLIORÉES DE COLLECTE DES EAUX AU MOYEN DU MODÈLE FAO AQUACROP

Niccolò, Renzi[1]. Lorenzo, Villani[1] Oludare S. Durodola[2], Mira Haddad[3], Stefan Strohmeier[4], Andrea, Setti[2], Jorge, Alvar-Beltrán[2], Elena, Bresci[1], and Giulio, Castelli[1]

ABSTRACT

Agricultural Water Management is essential for mitigating climate-induced water scarcity. Water Harvesting Techniques offer practical field-level interventions, yet evaluating their impact often requires strategic modeling tools like FAO-AquaCrop, especially in data-constrained regions. This study presents a systematic literature review to frame the current state of FAO- AquaCrop-based WHT simulations. A targeted search of major databases identified a specialized body of literature, from which three primary modeling strategies were synthesized: (i) in-situ accumulation as irrigation events, (ii) soil hydraulic property modification via Curve Number adjustments, (iii) ex-situ storage coupling through external water balance integration.

Results indicate that while FAO-AquaCrop's one-dimensional architecture requires methodological "workarounds" to represent physical structures like infiltration trenches, its parsimonious design provides a functional framework for strategic planning. However, limitations regarding semi-quantitative soil fertility representation and the absence of native modules for diverse physical structures necessitate cautious interpretation. The findings suggest that AquaCrop is a suitable tool for preliminary assessments of WHT efficacy, facilitating a transition toward evidence-based implementation in remote agricultural systems. This review underscores the importance of rigorous calibration and highlights the potential for multi-model coupling to address landscape-scale hydrological dynamics in future research.

Keywords: Water harvesting techniques; Agricultural Water Management; Water balance; Soil fertility; Infiltration trenches.

RÉSUMÉ

La gestion de l'eau agricole est essentielle pour atténuer la pénurie d'eau induite par le climat. Les techniques de collecte des eaux offrent des interventions pratiques à l'échelle de la parcelle, mais l'évaluation de leurs effets nécessite souvent des outils stratégiques de modélisation tels que FAO-AquaCrop, en particulier dans les régions où les données sont limitées. Cette étude présente une revue systématique de la littérature afin de dresser l'état actuel des simulations de techniques de collecte des eaux fondées sur FAO-AquaCrop. Une recherche ciblée dans les principales bases de données a permis de recenser un corpus spécialisé de publications, à partir duquel trois stratégies principales de modélisation ont été synthétisées : (i) représentation de l'accumulation in situ sous forme d'événements d'irrigation; (ii) modification des propriétés hydrauliques du sol par ajustement du numéro de courbe ; et (iii) couplage d'un stockage ex situ au moyen de l'intégration d'un bilan hydrique externe.

1 Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry (DAGRI), Italy, Email: niccolo.renzi@unifi.it, lorenzo.villani@unifi.it, elena.breci@unifi.it, giulio.castelli@unifi.it

2 Climate Risk Team, Office of Climate Change Biodiversity and Environment (OCB), Italy, Food and Agriculture Organization of the United Nations Email: oludare.durodola@fao.org, andrea.setti@fao.org, jorge.alvar.beltran@fao.org

3 Restoration Initiative on Dryland Ecosystem (RIDE), Resilient Agrosilvopastoral Systems (RASP), International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA) Email: M.Haddad@cgiar.org

4 Institute for Soil Physics and Rural Water Mgmt., BOKU University, stefan.strohmeier@boku.ac.at

Les résultats indiquent que, si l'architecture unidimensionnelle de FAO-AquaCrop exige des « solutions de contournement » méthodologiques pour représenter des ouvrages physiques tels que les tranchées d'infiltration, sa conception parcimonieuse fournit un cadre fonctionnel pour la planification stratégique. Toutefois, les limites liées à la représentation semi-quantitative de la fertilité des sols et l'absence de modules natifs pour divers ouvrages physiques imposent une interprétation prudente. Les résultats suggèrent qu'AquaCrop est un outil adapté aux évaluations préliminaires de l'efficacité des techniques de collecte des eaux, facilitant ainsi la transition vers une mise en œuvre fondée sur des données probantes dans les systèmes agricoles éloignés. Cette revue souligne l'importance d'un étalonnage rigoureux et met en évidence le potentiel du couplage multimodèle pour prendre en compte, dans les recherches futures, la dynamique hydrologique à l'échelle du paysage.

Mots clés : Techniques de collecte des eaux; Gestion de l'eau agricole; Bilan hydrique; Fertilité des sols; Tranchées d'infiltration.

UNDERGROUND PIPELINES FOR LOCAL WATER DISTRIBUTION IN CANAL IRRIGATION IN PUNJAB AND GUJARAT, INDIA

CANALISATIONS ENTERRÉES POUR LA DISTRIBUTION LOCALE DE L'EAU DANS LES SYSTÈMES D'IRRIGATION PAR CANAUX AU PENDJAB ET AU GUJARAT, EN INDE

Vidya Mandave[a1], Peter P. Mollinga[b], Sachin Oza[c], and Pranjal Deekshit[d]

ABSTRACT

This paper compares underground pipeline networks (UGPLs) in the Indian States of Punjab and Gujarat, with a focus on the Sardar Sarovar Project (SSP) in the latter. Drawing on existing documentation and own fieldwork the paper aims to understand why the reception and performance of the systems are so contrasting in these two States. In Punjab, farmers generally welcome and actively use the systems, while it brings surface water to tail ends of *chaks* where such water might not have arrived for many years; Gujarat exhibits an almost opposite experience.The paper shows that the institutional context in which the UGPLs emerge and are deployed holds the key to the answering the question more than their technical features and agroecological and hydro(geo)logical conditions.

Keywords: Underground pipelines; Agroecological conditions; Surface water; Institutional context; Performance of the systems.

RÉSUMÉ

Cet article compare les réseaux de canalisations enterrées (UGPL) dans les États indiens du Pendjab et du Gujarat, en mettant l'accent, pour ce dernier, sur le projet Sardar Sarovar (SSP). S'appuyant sur la documentation existante et sur les travaux de terrain des auteurs, il vise à comprendre pourquoi l'accueil et les performances de ces systèmes sont si contrastés dans les deux États. Au Pendjab, les agriculteurs les accueillent généralement favorablement et les utilisent activement, car ils acheminent l'eau de surface jusqu'aux extrémités aval des *chaks*, où elle n'était parfois plus arrivée depuis de nombreuses années ; le Gujarat présente une expérience presque opposée. L'article montre que le contexte institutionnel dans lequel les UGPL apparaissent et sont déployés explique davantage cette différence que leurs caractéristiques techniques ou les conditions agroécologiques et hydro (géo) logiques.

Mots clés : Canalisations enterrées; Conditions agroécologiques; Eau de surface; Contexte institutionnel; Performances de ces systèmes.

1 [a)] IWMI, Delhi India, v.mandave@cgiar.org; [b)] ZEF, Bonn, Germany/SOAS University of London, UK; [c)] DSC Foundation, Ahmedabad, India; [d)] TISS, Mumbai India. For a 10K words version of this paper contact the authors.

INTEGRATING IOT IN SURFACE IRRIGATION: A MODELLING APPROACH TO EVALUATE THE MODERNIZATION OF IRRIGATED LANDS

INTÉGRATION DE L'IOT DANS L'IRRIGATION DE SURFACE: UNE APPROCHE DE MODÉLISATION POUR ÉVALUER LA MODERNISATION DES PÉRIMÈTRES IRRIGUÉS

Yassine Khardi[1], Gilles Belaud[2], Paul Vandôme[3], and François Charron[2]

ABSTRACT

Surface irrigation is the most widespread technique globally but is frequently characterized by low application efficiency and high labour demands. While performance can be improved by optimizing topography and plot size, human constraints often lead to the enlargement of plots to reduce workload, which further degrades efficiency. This study investigates the redesign of surface irrigation schemes by integrating Internet of Things (IoT) tools, such as low-cost sensors and remotely-operated gates, to balance labour reduction with water conservation. The research utilizes an integrated modelling approach via the agro-hydrological model Openfluid, employing the specific 'IrriSurf' module to simulate water flow across plots and channels. This methodology was applied to an experimental site in the Crau region of southern France, where 14,000 hectares of hay meadows typically receive high water volumes (20,000 m³/ha) with efficiencies often below 40%. The study monitored the irrigation season (2022–2023) using pressure probes and surveys to calibrate the model against actual practices. Simulations of alternative designs demonstrate that equipping plots with sensor-controlled gates can significantly increase application efficiency without increasing the irrigator's workload. The model successfully evaluated the necessary irrigation time and water volumes lost through drainage for various configurations. Ultimately, this work contributes to the optimization of gravity irrigation by showing how digital decision support and automation can modernize traditional systems. By reconciling technical performance with operational feasibility, these findings provide a strategy for sustaining surface irrigation in the face of increasing water scarcity.

Keywords: Border irrigation, irrigation efficiency, agro-hydrological modelling, IoT, sensor-based irrigation control.

RÉSUMÉ

L'irrigation de surface est la technique la plus répandue dans le monde, mais elle se caractérise fréquemment par une faible efficience d'application et d'importants besoins en main-d'œuvre. Bien que ses performances puissent être améliorées en optimisant la topographie et la taille des parcelles, les contraintes de main-d'œuvre conduisent souvent à agrandir les parcelles afin de réduire la charge de travail, ce qui dégrade davantage l'efficience. Cette étude examine la reconfiguration des systèmes d'irrigation de surface par l'intégration d'outils de l'Internet des objets (IoT), tels que des capteurs à faible coût et des vannes télécommandées, afin de concilier réduction de la main-d'œuvre et économie d'eau. La recherche s'appuie sur une approche de modélisation intégrée au moyen du modèle agrohydrologique OpenFLUID, en utilisant le module spécifique « IrriSurf » pour simuler l'écoulement de l'eau dans les

1 National School of Agriculture, Meknes, Morocco
2 G-Eau, Univ. Montpellier, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, IRD, INRAE, Institut Agro, 361 rue J.F Breton, 34196 Montpellier, France.
3 HSTI France

parcelles et les canaux. Cette méthodologie a été appliquée à un site expérimental de la Crau, dans le sud de la France, où 14 000 hectares de prairies de fauche reçoivent généralement d'importants volumes d'eau (20 000 m³/ha), avec des efficiences souvent inférieures à 40 %. La campagne d'irrigation (2022–2023) a été suivie à l'aide de sondes de pression et de relevés afin d'étalonner le modèle par rapport aux pratiques réelles. Les simulations de configurations alternatives montrent que l'équipement des parcelles en vannes commandées par capteurs peut accroître sensiblement l'efficience d'application sans augmenter la charge de travail de l'irrigant. Le modèle a permis d'évaluer avec succès le temps d'irrigation nécessaire et les volumes d'eau perdus par drainage pour différentes configurations. En définitive, ce travail contribue à l'optimisation de l'irrigation gravitaire en montrant comment l'aide à la décision numérique et l'automatisation peuvent moderniser les systèmes traditionnels. En conciliant performances techniques et faisabilité opérationnelle, ces résultats proposent une stratégie pour pérenniser l'irrigation de surface face à une pénurie d'eau croissante.

Mots-clés : Irrigation par planches; Efficacité de l'irrigation; Modélisation agro-hydrologique; IoT; Contrôle de l'irrigation par capteurs.

OPTIMIZING AND SCALING WATER PRODUCTIVITY IN IRRIGATED RICE FOR CLIMATE RESILIENT AGRICULTURE IN SOUTH ASIA

OPTIMISATION ET MISE À L'ÉCHELLE DE LA PRODUCTIVITÉ DE L'EAU DANS LA RIZICULTURE IRRIGUÉE POUR UNE AGRICULTURE RÉSILIENTE AU CLIMAT EN ASIE DU SUD

Alok Sikka[1], Smaranika Mahapatra[1], Mohsin Hafeez[2], and Jayanta Bhattacharya[3]

ABSTRACT

Rice is a major staple food for about half of the global population, and South and Southeast Asia are the major rice producers in the world. Globally, irrigated rice consumes about 34–43% of global irrigation water and 24–30% of developed freshwater resources. Climate change is widening the water supply–demand gap. In South Asia, heavy dependence on groundwater irrigation—particularly in northwestern India, Pakistan's Punjab, and Bangladesh's Barind tract—has led to severe groundwater depletion and high energy use, increasing the water and carbon footprint of rice systems.

With increasing water demand, low water use efficiency, and climate change, optimizing water use is critical for sustaining rice productivity in water-scarce, climate-vulnerable regions of South Asia. Puddled transplanted rice and continuous flooding are the traditional practices of this region. *Boro* rice cultivation is also commonly practiced in the eastern Indo-Gangetic Plains in parts of eastern India and Bangladesh, which are largely irrigated with groundwater. Context-specific agricultural water management (AWM) is central to adaptation.

Direct seeded rice (DSR) and Alternate Wetting and Drying (AWD) have emerged as a cornerstone of "climate-smart" agriculture in South Asia. DSR saves water by avoiding puddling, transplanting, and standing water. AWD can reduce irrigation water inputs and reduce global warming potential (GWP) by 30–40% as compared to continuously flooded rice. AWD and DSR offer a promising proposition to traditional transplanted rice cultivation in South Asia, especially in water-stressed areas, to save water**,** increase water productivity, and reduce emissions.

Governments, NGOs and donors in India, Bangladesh and Pakistan have taken initiatives to scale these interventions and while they offer significant benefits, widespread adoption faces challenges. In this paper, we present use cases from India and Bangladesh, discuss barriers to adoption and offer recommendations for scaling up. Successful scaling of DSR and AWD will require a multi-faceted approach with concerted efforts from all stakeholders, including farmers, researchers, officials of irrigation systems, policymakers, and the private sector.

Keywords: Water productivity; Groundwater depletion; Rice systems; Climate-smart agriculture; Water-stressed areas.

RÉSUMÉ

Le riz constitue un aliment de base majeur pour environ la moitié de la population mondiale, et l'Asie du Sud et du Sud-Est regroupe les principaux producteurs mondiaux de riz. À l'échelle mondiale, le riz irrigué consomme environ 34 à 43 % de l'eau d'irrigation et 24 à

1 International Water Management Institute (IWMI), New Delhi, India, Email: a.sikka@cgiar.org; s.mahapatra@cgiar.org
2 International Water Management Institute, Lahore, Pakistan Email: m.hafeez@cgiar.org
3 International Water Mgmt. Institute, Dhaka, Bangladesh Email: Jayanta.Bhattacharya@cgiar.org

30 % des ressources en eau douce aménagées. Le changement climatique creuse l'écart entre l'offre et la demande en eau. En Asie du Sud, la forte dépendance à l'irrigation par les eaux souterraines — notamment dans le nord-ouest de l'Inde, le Pendjab pakistanais et la région de Barind au Bangladesh — a entraîné un grave épuisement des nappes et une forte consommation d'énergie, augmentant ainsi les empreintes hydrique et carbone des systèmes rizicoles.

Face à l'augmentation de la demande en eau, à la faible efficience d'utilisation de l'eau et au changement climatique, l'optimisation de l'utilisation de l'eau est essentielle pour maintenir la productivité du riz dans les régions d'Asie du Sud exposées à la pénurie d'eau et vulnérables au climat. Le repiquage du riz en sol mis en boue et l'inondation continue constituent les pratiques traditionnelles de cette région. La culture du riz *Boro* est également courante dans l'est de la plaine indo-gangétique, notamment dans certaines parties de l'est de l'Inde et du Bangladesh, où elle est principalement irriguée à partir des eaux souterraines. Une gestion de l'eau agricole (AWM) adaptée au contexte est au cœur de l'adaptation.

Le semis direct du riz (DSR) et l'alternance d'humidification et d'assèchement (AWD) sont devenus des piliers de l'agriculture « intelligente face au climat » en Asie du Sud. Le DSR permet d'économiser l'eau en évitant la mise en boue, le repiquage et la présence permanente d'une lame d'eau. Par rapport à une culture de riz continuellement inondée, l'AWD peut réduire les apports d'eau d'irrigation et le potentiel de réchauffement planétaire (GWP) de 30 à 40 %. L'AWD et le DSR constituent une solution prometteuse en remplacement de la riziculture traditionnelle par repiquage en Asie du Sud, notamment dans les zones soumises au stress hydrique, afin d'économiser l'eau, d'accroître sa productivité et de réduire les émissions.

Les gouvernements, les ONG et les bailleurs de fonds de l'Inde, du Bangladesh et du Pakistan ont pris des initiatives pour déployer ces interventions à grande échelle. Malgré leurs avantages importants, leur adoption généralisée se heurte à des difficultés. Dans cet article, nous présentons des cas d'utilisation en Inde et au Bangladesh, examinons les obstacles à l'adoption et formulons des recommandations pour leur mise à l'échelle. Le déploiement réussi du DSR et de l'AWD exigera une approche multidimensionnelle et des efforts concertés de l'ensemble des parties prenantes, notamment les agriculteurs, les chercheurs, les responsables des systèmes d'irrigation, les décideurs publics et le secteur privé.

Mots clés : Productivité de l'eau; Epuisement des nappes; Systèmes rizicoles; Agriculture intelligente face au climat; Zones soumises au stress hydrique.

PRECISION IRRIGATION USING DATA-DRIVEN METHODS IN MAIZE

IRRIGATION DE PRÉCISION DU MAÏS AU MOYEN DE MÉTHODES FONDÉES SUR LES DONNÉES

Nagy A.[1]. Szabó A.[1], Fehér Zs. Zs.[1], Angura L.[1], Nxumalo G.S.[1&2], and Tamás J.

ABSTRACT

This study summarizes and integrates the recent results of a Hungarian research group in the field of precision water management. The main focus is on irrigation scheduling design, as well as the development of maize biomass and soil moisture monitoring methods, emphasizing the role of spectral data, remote sensing, machine learning, and physical modeling. Precision agricultural approaches are playing an increasingly important role in monitoring maize (Zea mays) productivity, stress responses, and water use. Instead of traditional sampling- and laboratory-based methodologies, non-invasive spectral and remote sensing systems enable real-time determination of pigment content (e.g., carotenoids, chlorophyll), estimation of biomass, and mapping of the spatio-temporal dynamics of plant stress and water use. The combination of machine learning and Earth Observation (EO) data further enhances the accuracy and practical utility of predictive models. Overall, the integration of spectral data processing, machine learning, and physical modeling provide a promising toolkit for real-time monitoring of maize canopy conditions, estimating and detecting water stress symptoms, tracking evapotranspiration and soil moisture dynamics, and ultimately optimizing precision irrigation scheduling. Such interdisciplinary approaches enhance water and yield security under changing climate and water-scarce conditions while offering scalable technological solutions for both precision and conventional agricultural systems.

Keywords: Precision irrigation; Data-driven methods; Irrigation scheduling design; Machine learning; Water-scarce conditions.

RÉSUMÉ

Cette étude synthétise et intègre les résultats récents d'un groupe de recherche hongrois dans le domaine de la gestion de précision de l'eau. Elle porte principalement sur la conception de la programmation de l'irrigation, ainsi que sur le développement de méthodes de suivi de la biomasse du maïs et de l'humidité du sol, en soulignant le rôle des données spectrales, de la télédétection, de l'apprentissage automatique et de la modélisation physique. Les approches d'agriculture de précision jouent un rôle croissant dans le suivi de la productivité du maïs (Zea mays), de ses réponses au stress et de son utilisation de l'eau. À la place des méthodes traditionnelles fondées sur l'échantillonnage et les analyses en laboratoire, les systèmes spectraux et de télédétection non invasifs permettent de déterminer en temps réel la teneur en pigments (p. ex., caroténoïdes, chlorophylle), d'estimer la biomasse et de cartographier la dynamique spatio-temporelle du stress végétal et de l'utilisation de l'eau. L'association de l'apprentissage automatique et des données d'observation de la Terre (OT) améliore encore la précision et l'utilité pratique des modèles prédictifs. Dans l'ensemble, l'intégration du traitement des données spectrales, de l'apprentissage automatique et de la modélisation physique offre un ensemble d'outils prometteur pour surveiller en temps réel l'état du couvert de maïs, estimer et détecter les symptômes de stress hydrique, suivre l'évapotranspiration et la dynamique de l'humidité du sol, et, à terme, optimiser la programmation de l'irrigation

1 University of Debrecen, Faculty of Agricultural and Food Sciences and Environmental Management, Institute of Water and Environmental Management, 138. Böszörményi str. Debrecen 4032, Hungary, Email: attilanagy@agr.unideb.hu

de précision. De telles approches interdisciplinaires renforcent la sécurité hydrique et celle des rendements dans un contexte de changement climatique et de pénurie d'eau, tout en proposant des solutions technologiques évolutives pour les systèmes agricoles de précision comme conventionnels.

Mots clés : Data-driven methods; M**éthodes fondées sur les données;** Conception de la programmation de l'irrigation; Contexte de pénurie d'eau.

ASSESSING OPTIRRIG MODEL PERFORMANCE FOR IRRIGATION OPTIMIZATION IN SEMI-ARID CONDITIONS OF NORTHEAST TUNISIA

ÉVALUATION DES PERFORMANCES DU MODÈLE OPTIRRIG POUR L'OPTIMISATION DE L'IRRIGATION DANS LES CONDITIONS SEMI-ARIDES DU NORD-EST DE LA TUNISIE

Yacoubi S[1]., Slatni A[1]., Cheviron B[2]., Wittling C[2]., Hermassi T[1]., Ben Abdallah Ma[1]. and Pouget L[3].

ABSTRACT

Under water scarcity conditions and imbalance between water supply and demand, appropriate management and control of irrigation water is becoming a major interest. Because they offer a wealth of data for planning and managing water and irrigation systems, simulation models are being used in agriculture more and more frequently. Optirrig model is a software tool developed by INRAE for generating, analyzing and optimizing irrigation scenarios. This paper investigated Optirrig model performance for a potato crop under the semi-arid conditions of Cap Bon region in the northeast of Tunisia. Field experiments were performed on two potato plots located at the Boucharray irrigated district in order to calibrate and validate the model. The validated model was used to assess potato crop response to water under different water availability conditions based on irrigation quota, relative crop evapotranspiration and relative yield loss. Simulations were performed for the climatic conditions of the average year estimated from a time series of 37 years (1984-2020). For both calibration and validation process, results indicated a very good agreement between measured and simulated Leaf Arae Index (LAI) values. Based on the experimental data, the validation process proved that the model adequately predicts potato crop yield. Simulation results indicated that potato maximum yield is achieved with net season irrigation of 280 mm under average climatic conditions. When water availability is limited, the simulated results indicate that it is possible to revise yield objectives according to water supply strategies. If the objective is to keep the relative yield reduction below a threshold of 12 %, the irrigation quota must be greater than 120 mm. Applying a water depth equal to 21.4 % of the optimal irrigation quota would result in a relative yield loss of about 42% making adoption of deficit irrigation more difficult particularly under limited water availability.

Keywords: Optirrig model, Calibration, Validation, Irrigation quota, Potato crop, Relative yield loss.

RÉSUMÉ

Dans un contexte de pénurie d'eau et de déséquilibre entre l'offre et la demande, la gestion et le contrôle appropriés de l'eau d'irrigation deviennent un enjeu majeur. Parce qu'ils fournissent une grande quantité de données utiles à la planification et à la gestion

1 National Research Institute for Rural Engineering, Water and Forestry (INRGREF), Laboratory of Rural Engineering GR, University of Carthage, Rue Hédi El Karray El Menzah IV-BP N° 10, Ariana 2080, Tunisia, Email: samir.yacoubi@ingref.ucar.tn; slatni.adel@gmail.com; taoufik.hermassi@ingref.ucar.tn; benabdallah_medali@yahoo.fr

2 National Research Institute for Agriculture, Food and Environment (INRAE), UMR G-Eau – Campus Lavalette 361, rue Jean François Breton 34196 Montpellier, France, Email: bruno.cheviron@inrae.fr; claire.wittling@inrae.fr

3 Water Technology Center (Cetaqua Barcelona), Ctra. d'Esplugues, 75, 08940 Cornellà de Llobregat, Barcelona, Spain Email laurent.pouget@cetaqua.com

des systèmes hydriques et d'irrigation, les modèles de simulation sont de plus en plus fréquemment utilisés en agriculture. Le modèle Optirrig est un outil logiciel développé par l'INRAE pour générer, analyser et optimiser des scénarios d'irrigation. Cet article évalue les performances du modèle Optirrig pour une culture de pomme de terre dans les conditions semi-arides de la région du Cap Bon, au nord-est de la Tunisie. Des expériences de terrain ont été menées sur deux parcelles de pommes de terre situées dans le périmètre irrigué de Boucharray afin d'étalonner et de valider le modèle. Le modèle validé a servi à évaluer la réponse de la culture de pomme de terre à l'eau sous différentes conditions de disponibilité hydrique, en fonction du quota d'irrigation, de l'évapotranspiration relative de la culture et de la perte relative de rendement. Les simulations ont été réalisées pour les conditions climatiques d'une année moyenne, estimées à partir d'une série chronologique de 37 ans (1984–2020). Pour les phases d'étalonnage comme de validation, les résultats ont montré une très bonne concordance entre les valeurs mesurées et simulées de l'indice foliaire (LAI). À partir des données expérimentales, la validation a confirmé que le modèle prédit correctement le rendement de la pomme de terre. Les simulations indiquent que le rendement maximal de la pomme de terre est obtenu avec une irrigation saisonnière nette de 280 mm dans des conditions climatiques moyennes. Lorsque la disponibilité en eau est limitée, les résultats simulés montrent qu'il est possible de revoir les objectifs de rendement en fonction des stratégies d'approvisionnement en eau. Si l'objectif est de maintenir la réduction relative du rendement sous un seuil de 12 %, le quota d'irrigation doit être supérieur à 120 mm. L'application d'une lame d'eau égale à 21,4 % du quota d'irrigation optimal entraînerait une perte relative de rendement d'environ 42 %, ce qui rend l'adoption de l'irrigation déficitaire plus difficile, en particulier lorsque la disponibilité en eau est limitée.

Mots-clés : Modèle d'Optirrig; Calibration; Validation; Quota d'irrigation; Culture de pomme de terre; Perte relative au rendement.

DISCHARGE ESTIMATION USING PHYSICS-INFORMED NEURAL NETWORKS WITH IMAGE-BASED SURFACE VELOCIMETRY

ESTIMATION DU DÉBIT AU MOYEN DE RÉSEAUX DE NEURONES INFORMÉS PAR LA PHYSIQUE ET DE LA VÉLOCIMÉTRIE DE SURFACE FONDÉE SUR L'IMAGE

Yen-Cheng Lin[1], and Hao-Che Ho[2]

ABSTRACT

Accurate discharge estimation is fundamental for evaluating water use efficiency and supporting adaptive irrigation management under increasing water resource pressure. Image-based velocimetry techniques, particularly Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV), have been increasingly adopted in irrigation channels and natural rivers due to their non-intrusive deployment and high spatial resolution. The integration of convolutional neural networks (CNNs) has led to CNN-LSPIV approaches that enhance surface velocity detection robustness under varying illumination, reflections, and surface texture conditions. Nevertheless, data-driven velocity reconstructions may exhibit locally non-conservative behavior that violates mass continuity, especially in regions influenced by image distortion or insufficient tracers, introducing significant uncertainty in discharge quantification. To address these challenges, a physics-informed discharge estimation framework is developed based on Physics-Informed Neural Networks (PINNs), embedding the shallow water continuity equation directly into the training loss together with observational consistency and hydraulic boundary constraints. Two operational modes are proposed: a Velocity Field Refinement mode (PINN-VR), which refines CNN-LSPIV velocity fields prior to leapfrog-based depth integration, and a Direct Depth Inversion mode (PINN-DDI), which simultaneously reconstructs velocity and water depth fields through global physics-constrained optimization.

The framework is validated through laboratory flume experiments under three bed configurations covering 23 experimental cases, with ADV measurements providing reference validation data. CNN-LSPIV achieves mean velocity error reductions of 44 to 70% relative to conventional LSPIV. PINN-VR performs best under lateral composite bed conditions (average depth RMSE = 0.0135 m), whereas PINN-DDI achieves superior accuracy under longitudinal bed variations (average depth RMSE = 0.0217 m) by reducing sensitivity to directional error accumulation. At the discharge estimation scale, PINN-DDI yields the lowest errors under both composite bed configurations. Field validation using UAV imagery over a natural gravel-bed river reach with ADCP cross-sectional measurements confirms the framework's transferability, with the best-performing configuration reducing average discharge error by approximately 27% relative to LSPIV-based methods. These results demonstrate that embedding physical conservation constraints into image-based flow reconstruction substantially advances non-contact discharge estimation toward hydraulically consistent flow quantification, strengthening the role of image-derived data in irrigation system performance assessment and adaptive water management.

Keywords: Discharge estimation; Physics-Informed Neural Networks; CNN-LSPIV; Image-based velocimetry; Irrigation channel monitoring.

1 PhD student, Department of Civil Engineering, National Taiwan University, No. 1, Sec. 4, Roosevelt Rd., Taipei 106319, Taiwan, Email: d10521010@ntu.edu.tw

2 Associate professor, Department of Civil Engineering, National Taiwan University, No. 1, Sec. 4, Roosevelt Rd., Taipei 106319, Taiwan, Email: haocheho@ntu.edu.tw

RÉSUMÉ

Une estimation précise du débit est fondamentale pour évaluer l'efficience d'utilisation de l'eau et soutenir une gestion adaptative de l'irrigation dans un contexte de pression croissante sur les ressources en eau. Les techniques de vélocimétrie fondées sur l'image, notamment la vélocimétrie par images de particules à grande échelle (LSPIV), sont de plus en plus employées dans les canaux d'irrigation et les cours d'eau naturels en raison de leur déploiement non intrusif et de leur haute résolution spatiale. L'intégration de réseaux de neurones convolutifs (CNN) a conduit à des approches CNN-LSPIV qui renforcent la robustesse de la détection de la vitesse de surface sous des conditions variables d'éclairage, de réflexion et de texture de surface. Néanmoins, les reconstructions de vitesse fondées sur les données peuvent présenter localement un comportement non conservatif qui contrevient à la continuité de la masse, en particulier dans les zones affectées par la distorsion des images ou par une quantité insuffisante de traceurs, ce qui introduit une incertitude importante dans la quantification du débit. Pour répondre à ces difficultés, un cadre d'estimation du débit informé par la physique est élaboré à partir de réseaux de neurones informés par la physique (PINN), en intégrant directement l'équation de continuité des eaux peu profondes dans la fonction de perte d'apprentissage, conjointement avec la cohérence des observations et les contraintes hydrauliques aux limites. Deux modes de fonctionnement sont proposés : un mode d'affinement du champ de vitesse (PINN-VR), qui affine les champs de vitesse CNN-LSPIV avant l'intégration de la profondeur selon un schéma saute-mouton, et un mode d'inversion directe de la profondeur (PINN-DDI), qui reconstruit simultanément les champs de vitesse et de profondeur d'eau au moyen d'une optimisation globale contrainte par la physique.

Le cadre est validé par des expériences en canal de laboratoire menées selon trois configurations de fond et couvrant 23 cas expérimentaux, les mesures ADV servant de données de référence pour la validation. Par rapport à la LSPIV conventionnelle, la CNN-LSPIV réduit de 44 à 70 % l'erreur moyenne sur la vitesse. Le mode PINN-VR donne les meilleurs résultats pour les fonds composites latéraux (RMSE moyenne de la profondeur = 0,0135 m), tandis que le mode PINN-DDI offre une précision supérieure pour les variations longitudinales du fond (RMSE moyenne de la profondeur = 0,0217 m) en réduisant la sensibilité à l'accumulation directionnelle des erreurs. À l'échelle de l'estimation du débit, le PINN-DDI produit les erreurs les plus faibles pour les deux configurations de fond composite. Une validation sur le terrain à l'aide d'images acquises par UAV au-dessus d'un tronçon naturel de rivière à lit graveleux, avec des mesures ADCP en section transversale, confirme la transférabilité du cadre ; la configuration la plus performante réduit l'erreur moyenne de débit d'environ 27 % par rapport aux méthodes fondées sur la LSPIV. Ces résultats montrent que l'intégration des contraintes de conservation physique dans la reconstruction des écoulements à partir d'images fait progresser sensiblement l'estimation sans contact du débit vers une quantification hydrauliquement cohérente des écoulements, renforçant ainsi le rôle des données issues de l'imagerie dans l'évaluation des performances des systèmes d'irrigation et la gestion adaptative de l'eau.

Mots-clés : Estimation du débit; Réseaux neuronaux à base physique; CNN-LSPIV; Vélocimétrie fondées sur l'image; Surveillance des canaux d'irrigation.

REAL-TIME CCTV-BASED DISCHARGE MONITORING IN AGRICULTURAL DRAINAGE CHANNELS USING IMAGE-DERIVED SURFACE VELOCITY AND WATER LEVELS

SUIVI EN TEMPS RÉEL DU DÉBIT PAR CCTV DANS LES CANAUX DE DRAINAGE AGRICOLE À PARTIR DE LA VITESSE DE SURFACE ET DES NIVEAUX D'EAU DÉRIVÉS D'IMAGES

C.W. Wu[1], and H.C. Ho[2]

ABSTRACT

Improving water use efficiency in irrigated agriculture requires continuous, scalable, and reliable observations of flow behaviour in distribution and drainage networks. Monitoring at drains and secondary channels still relies heavily on manual readings or intermittent surveys, leaving short-term fluctuations, nighttime conditions, and operationally driven changes poorly resolved. This study presents a continuous image-based monitoring framework that estimates discharge in agricultural drainage channels by integrating surface velocity recognition, automated water level detection, and the velocity-area method. Fixed closed-circuit television (CCTV) cameras observe a representative reach without in-channel instrumentation. Video streams are processed to extract surface texture motion for velocity estimation, while a virtual gauge defined within the field of view supports water level identification. Combined with surveyed channel geometry and a calibrated surface-to-mean velocity correction, the workflow produces a continuous discharge time series synchronized with imagery, and an Internet of Things (IoT) pipeline with a streaming dashboard delivers near real-time situational awareness, automated archiving, and rapid visual verification. The framework was deployed at the D4 station in the Bagu drainage system in northern Taiwan, validated against acoustic Doppler reference measurements during three flood events in 2023, and subsequently operated continuously through 2024 and 2025. Across the combined record, including Typhoons and heavy rainfall events, the framework reproduced peak discharges with errors typically below six percent and coefficients of determination above 0.91, and the image-based water level matched the radar stage sensor to within 0.1 m. Examining the integrated observations in the discharge-stage plane also suggests a tendency toward hysteresis at higher flows that independent velocity and stage observation is able to capture. The approach offers a low-cost and replicable foundation for distributed drainage observation networks that strengthen irrigation return-flow accounting, support adaptive water management, and improve water use efficiency under increasing resource and climate constraints.

Keywords: image velocimetry, agricultural drainage, virtual gauge, velocity-area method, real-time monitoring.

RÉSUMÉ

L'amélioration de l'efficience d'utilisation de l'eau dans l'agriculture irriguée exige des observations continues, évolutives et fiables du comportement des écoulements dans les réseaux de distribution et de drainage. Le suivi des drains et des canaux secondaires repose encore largement sur des lectures manuelles ou des campagnes de

1 Department of Civil Engineering, National Taiwan University, No. 1, Sec. 4, Roosevelt Road, Taipei 10617, Taiwan. E-mail: d12521010@ntu.edu.tw

2 Department of Civil Engineering, National Taiwan University, No. 1, Sec. 4, Roosevelt Road, Taipei 10617, Taiwan. E-mail: haocheho@ntu.edu.tw.

mesure intermittentes, ce qui rend mal connus les fluctuations de courte durée, les conditions nocturnes et les changements liés à l'exploitation. Cette étude présente un cadre de suivi continu fondé sur l'image qui estime le débit dans les canaux de drainage agricole en intégrant la reconnaissance de la vitesse de surface, la détection automatisée du niveau d'eau et la méthode vitesse–section. Des caméras fixes de télévision en circuit fermé (CCTV) observent un tronçon représentatif sans instrumentation dans le canal. Les flux vidéo sont traités afin d'extraire le mouvement des textures de surface pour estimer la vitesse, tandis qu'une échelle virtuelle définie dans le champ de vision permet d'identifier le niveau d'eau. Combiné à la géométrie relevée du canal et à un coefficient étalonné de conversion de la vitesse de surface en vitesse moyenne, ce processus produit une série chronologique continue de débits synchronisée avec les images ; une chaîne de traitement de l'Internet des objets (IoT), dotée d'un tableau de bord en flux continu, fournit une connaissance de la situation en temps quasi réel, un archivage automatisé et une vérification visuelle rapide. Le cadre a été déployé à la station D4 du système de drainage de Bagu, dans le nord de Taïwan, validé par rapport à des mesures acoustiques Doppler de référence pendant trois crues en 2023, puis exploité en continu en 2024 et 2025. Sur l'ensemble des données, y compris lors des typhons et de fortes pluies, le cadre a reproduit les débits de pointe avec des erreurs généralement inférieures à 6 % et des coefficients de détermination supérieurs à 0,91 ; le niveau d'eau issu des images concordait avec celui du capteur radar à 0,1 m près. L'examen des observations intégrées dans le plan débit–hauteur laisse également apparaître une tendance à l'hystérésis pour les débits élevés, que l'observation indépendante de la vitesse et de la hauteur permet de saisir. Cette approche offre une base peu coûteuse et reproductible pour des réseaux distribués d'observation du drainage, capables de renforcer la comptabilisation des retours d'irrigation, de soutenir la gestion adaptative de l'eau et d'améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau face à des contraintes croissantes sur les ressources et le climat.

Mots-clés : Vélocimétrie d'image; Drainage agricole; Jauge virtuelle; Méthode vitesse–section; Suivi en temps réel.

SATELLITE-DRIVEN MONITORING OF AGRICULTURAL WATER USE FOR CLIMATE-RESILIENT GOVERNANCE IN UZBEKISTAN

SUIVI SATELLITAIRE DE L'UTILISATION DE L'EAU AGRICOLE POUR UNE GOUVERNANCE RÉSILIENTE AU CLIMAT EN OUZBÉKISTAN

J. Iskhakov[1]

ABSTRACT

Water scarcity is becoming an increasingly critical challenge in Central Asia due to climate change, glacier retreat, population growth, and increasing agricultural demand. In Uzbekistan, irrigated agriculture remains the dominant consumer of available water resources and plays a strategic role in national food production and economic development. Improving water allocation and irrigation efficiency therefore requires reliable and scalable approaches for monitoring actual water consumption.

This study presents a satellite-driven system developed for monitoring agricultural water use across approximately one million hectares of irrigated land in Uzbekistan. The system was implemented in Samarkand, Kashkadarya, and Fergana regions during 2024–2025 and is planned for expansion into Syrdarya region in 2026.

The methodology combines open-access satellite imagery from Sentinel-2 and Landsat missions with geospatial analysis and the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) to estimate actual evapotranspiration (ETa), representing real crop water consumption. Land Surface Temperature (LST) was applied as a key parameter for improving estimation accuracy.

In parallel, extensive GIS-based infrastructure digitization was performed, including more than 67,000 km of irrigation networks, over 11,000 hydraulic structures, and linkage of more than one million hectares of agricultural land to irrigation infrastructure.

The results identified zones with water deficit, excessive water use, and water stress conditions. Water consumption analysis across crop categories demonstrated significant spatial variation between wheat and cotton production systems. The developed approach provides objective and spatially detailed information for irrigation planning, drought response, and climate adaptation.

The study demonstrates that integration of satellite observations and geospatial technologies provides an operational and scalable framework for climate-resilient water governance in irrigated agriculture

Keywords: Satellite-driven monitoring; Agricultural water use; Water scarcity; Actual water consumption; Irrigation networks.

RÉSUMÉ

La pénurie d'eau devient un enjeu de plus en plus critique en Asie centrale sous l'effet du changement climatique, du recul des glaciers, de la croissance démographique et de l'augmentation de la demande agricole. En Ouzbékistan, l'agriculture irriguée demeure le principal consommateur des ressources en eau disponibles et joue un rôle stratégique dans la production alimentaire nationale et le développement économique. L'amélioration de l'allocation de l'eau et de l'efficience de l'irrigation exige donc des approches fiables et évolutives pour suivre la consommation réelle d'eau.

1 Center for Space Monitoring and Geoinformation Technologies, Project Management, Tashkent, Uzbekistan

Cette étude présente un système satellitaire mis au point pour suivre l'utilisation de l'eau agricole sur environ un million d'hectares de terres irriguées en Ouzbékistan. Le système a été déployé dans les régions de Samarcande, de Kachkadaria et de Ferghana en 2024–2025, et son extension à la région de Syr-Daria est prévue en 2026.

La méthodologie combine des images satellitaires en accès libre provenant des missions Sentinel-2 et Landsat avec l'analyse géospatiale et l'algorithme de bilan énergétique de surface des terres (SEBAL), afin d'estimer l'évapotranspiration réelle (ETa), qui représente la consommation réelle d'eau par les cultures. La température de surface des terres (LST) a été utilisée comme paramètre clé pour améliorer la précision des estimations.

Parallèlement, une vaste numérisation des infrastructures dans un SIG a été réalisée, portant notamment sur plus de 67 000 km de réseaux d'irrigation et plus de 11 000 ouvrages hydrauliques, ainsi que sur le rattachement de plus d'un million d'hectares de terres agricoles aux infrastructures d'irrigation.

Les résultats ont permis de repérer les zones en déficit hydrique, en surconsommation d'eau et soumises au stress hydrique. L'analyse de la consommation d'eau par catégorie de cultures a révélé d'importantes variations spatiales entre les systèmes de production du blé et du coton. L'approche mise au point fournit des informations objectives et spatialement détaillées pour la planification de l'irrigation, la réponse aux sécheresses et l'adaptation au climat.

L'étude montre que l'intégration des observations satellitaires et des technologies géospatiales fournit un cadre opérationnel et évolutif pour une gouvernance de l'eau résiliente au climat dans l'agriculture irriguée.

Mots clés : Suivi satellitaire; Utilisation de l'eau agricole; Pénurie d'eau; Consommation réelle d'eau; Réseaux d'irrigation

DIGITAL TRANSFORMATION OF ONFARM IRRIGATION MANAGEMENT: THE RIEGABIEN® APP SUITE AS A SCALABLE MODEL OF PRECISION AGRICULTURE IN CHILE

TRANSFORMATION NUMÉRIQUE DE LA GESTION DE L'IRRIGATION À L'ÉCHELLE DE L'EXPLOITATION: LA SUITE D'APPLICATIONS RIEGABIEN® COMME MODÈLE ÉVOLUTIF D'AGRICULTURE DE PRÉCISION AU CHILI

Pilar M. Gil[1,5], Magali Odi[1,5], Octavio Lagos[2,5], Claudio Balbontín[3], Francisco Meza[1], Jael Montecinos[1,5], Sophiatobar[1,5], María Consuelo Arias[1], Iván Kleiman[4], Angelo Barrientos[4], Juan Pablo Pacheco[2,5], Erick Ruiz[2,5], Andrés Pérez[2,5], and Cristián Barrera[1,5]

ABSTRACT

Chile's agricultural sector is currently facing a structural water scarcity scenario driven by a prolonged megadrought, which has intensified the need for more efficient on-farm irrigation management. Despite this urgency, a persistent technological and knowledge gap remains, as many producers do not incorporate formal irrigation scheduling into their decision-making processes. Instead, irrigation practices are frequently based on empirical criteria or incomplete information, limiting the ability to adequately capture spatial variability in soils, crops, and climate. This gap is particularly critical among small and medium-scale producers. However, this scenario coexists with significant opportunities, including the high penetration of mobile technologies and the advanced development of national agrometeorological networks and satellite-based vegetation indicators, which provide robust, spatially explicit data for estimating crop water requirements.

In response, RiegaBien® was developed as a mobile-based decision-support system aimed at improving irrigation management through the operationalization of scientific methodologies. The platform integrates a soil water balance model based on the FAO-56 approach with real-time reference evapotranspiration data and dynamic crop coefficients derived from NDVI. It also incorporates georeferenced soil properties and user-defined irrigation system parameters to generate site-specific irrigation recommendations. Its modular architecture, structured around climate, crop, soil, and irrigation components, translates complex irrigation models into an accessible and user-oriented interface.

Results from pilot implementations demonstrate that the application improves irrigation decision-making with adaptive scheduling that responds to phenological and environmental variability. The tool is currently recognized within the agricultural sector and has exceeded 2,500 downloads; however, further efforts are required to expand its reach among producers and to consolidate its effective adoption. Overall, RiegaBien® illustrates how the integration of scientific knowledge, existing data infrastructure, and digital technologies can bridge critical gaps and support more efficient and informed water management in agriculture.

Keywords: Digital transformation; Precision agriculture; Irrigation scheduling; Decision-support system; Irrigation models.

1 Pontificia Universidad Católica de Chile, Faculty of Agriculture and Natural Sciences, Santiago, Chile, 2 Universidad de Concepción, Chillán, Chile, 3 INIA, La Serena, Chile, 4 ProyecTI, Santiago, Chile, 5 Consorcio Tecnológico del Agua, 20-CTEGHC-145896, Chillán, Chile, Corresponding Author´s, E-mail: pmgil@uc.cl

RÉSUMÉ

Le secteur agricole chilien est actuellement confronté à une situation structurelle de pénurie d'eau, provoquée par une mégasécheresse prolongée, qui a accentué la nécessité d'une gestion plus efficiente de l'irrigation à l'échelle de l'exploitation. Malgré cette urgence, un déficit persistant en matière de technologie et de connaissances subsiste, car de nombreux producteurs n'intègrent pas de programmation formelle de l'irrigation à leurs processus décisionnels. Les pratiques d'irrigation reposent souvent sur des critères empiriques ou des informations incomplètes, ce qui limite la capacité à prendre correctement en compte la variabilité spatiale des sols, des cultures et du climat. Ce déficit est particulièrement critique chez les petits et moyens producteurs. Cette situation coexiste néanmoins avec d'importantes possibilités, notamment la forte pénétration des technologies mobiles et le développement avancé des réseaux agrométéorologiques nationaux et des indicateurs de végétation satellitaires, qui fournissent des données robustes et spatialement explicites pour estimer les besoins en eau des cultures.

En réponse, RiegaBien® a été développé comme un système mobile d'aide à la décision visant à améliorer la gestion de l'irrigation en rendant opérationnelles des méthodologies scientifiques. La plateforme intègre un modèle de bilan hydrique du sol fondé sur l'approche FAO-56, des données d'évapotranspiration de référence en temps réel et des coefficients culturaux dynamiques dérivés du NDVI. Elle intègre également des propriétés géoréférencées des sols et des paramètres du système d'irrigation définis par l'utilisateur afin de produire des recommandations d'irrigation propres au site. Son architecture modulaire, structurée autour des composantes climat, culture, sol et irrigation, traduit des modèles d'irrigation complexes en une interface accessible et centrée sur l'utilisateur.

Les résultats des mises en œuvre pilotes montrent que l'application améliore la prise de décision en matière d'irrigation grâce à une programmation adaptative qui tient compte de la variabilité phénologique et environnementale. L'outil est actuellement reconnu dans le secteur agricole et a dépassé 2 500 téléchargements ; des efforts supplémentaires sont toutefois nécessaires pour élargir son utilisation parmi les producteurs et consolider son adoption effective. Dans l'ensemble, RiegaBien® illustre comment l'intégration des connaissances scientifiques, des infrastructures de données existantes et des technologies numériques peut combler des lacunes critiques et favoriser une gestion de l'eau agricole plus efficiente et mieux informée.

Mots clés : Transformation numérique; Agriculture de précision; Programmation formelle de l'irrigation; Système d'aide à la décision; Modèles d'irrigation.

A REFINED ENCODER–DECODER CAPSULE NETWORK FOR FINE-GRAINED CLASSIFICATION OF MULTI -CROP AGRICULTURAL SCENES

RÉSEAU DE CAPSULES ENCODEUR–DÉCODEUR AMÉLIORÉ POUR LA CLASSIFICATION FINE DE SCÈNES AGRICOLES MULTICULTURES

Wei Zhang[1], Yupu He[2*], Wei Qi[3], Zijun Mai[4], Renjing Ji[5], Nan Gu[6], Wentong Bi[7], and Yuanyuan Zha[8]

ABSTRACT

Precision agricultural monitoring depends on accurately distinguishing complex crop field patterns. Although the combination of hyperspectral imagery (HSI) and convolutional neural networks (CNNs) has become a popular approach for land cover classification, conventional CNNs still struggle to capture the joint spatial–spectral characteristics of intricate agricultural scenes due to their reliance on scalar neurons. To fill this gap, this paper presents the Agricultural Capsule Network (AgriCapsNet), an encoder–decoder capsule framework designed for fine-grained multi-crop classification with HSI. Within the encoder, a lightweight attention mechanism adaptively enhances discriminative features, while vector-based capsule layers model hierarchical part-whole relationships. The decoder is optimized through a joint formulation of margin loss and reconstruction loss, which strengthens the model's generalization ability. Experimental evaluation on a crop-rich HSI dataset demonstrates that AgriCapsNet surpasses nine existing methods, yielding an overall accuracy improvement ranging from 1.87% to 28.82%.

Keywords: Capsule network; attention mechanism; encoder–decoder; hyperspectral imagery; fine-grained crop mapping.

RÉSUMÉ

La surveillance agricole de précision repose sur la capacité à distinguer avec exactitude des configurations complexes de parcelles cultivées. Bien que l'association de l'imagerie hyperspectrale (HSI) et des réseaux neuronaux convolutifs (CNN) soit devenue une approche courante de la classification de l'occupation du sol, les CNN classiques peinent encore à saisir les caractéristiques spatiales et spectrales conjointes de scènes agricoles complexes, en raison de leur recours à des neurones scalaires. Pour combler cette lacune, cet article présente l'Agricultural Capsule Network (AgriCapsNet), un cadre capsulaire encodeur–décodeur conçu pour la classification fine de cultures multiples à partir d'HSI. Dans l'encodeur, un mécanisme d'attention léger renforce de manière adaptative les caractéristiques discriminantes, tandis que des couches de capsules vectorielles modélisent les relations hiérarchiques partie–

[1] Wei Zhang, senior engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, zhangwei@nhri.cn.

[2] Yupu He, Professorate Senior Engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, heyupu28@163.com, corresponding author.

[3] Wei Qi, senior engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, wqi@nhri.cn.

[4] Zijun Mai, engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, zjmai@nhri.cn.

[5] Renjing Ji, senior engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, E-mail: jirenjing@126.com.

[6] Nan Gu, senior engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, nanguskrskr@163.com.

[7] Wentong Bi, engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, wentongbi9867@163.com.

[8] Yuanyuan Zha, Professor, Wuhan University, China, zhayuan87@whu.edu.cn.

tout. Le décodeur est optimisé au moyen d'une formulation conjointe de la perte de marge et de la perte de reconstruction, ce qui renforce la capacité de généralisation du modèle. Une évaluation expérimentale sur un jeu de données HSI riche en cultures montre qu'AgriCapsNet surpasse neuf méthodes existantes, avec une amélioration de la précision globale comprise entre 1,87 % et 28,82 %.

Keywords: Réseau de capsules; Mécanisme d'attention; Encodeur–décodeur; Imagerie hyperspectrale; Cartographie des cultures à grain fin.

CLIMATE-RESILIENT IRRIGATION DESIGN: TRANSITION FROM GRAVITY TO ON-DEMAND DRIP IRRIGATION IN MADAGASCAR

CONCEPTION D'UNE IRRIGATION RÉSILIENTE AU CLIMAT: PASSAGE DE L'IRRIGATION GRAVITAIRE À L'IRRIGATION GOUTTE À GOUTTE À LA DEMANDE À MADAGASCAR

Maria João Calejo[1], António Capelo[1], Sara Ruivo Santos[1], Catarina Bochechas[1], and Maria Do Rosário Cameira[2]

ABSTRACT

The design of irrigation systems in climate-exposed and data-scarce regions is challenged by the absence of reliable demand data and uncertain future irrigation practices. This study addresses this issue using the Havelo–Mandrare project in southern Madagascar as a case study, where irrigation development is required under conditions of high climatic variability, limited farmer experience, and fragile soil systems. A modelling framework combining ISAREG, SRFR, and RZWQM was applied to analyse irrigation performance under contrasting scenarios. Soil characterization indicates a dominant hydraulic behaviour characterized by high infiltration capacity and limited water retention, leading to strong constraints on irrigation efficiency.

Results show that gravity irrigation can meet crop water requirements but results in substantial water losses due to deep percolation, particularly under large application depths. In contrast, drip irrigation enables better control of water application, resulting in improved alignment between actual and potential evapotranspiration and reduced losses. Although surface irrigation efficiency can be improved through reduced application depths and optimized field layouts, such configurations require very short irrigation durations and high-frequency interventions. At field scale, this implies significant operational complexity, making such solutions impractical under smallholder and manually operated conditions. The study demonstrates that irrigation performance is governed not only by hydraulic processes but also by operational feasibility. Based on these findings, a staged design approach is proposed, combining initial rotational delivery with preserved hydraulic flexibility to enable a transition towards on-demand operation. This approach supports the progressive adoption of more efficient irrigation systems while ensuring initial operability. More broadly, the results highlight the importance of designing irrigation infrastructure as adaptive systems capable of accommodating evolving practices under climatic and institutional uncertainty.

Keywords: Drip irrigation; Crop water requirements; High infiltration capacity; Hydraulic flexibility; Irrigation infrastructure.

RÉSUMÉ

La conception de systèmes d'irrigation dans les régions exposées aux aléas climatiques et pauvres en données est entravée par l'absence de données fiables sur la demande et par l'incertitude entourant les pratiques futures d'irrigation. Cette étude aborde cette question à partir du projet Havelo–Mandrare, dans le sud de Madagascar, où le développement de l'irrigation doit s'opérer dans un contexte de forte variabilité climatique, d'expérience limitée des agriculteurs et de systèmes pédologiques fragiles. Un cadre de modélisation combinant

1 AQUALOGUS – Engenharia e Ambiente, Rua do Mar da China, n.º 1 - Escritório 2.4, Portugal
2 LEAF - Linking Landscape, Environment, Agriculture and Food-Research Center, Associated Laboratory TERRA, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal Corresponding author: mariacalejo@aqualogus.com

ISAREG, SRFR et RZWQM a été appliqué pour analyser les performances de l'irrigation selon des scénarios contrastés. La caractérisation des sols met en évidence un comportement hydraulique dominant marqué par une forte capacité d'infiltration et une faible rétention d'eau, ce qui impose de fortes contraintes à l'efficience de l'irrigation.

Les résultats montrent que l'irrigation gravitaire peut satisfaire les besoins en eau des cultures, mais qu'elle entraîne d'importantes pertes d'eau par percolation profonde, en particulier lorsque les lames d'eau appliquées sont élevées. À l'inverse, l'irrigation goutte à goutte permet un meilleur contrôle de l'application de l'eau, ce qui améliore la concordance entre l'évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration potentielle et réduit les pertes. Bien que l'efficience de l'irrigation de surface puisse être améliorée en réduisant les lames appliquées et en optimisant l'aménagement des parcelles, de telles configurations nécessitent des durées d'irrigation très courtes et des interventions fréquentes. À l'échelle de la parcelle, cela implique une grande complexité opérationnelle, qui rend ces solutions peu pratiques dans les petites exploitations gérées manuellement. L'étude montre que les performances de l'irrigation sont déterminées non seulement par les processus hydrauliques, mais aussi par la faisabilité opérationnelle. Sur la base de ces résultats, une approche de conception par étapes est proposée, combinant une distribution initiale par rotation et le maintien d'une flexibilité hydraulique afin de permettre une transition vers un fonctionnement à la demande. Cette approche favorise l'adoption progressive de systèmes d'irrigation plus efficients tout en garantissant leur exploitabilité initiale. Plus largement, les résultats soulignent l'importance de concevoir les infrastructures d'irrigation comme des systèmes adaptatifs capables de s'accommoder de pratiques évolutives dans un contexte d'incertitude climatique et institutionnelle.

Mots clés : Irrigation goutte à goutte; Besoins en eau des cultures; Forte capacité d'infiltration; Flexibilité hydraulique; Infrastructures d'irrigation.

THE IMPACT OF ALTERNATE WETTING AND DRYING (AWD) ON METHANE EMISSIONS AND GROUNDWATER RECHARGE IN ORGANIC PADDY FIELDS

L'IMPACT DE L'ALTERNANCE D'HUMIDIFICATION ET D'ASSÈCHEMENT (AWD) SUR LES ÉMISSIONS DE MÉTHANE ET LA RECHARGE DES EAUX SOUTERRAINES DANS LES RIZIÈRES BIOLOGIQUES

S.-Y. Hsu[1], Y.-C. Liao[2] and C.-J. Lin[3]

ABSTRACT

This study investigates the effects of conventional continuous flooding (CF) and alternate wetting and drying (AWD) irrigation management on methane emissions and groundwater recharge in organic paddy fields at the Taoyuan District Agricultural Research and Extension Station. Field observations indicate that AWD irrigation can effectively reduce methane emissions, with the annual methane emissions from the organic rotation field being significantly lower than those from the organic continuous cropping field. However, water balance analysis showed that the rotation field had a relatively higher percolation rate, suggesting that irrigation and cropping management practices may influence groundwater recharge processes. Since paddy fields are considered important groundwater recharge sources, it is necessary to evaluate whether water-saving irrigation practices may reduce regional groundwater recharge capacity.

To analyze the influence of agricultural irrigation on groundwater systems, this study applies the THMC (Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical) model to establish a regional groundwater flow simulation system for the Taoyuan area. Compared with conventional groundwater models that mainly simulate saturated groundwater flow, the THMC model can simultaneously simulate water flow in both unsaturated and saturated zones, allowing more comprehensive representation of rainfall infiltration, irrigation recharge, and groundwater flow interactions. Geological drilling data, hydrogeological information, rainfall records, irrigation data, and groundwater observation data were integrated to construct a three-dimensional numerical groundwater model.

At the current stage, the steady-state simulation of the THMC groundwater model has been completed, and the preliminary results reasonably represent groundwater flow directions and groundwater level distributions in the Taoyuan area. Transient calibration is currently underway to improve the agreement between simulated and observed groundwater conditions. After calibration is completed, different irrigation scenarios, including CF and AWD, will be established to evaluate their effects on groundwater recharge and groundwater level variations.

Keywords: Alternate wetting and drying (AWD); Methane emissions; Paddy fields; Continuous flooding; Management practices.

RÉSUMÉ

Cette étude examine les effets de l'inondation continue conventionnelle (CF) et de la gestion de l'irrigation par alternance d'humidification et d'assèchement (AWD) sur les émissions de

1 Department of Bioenvironmental Systems Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, Email: syhsu@ntu.edu.tw
2 Department of Bioenvironmental Systems Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, Email: yingqi2723@gmail.com
3 Department of Bioenvironmental Systems Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, Email: rae5895@gmail.com

méthane et la recharge des eaux souterraines dans des rizières biologiques de la station de recherche et de vulgarisation agricoles du district de Taoyuan. Les observations de terrain indiquent que l'irrigation AWD peut réduire efficacement les émissions de méthane, les émissions annuelles de la parcelle biologique en rotation étant nettement inférieures à celles de la parcelle biologique en culture continue. Toutefois, l'analyse du bilan hydrique montre que la parcelle en rotation présente un taux de percolation relativement plus élevé, ce qui suggère que les pratiques de gestion de l'irrigation et des cultures peuvent influer sur les processus de recharge des eaux souterraines. Les rizières étant considérées comme d'importantes sources de recharge des eaux souterraines, il convient d'évaluer si les pratiques d'irrigation économes en eau peuvent réduire la capacité régionale de recharge.

Pour analyser l'influence de l'irrigation agricole sur les systèmes d'eaux souterraines, cette étude applique le modèle THMC (thermo-hydro-mécanique-chimique) afin d'établir un système régional de simulation des écoulements souterrains dans la région de Taoyuan. Contrairement aux modèles classiques d'eaux souterraines qui simulent principalement les écoulements en zone saturée, le modèle THMC peut simuler simultanément les écoulements dans les zones non saturées et saturées, ce qui permet une représentation plus complète des interactions entre l'infiltration des précipitations, la recharge due à l'irrigation et l'écoulement des eaux souterraines. Les données de forage géologique, les informations hydrogéologiques, les relevés de précipitations, les données d'irrigation et les observations des eaux souterraines ont été intégrés pour construire un modèle numérique tridimensionnel des eaux souterraines.

À ce stade, la simulation en régime permanent du modèle THMC des eaux souterraines est achevée, et les résultats préliminaires représentent de manière satisfaisante les directions d'écoulement et la distribution des niveaux piézométriques dans la région de Taoyuan. L'étalonnage transitoire est en cours afin d'améliorer la concordance entre les conditions des eaux souterraines simulées et observées. Une fois l'étalonnage terminé, différents scénarios d'irrigation, notamment CF et AWD, seront établis afin d'évaluer leurs effets sur la recharge des eaux souterraines et les variations de leur niveau.

Mots clés : Alternance d'humidification et d'assèchement (AWD); Emissions de méthane; Rizières; Inondation continue; Pratiques de gestion.

BIOFILM MODELING AND BACTERIAL TRACKING IN DRIP IRRIGATION LABYRINTH CHANNELS

MODÉLISATION DU BIOFILM ET SUIVI DES BACTÉRIES DANS LES CANAUX LABYRINTHIQUES D'IRRIGATION GOUTTE À GOUTTE

Ihab Alazzam[1,2], Nassim Ait-Mouheb[2], Yannick Knapp[3], and Olivier Boiron[1]

ABSTRACT

Drip irrigation supplied with reclaimed wastewater (*RWW*) is an effective strategy for improving water-use efficiency and reducing freshwater demand in agriculture. However, milli-labyrinth channels in drip emitters are susceptible to biofouling and clogging due to their complex flow patterns and the microbial and organic load carried by *RWW*. This study investigates the mechanisms governing particle and bacterial attachment, and biofilm development in a square-cross-section milli-labyrinth channel (0.63) through an integrated experimental and numerical approach. Channel hydrodynamics were characterized using micro-particle image velocimetry and computational fluid dynamics (CFD). Comparison between experimental measurements and numerical predictions showed that the turbulence model accurately represented the flow field (percentage difference in range (PDR) below 8%), outperforming the model (39% PDR).

As a result, the model was used for particle and bacterial tracking. Particle and bacterial transport and initial attachment were analyzed using a CFD-Discrete Phase Model, micro-particle tracking velocimetry, and green fluorescent protein-labeled Escherichia coli (GFP-*E. coli*). Results indicated that particles with trapping probabilities over 0.5 tended to deposit near the first inlet baffle. Experimental observations confirmed that both passive particles and bacteria accumulated in low-turbulence areas near the inlet. Additionally, passive particles attached to walls exposed to the mainstream flow, while GFP-*E. coli* attached to vortex regions behind baffles. Biofilm growth was assessed using biofilm modeling, and found that biofilm development was concentrated near the channel inlet, where nutrient availability was highest.

Simulations revealed that Chemical Oxygen Demand (limiting substrate) depletion along the channel, with concentrations in the middle baffles 5–6 orders of magnitude lower than those near the inlet. Biofilm growth was enhanced during non-irrigation periods, when residual water supported bacterial development. These findings demonstrate that biofouling results from coupled hydrodynamic and nutrient-driven processes, highlighting the importance of emitter design and drainage optimization for sustainable *RWW* irrigation systems.

Keywords: Biofilm modeling; Drip irrigation; Wastewater; Numerical approach; Fluid dynamics.

RÉSUMÉ

L'irrigation goutte à goutte alimentée par des eaux usées traitées (*RWW*) constitue une stratégie efficace pour améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau et réduire la demande en eau douce dans l'agriculture. Toutefois, les canaux labyrinthiques millimétriques des goutteurs

1 CNRS, École Centrale Méditerranée, IRPHE, UMR7342, Aix Marseille University, Marseille, France, Email: ihab.alazam@centrale-med.fr; Email: olivier.boiron@centrale-med.fr

2 Institute, Department, University/Company, Address, Country INRAE, UMR G-EAU, University of Montpellier, Montpellier, France, Email: nassim.ait-mouheb@inrae.fr

3 Avignon Université, LAPEC, UPR 4278, F – 84000 Avignon, France, Email: yannick.knapp@univ-avignon.fr

sont sensibles au bio-encrassement et au colmatage en raison de leurs profils d'écoulement complexes et de la charge microbienne et organique transportée par les *RWW*. Cette étude examine les mécanismes régissant la fixation des particules et des bactéries ainsi que le développement du biofilm dans un canal labyrinthique millimétrique de section carrée (0,63) au moyen d'une approche expérimentale et numérique intégrée. L'hydrodynamique du canal a été caractérisée par micro-vélocimétrie par images de particules et par mécanique numérique des fluides (CFD). La comparaison entre les mesures expérimentales et les prédictions numériques montre que le modèle de turbulence représente fidèlement le champ d'écoulement (pourcentage de différence dans la plage (PDR) inférieur à 8 %), surpassant le modèle (PDR de 39 %).

Le modèle a donc été utilisé pour le suivi des particules et des bactéries. Le transport et la fixation initiale des particules et des bactéries ont été analysés à l'aide d'un modèle CFD de phase discrète, de la micro-vélocimétrie par suivi de particules et de bactéries Escherichia coli marquées par la protéine fluorescente verte (GFP-*E. coli*). Les résultats indiquent que les particules dont la probabilité de piégeage était supérieure à 0,5 avaient tendance à se déposer près du premier déflecteur d'entrée. Les observations expérimentales ont confirmé que les particules passives et les bactéries s'accumulaient dans les zones de faible turbulence proches de l'entrée. En outre, les particules passives se fixaient aux parois exposées à l'écoulement principal, tandis que GFP-*E. coli* se fixaient dans les zones tourbillonnaires situées derrière les déflecteurs. La croissance du biofilm a été évaluée au moyen d'une modélisation du biofilm et s'est révélée concentrée près de l'entrée du canal, où la disponibilité en nutriments était la plus élevée.

Les simulations ont mis en évidence une diminution de la demande chimique en oxygène (substrat limitant) le long du canal, avec des concentrations au niveau des déflecteurs centraux inférieures de 5 à 6 ordres de grandeur à celles observées près de l'entrée. La croissance du biofilm était favorisée pendant les périodes sans irrigation, lorsque l'eau résiduelle soutenait le développement bactérien. Ces résultats montrent que le bio-encrassement résulte de processus hydrodynamiques et nutritionnels couplés, soulignant l'importance de la conception des goutteurs et de l'optimisation du drainage pour des systèmes d'irrigation durables utilisant les *RWW*.

Mots clés : Modélisation du biofilm; Irrigation goutte à goutte; Eaux usées traitées; Approche numérique; Numérique des fluides.

SPATIO-TEMPORAL TRENDS IN INDEX (CCVI) - A CASE OF DISTRICT RAHIM YAR KHAN, PAKISTAN CLIMATE CHANGE VULNERABILITY

TENDANCES SPATIO-TEMPORELLES DE L'INDICE DE VULNÉRABILITÉ AU CHANGEMENT CLIMATIQUE (CCVI) – CAS DU DISTRICT DE RAHIM YAR KHAN, AU PAKISTAN

Mohsin Hafeez,[1] Novaira Junaid,[2] Hafsa Aeman,[3] Sandra Ruckstuhl,[4] Salman Siddiqui,[5] Zohaib Shahid,[6] and Umair Rabbani[7]

ABSTRACT

Climate change is increasingly affecting water, agriculture, and socio-economic systems in developing countries with limited adaptive capacity. Pakistan is among the most climate-vulnerable countries globally, facing recurrent floods, droughts, and extreme temperatures that disrupt livelihoods and strain water resources. This study develops and applies a Climate Change Vulnerability Index (CCVI) for the District Rahim Yar Khan (R.Y. Khan), Punjab, to provide a spatially disaggregated and data-driven assessment of climate vulnerability. The CCVI integrates three dimensions including exposure, sensitivity, and adaptive capacity using socio-economic, demographic, and climate data from 2019-2023. The index is computed across four tehsils including Khanpur, Liaquatpur, Rahim Yar Khan, and Sadiq Abad with rural-urban and gender-disaggregated analysis. Findings reveal significant spatial disparities, as rural areas exhibit persistent vulnerability due to water scarcity, agricultural dependence, and limited access to services. Urban areas are increasingly vulnerable due to utility-driven factors, rapid population growth, inadequate infrastructure, and rising health risks. Tehsil Rahim Yar Khan shows increasing vulnerability trends, while Tehsil Sadiq Abad demonstrates improved resilience through community-driven initiatives. Gender-disaggregated results highlight disproportionate impacts on women, children, and elderly populations. The research contributes a replicable CCVI framework and demonstrates its operationalization through a web-based decision-support tool enabling policymakers to identify vulnerability hotspots. The findings emphasize the need for integrated water management, climate-resilient agriculture, and targeted social protection mechanisms. Aligned with the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID) priorities, the research provides actionable recommendations for sustainable irrigation planning, groundwater management, and climate-resilient agricultural systems, as the CCVI approach offers a scalable pathway for strengthening evidence-based planning and resilience in climate-affected regions across Asia and Africa.

Keywords: Spatio-temporal trends; Climate change vulnerability; Water scarcity; Rapid population growth; Climate-affected regions.

RÉSUMÉ

Le changement climatique affecte de plus en plus les systèmes hydriques, agricoles et socioéconomiques des pays en développement dont la capacité d'adaptation est limitée.

1 Strategic Program Director - International Water Management Institute, Pakistan, m.hafeez@cgiar.org
2 Socio-Economist - International Water Management Institute, n.junaid@cgiar.org
3 Remote Sensing and GIS Specialist - International Water Management Institute, h.aeman@cgiar.org
4 Research Group Leader - FloW - International Water Management Institute, s.ruckstuhl@cgiar.org
5 Natural Res.Integration Specialist - International Water Management Institute, s.siddiqui@cgiar.org
6 Web-Development and Database Senior Administrator - International Water Management Institute, z.shahid@cgiar.org
7 Spatial Hydrology and Geo-ICT Professional - Levant Consulting, u.rabbani@levantc.com

Le Pakistan figure parmi les pays les plus vulnérables aux effets du changement climatique dans le monde et subit des inondations, des sécheresses et des températures extrêmes récurrentes qui perturbent les moyens de subsistance et mettent les ressources en eau à rude épreuve. Cette étude élabore et applique un indice de vulnérabilité au changement climatique (CCVI) au district de Rahim Yar Khan (R.Y. Khan), au Pendjab, afin de fournir une évaluation spatialement désagrégée et fondée sur les données de la vulnérabilité climatique. Le CCVI intègre trois dimensions — l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation — à partir de données socioéconomiques, démographiques et climatiques couvrant la période 2019–2023. L'indice est calculé pour quatre tehsils — Khanpur, Liaquatpur, Rahim Yar Khan et Sadiq Abad — avec une analyse ventilée selon le milieu rural ou urbain et selon le genre. Les résultats révèlent d'importantes disparités spatiales : les zones rurales présentent une vulnérabilité persistante en raison de la pénurie d'eau, de la dépendance à l'agriculture et d'un accès limité aux services. Les zones urbaines deviennent de plus en plus vulnérables sous l'effet de facteurs liés aux services essentiels, d'une croissance démographique rapide, d'infrastructures insuffisantes et de risques sanitaires croissants. Le tehsil de Rahim Yar Khan présente une tendance à la hausse de la vulnérabilité, tandis que celui de Sadiq Abad affiche une résilience accrue grâce à des initiatives communautaires. Les résultats ventilés selon le genre mettent en évidence des effets disproportionnés sur les femmes, les enfants et les personnes âgées. La recherche propose un cadre CCVI reproductible et montre sa mise en œuvre au moyen d'un outil web d'aide à la décision permettant aux décideurs d'identifier les foyers de vulnérabilité. Les résultats soulignent la nécessité d'une gestion intégrée de l'eau, d'une agriculture résiliente au climat et de mécanismes ciblés de protection sociale. En cohérence avec les priorités de la Commission internationale des irrigations et du drainage (ICID), la recherche formule des recommandations opérationnelles pour la planification durable de l'irrigation, la gestion des eaux souterraines et les systèmes agricoles résilients au climat ; l'approche CCVI offre ainsi une voie évolutive pour renforcer la planification fondée sur les données probantes et la résilience dans les régions d'Asie et d'Afrique touchées par le changement climatique.

Mots clés : Tendances spatio-temporelles; Vulnérabilité au changement climatique; Pénurie d'eau; Croissance démographique rapide; Régions touchées par le changement climatique.

DIGITAL RENEWABLE-ENERGY INNOVATIONS FOR GROUNDWATER-SAFE SOLAR IRRIGATION IN A CLIMATE VULNERABLE CONTEXT - A CASE STUDY OF PUNJAB, PAKISTAN

INNOVATIONS NUMÉRIQUES EN MATIÈRE D'ÉNERGIES RENOUVELABLES POUR UNE IRRIGATION SOLAIRE PRÉSERVANT LES EAUX SOUTERRAINES DANS UN CONTEXTE DE VULNÉRABILITÉ CLIMATIQUE – ÉTUDE DE CAS DU PENDJAB, AU PAKISTAN

Mohsin Hafeez,[1] Novaira Junaid,[2] Zain Akbar,[3] Habib Ullah Bodla,[4] M. Ashraf,[5] Salman Siddiqui,[6] Kaleem Ullah,[7] Waleed Khan,[8] Zohaib Shahid,[9] Yamna Arshad,[10] and Umair Rabbani[11]

ABSTRACT

Pakistan's agriculture sector faces an intensifying water-energy-climate crisis driven by groundwater depletion, rising energy costs, and climate variability. Solar-powered irrigation systems (SPIS) have emerged as a viable alternative to diesel- and electricity-powered tubewells, offering opportunities to reduce operational costs and greenhouse gas (GHG) emissions, while improving energy access in rural areas. However, unregulated adoption of solar irrigation may accelerate groundwater over-extraction, undermining long-term sustainability. This research develops a data-driven framework to promote sustainable solar irrigation in Punjab, Pakistan, by integrating two digital decision-support tools: Solar Suitability Mapping (SSM) and Solar Irrigation Pump Sizing Tool (SIP-ST). The research combines geospatial analysis, hydrological parameters, farm-level irrigation requirements, and socio-economic variables to identify optimal locations and configurations for solar irrigation systems. Findings reveal significant spatial variability in solar suitability across Punjab, with Southern districts including Rahim Yar Khan (R.Y. Khan), Okara, and Vehari exhibiting high potential due to favorable solar irradiance and groundwater conditions. Results demonstrate that optimized pump sizing can significantly reduce energy waste and prevent over-extraction of groundwater. The integration of these tools supports irrigation efficiency and aligns solar adoption with groundwater sustainability objectives. The research further highlights the importance of linking renewable energy transitions with water governance frameworks and high-efficiency irrigation systems (HEIS). The findings contribute to policy development by offering a scalable and evidence-based model for climate-resilient agriculture thereby supporting Pakistan's commitments to sustainable development goals (SDGs) and climate mitigation strategies.

Keywords: digital innovations; climate vulnerable context; agriculture sector; groundwater depletion; long-term sustainability.

1 Strategic Program Director - International Water Management Institute, Pakistan, m.hafeez@cgiar.org
2 Socio-Economist - International Water Management Institute, n.junaid@cgiar.org
3 Policy and Water Governance Researcher - International Water Mgm. Institute, m.akbar@cgiar.org
4 Science and Policy Advisor - International Water Management Institute, h.bodla@cgiar.org
5 Country Representative - International Water Management Institute, Pakistan, m.ashraf@cgiar.org
6 Natural Resources Integration Specialist - International Water Mgmt. Institute, s.siddiqui@cgiar.org
7 Hydrologist - International Water Management Institute, k.ullah@cgiar.org
8 Remote Sensing and GIS Specialist - International Water Management Institute, - w.khan@cgiar.org
9 Web-Development and Database Senior Administrator - International Water Management Institute, z.shahid@cgiar.org
10 Socio-Economic Consultant - International Water Management Institute, - y.arshad@cgiar.org
11 Spatial Hydrology and Geo-ICT Professional - Levant Consulting, u.rabbani@levantc.com

RÉSUMÉ

Le secteur agricole pakistanais est confronté à une crise croissante de l'eau, de l'énergie et du climat, alimentée par l'épuisement des eaux souterraines, la hausse des coûts énergétiques et la variabilité climatique. Les systèmes d'irrigation à énergie solaire (SPIS) se présentent comme une solution de remplacement viable aux puits tubulaires alimentés au diesel ou à l'électricité, offrant la possibilité de réduire les coûts d'exploitation et les émissions de gaz à effet de serre (GES), tout en améliorant l'accès à l'énergie dans les zones rurales. Cependant, l'adoption non réglementée de l'irrigation solaire peut accélérer la surexploitation des eaux souterraines et compromettre la durabilité à long terme. Cette recherche élabore un cadre fondé sur les données pour promouvoir une irrigation solaire durable au Pendjab, au Pakistan, en intégrant deux outils numériques d'aide à la décision : Solar Suitability Mapping (SSM) et Solar Irrigation Pump Sizing Tool (SIP-ST). La recherche combine l'analyse géospatiale, des paramètres hydrologiques, les besoins d'irrigation à l'échelle de l'exploitation et des variables socioéconomiques afin de déterminer les emplacements et les configurations optimaux des systèmes d'irrigation solaire. Les résultats révèlent une forte variabilité spatiale de l'aptitude à l'irrigation solaire au Pendjab, les districts du sud, notamment Rahim Yar Khan (R.Y. Khan), Okara et Vehari, présentant un fort potentiel grâce à un rayonnement solaire et à des conditions de nappe favorables. Les résultats montrent qu'un dimensionnement optimisé des pompes peut réduire sensiblement le gaspillage d'énergie et prévenir la surexploitation des eaux souterraines. L'intégration de ces outils améliore l'efficience de l'irrigation et aligne l'adoption de l'énergie solaire sur les objectifs de durabilité des eaux souterraines. La recherche souligne en outre l'importance d'articuler la transition vers les énergies renouvelables avec les cadres de gouvernance de l'eau et les systèmes d'irrigation à haute efficience (HEIS). Ces résultats contribuent à l'élaboration des politiques en proposant un modèle évolutif et fondé sur des données probantes pour une agriculture résiliente au climat, soutenant ainsi les engagements du Pakistan envers les objectifs de développement durable (ODD) et les stratégies d'atténuation du changement climatique.

Mots clés : Innovations numériques; Contexte de vulnérabilité climatique; Secteur agricole; Epuisement des eaux souterraines; Durabilité à long terme.

WATER DEMAND ASSESSMENT OF NATIVE AND EXOTIC ORNAMENTAL VEGETATION COMMUNITIES USING ENERGY BALANCE AND VEGETATION INDICES IN CHILE'S MEDITERRANEAN SEMI-ARID PLANNED URBAN GARDENS

ÉVALUATION DE LA DEMANDE EN EAU DES COMMUNAUTÉS VÉGÉTALES ORNEMENTALES INDIGÈNES ET EXOTIQUES À L'AIDE DU BILAN ÉNERGÉTIQUE ET D'INDICES DE VÉGÉTATION DANS LES JARDINS URBAINS PLANIFIÉS DE LA ZONE MÉDITERRANÉENNE SEMI-ARIDE DU CHILI

Pilar M. Gil[1,6], Miguel Silva[1], Mónica Musalem[3], Víctor García[2], Octavio Lagos[4,6], Freddy Saavedra[6], Francisco Meza[1], Jael Montecinos[1,6], Sophia Tobar[1,6], and José Sasso[1]

ABSTRACT

Urban green areas in central Chile are predominantly composed of exotic ornamental vegetation, which requires continuous irrigation under increasingly water scarcity driven by the ongoing megadrought. In response, municipalities and public policies are promoting the incorporation of native species into urban landscaping and ecological restoration. However, quantitative information on the water consumption of native vegetation under heterogeneous urban conditions remains limited. This study presents preliminar results from a four-year project aimed at quantifying the water demand of native (AEC1, AEC2) and exotic ornamental vegetation communities in a Mediterranean semi-arid region of Chile. Experimental gardens were instrumented with micrometeorological and soil sensors to estimate evapotranspiration (ET) using a surface energy balance approach coupled with Monin–Obukhov similarity theory and atmospheric stability corrections. Latent and sensible heat fluxes were calibrated against Eddy Covariance data, showing moderate to high performance, particularly for sensible heat flux (NSE: 0.54–0.78; R^2: 0.63–0.82). Mean ET for a six-months period showed slight differences among vegetation groups, with higher values in AEC1 and AEC2 and lower values in EXOTIC. Under comparable irrigation management, ET normalized by NDVI and EVI revealed that AEC1 presented comparatively higher values. This suggests greater water use per unit of active vegetation, which may be associated with differences in canopy structure, physiological regulation, or direct soil evaporation. Overall, these preliminary findings highlight the potential of combining energy balance approaches and vegetation indices to characterize water-use dynamics in heterogeneous urban systems, supporting the development of native landscaping coefficients for sustainable irrigation management in water-limited Mediterranean environments. Nevertheless, continued evaluation over subsequent growing seasons remains essential, as vegetation structure and canopy development are expected to evolve over time, potentially modifying both the magnitude and trends of water use as plant communities become more fully established.

1 Pontificia Universidad Católica de Chile, College of Agriculture and Natural Sciences, Chile

2 University of Manitoba, Faculty of Agriculture and Food Sciences, Canada.

3 Jardín y Viveros Pumahuida, Chile.

4 Universidad de Concepción, Faculty of Agricultural Engineering, Chile.

5 Universidad de Playa Ancha, Faculty of Natural and Exact Sciences, Chile.

6 Consorcio Tecnológico del Agua (CotH2O), Centro Tecnológico para la Innovación ANID 20-CTEGHC-145896, Chillán, Chile

Corresponding Author´s E-mail: pmgil@uc.cl

Keywords: Water demand assessment; Energy balance; Urban green areas; Water scarcity; Irrigation management.

RÉSUMÉ

Les espaces verts urbains du centre du Chili sont principalement composés de végétation ornementale exotique, qui nécessite une irrigation continue dans un contexte de pénurie d'eau croissante due à la mégasécheresse en cours. En réponse, les municipalités et les politiques publiques encouragent l'intégration d'espèces indigènes dans l'aménagement paysager urbain et la restauration écologique. Toutefois, les données quantitatives sur la consommation d'eau de la végétation indigène dans des conditions urbaines hétérogènes restent limitées. Cette étude présente les résultats préliminaires d'un projet de quatre ans visant à quantifier la demande en eau de communautés de végétation ornementale indigène (AEC1, AEC2) et exotique dans une région méditerranéenne semi-aride du Chili. Des jardins expérimentaux ont été équipés de capteurs micrométéorologiques et de capteurs du sol afin d'estimer l'évapotranspiration (ET) au moyen d'une approche fondée sur le bilan énergétique de surface, couplée à la théorie de similitude de Monin–Obukhov et à des corrections de stabilité atmosphérique. Les flux de chaleur latente et sensible ont été étalonnés par rapport à des données de covariance des tourbillons, avec des performances modérées à élevées, notamment pour le flux de chaleur sensible (NSE : 0,54–0,78 ; R^2 : 0,63–0,82). L'ET moyenne sur une période de six mois a légèrement varié entre les groupes de végétation, avec des valeurs plus élevées pour AEC1 et AEC2 et plus faibles pour EXOTIC. À gestion d'irrigation comparable, l'ET normalisée par le NDVI et l'EVI a révélé des valeurs relativement plus élevées pour AEC1. Cela suggère une consommation d'eau plus importante par unité de végétation active, qui pourrait être liée à des différences de structure du couvert, de régulation physiologique ou d'évaporation directe du sol. Dans l'ensemble, ces résultats préliminaires montrent l'intérêt de combiner les approches de bilan énergétique et les indices de végétation pour caractériser la dynamique de l'utilisation de l'eau dans des systèmes urbains hétérogènes, et appuient l'élaboration de coefficients paysagers pour la végétation indigène en vue d'une gestion durable de l'irrigation dans les milieux méditerranéens soumis à des ressources en eau limitées. Il reste néanmoins essentiel de poursuivre l'évaluation au cours des saisons de croissance suivantes, car la structure de la végétation et le développement du couvert devraient évoluer au fil du temps, ce qui pourrait modifier à la fois l'ampleur et les tendances de l'utilisation de l'eau à mesure que les communautés végétales s'établissent pleinement.

Mots clés : Evaluation de la demande en eau; Bilan énergétique; Espaces verts urbains; Pénurie d'eau; Gestion d'irrigation.

TOWARDS IMPROVED IRRIGATION STRATEGIES: CROP WATER STATUS PROXIES IN CITRUS GROVES

VERS DE MEILLEURES STRATÉGIES D'IRRIGATION: INDICATEURS INDIRECTS DE L'ÉTAT HYDRIQUE DES CULTURES DANS LES VERGERS D'AGRUMES

Daniela Vanella[1], Giuseppe Longo-Minnolo[2], Sabrina Toscano[1], Dario Morganti[1], Giuseppina Las Casas[2], and Simona Consoli[1]

ABSTRACT

Improving water use efficiency in irrigated agriculture requires not only technological innovation but also practical frameworks for supporting irrigation management at the farm level. Despite the rapid development of precision irrigation technologies and digital tools, their effective adoption remains constrained by farmers' decision-making processes and their perceptions of risks and costs. In this context, a two-year experimental study was conducted by the researchers of University of Catania (Italy) in collaboration with the "Olive, Fruit and Citrus Research Centre" of the "Italian Council for Agricultural Research and Economics" (CREA-OFA), aiming at evaluating the feasibility of adopting innovative approaches for more efficient and adaptive irrigation management.

The study was carried out in a young citrus orchard characterized by multiple rootstock–scion combinations subjected to contrasting irrigation regimes and located at the CREA-OFA experimental farm in Sicily (Syracuse province, Italy). Specifically, full irrigation (FI) and severe deficit irrigation (DI), with water reductions of 64% compared to FI conditions, were applied using a surface ultra-low drip irrigation system. During the 2024–2025 irrigation seasons (May–September), an innovative monitoring protocol integrating low-cost thermal infrared (TIR) and visible near-infrared (VNIR) proximal sensors was implemented to derive the normalized difference vegetation index (NDVI) and thermal-based crop indicators (i.e., canopy temperature, Tc and crop water stress index, CWSI). The objective was to assess whether affordable proximal sensing technologies could provide reliable and scalable indicators for irrigation management, thereby facilitating the transition from experimental research to on-farm applications.

Results demonstrated that low-cost TIR and VNIR sensors effectively captured both spatial and temporal variability in citrus water status under Mediterranean conditions. In particular, the interaction between irrigation regime and day of the year emerged as the main driver of Tc and NDVI variability across the two irrigation seasons, highlighting the temporal dynamics of crop responses to drought stress. The CWSI clearly discriminated between irrigation levels and revealed significant genotype × irrigation regime interactions, highlighting contrasting adaptive responses among rootstock–scion combinations. These findings suggest that proximal sensing technologies have reached a sufficient level of maturity to support irrigation management services. However, further research is still needed to develop a structured evaluation framework linking VNIR and TIR data with plant physiological responses and irrigation performance in order to derive user-friendly water status indicators and operational thresholds.

Keywords: Irrigation strategies; Water use efficiency; Adaptive irrigation management; Deficit irrigation; Water stress.

1 Dipartimento di Agricoltura, Alimentazione e Ambiente (Di3A), Università degli Studi di Catania, Via S. Sofia 100, 95123 Catania, Italy

2 Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e L'Analisi Dell'Economia Agraria, Centro di Ricerca Olivicoltura, Frutticoltura e Agrumicoltura, Corso Savoia, 190, 95024 Acireale, Italy

RÉSUMÉ

L'amélioration de l'efficience d'utilisation de l'eau en agriculture irriguée nécessite non seulement des innovations technologiques, mais aussi des cadres pratiques d'appui à la gestion de l'irrigation à l'échelle de l'exploitation. Malgré le développement rapide des technologies d'irrigation de précision et des outils numériques, leur adoption effective demeure limitée par les processus décisionnels des agriculteurs et leur perception des risques et des coûts. Dans ce contexte, une étude expérimentale de deux ans a été menée par les chercheurs de l'Université de Catane (Italie), en collaboration avec l'« Olive, Fruit and Citrus Research Centre » du « Italian Council for Agricultural Research and Economics » (CREA-OFA), afin d'évaluer la faisabilité de l'adoption d'approches innovantes pour une gestion de l'irrigation plus efficiente et adaptative.

L'étude a été menée dans un jeune verger d'agrumes comportant plusieurs combinaisons porte-greffe–greffon soumises à des régimes d'irrigation contrastés, situé dans la ferme expérimentale du CREA-OFA en Sicile (province de Syracuse, Italie). Plus précisément, une irrigation complète (FI) et une irrigation déficitaire sévère (DI), avec une réduction de l'eau de 64 % par rapport aux conditions FI, ont été appliquées au moyen d'un système d'irrigation goutte à goutte de surface à ultra-faible débit. Au cours des saisons d'irrigation 2024–2025 (mai–septembre), un protocole de suivi innovant intégrant des capteurs proximaux TIR et VNIR à faible coût a été mis en œuvre afin de calculer l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) et des indicateurs thermiques des cultures (c.-à-d. la température du couvert, Tc, et l'indice de stress hydrique des cultures, CWSI). L'objectif était d'évaluer si des technologies abordables de télédétection proximale pouvaient fournir des indicateurs fiables et évolutifs pour la gestion de l'irrigation, facilitant ainsi le passage de la recherche expérimentale aux applications à l'échelle de l'exploitation.

Les résultats montrent que les capteurs TIR et VNIR à faible coût ont efficacement saisi la variabilité spatiale et temporelle de l'état hydrique des agrumes dans des conditions méditerranéennes. En particulier, l'interaction entre le régime d'irrigation et le jour de l'année s'est révélée le principal facteur de variabilité de Tc et du NDVI au cours des deux saisons d'irrigation, mettant en évidence la dynamique temporelle des réponses des cultures au stress dû à la sécheresse. Le CWSI a clairement distingué les niveaux d'irrigation et mis en évidence des interactions significatives entre le génotype et le régime d'irrigation, ce qui révèle des réponses adaptatives contrastées selon les combinaisons porte-greffe–greffon. Ces résultats suggèrent que les technologies de détection proximale ont atteint un degré de maturité suffisant pour soutenir les services de gestion de l'irrigation. Des recherches supplémentaires restent toutefois nécessaires pour élaborer un cadre d'évaluation structuré reliant les données VNIR et TIR aux réponses physiologiques des plantes et aux performances de l'irrigation, afin de définir des indicateurs de l'état hydrique et des seuils opérationnels faciles à utiliser.

Mots clés : Stratégies d'irrigation; Efficience d'utilisation de l'eau; Gestion de l'irrigation adaptative; Irrigation déficitaire; Stress hydrique.

Q.67.2: At the territorial scale, irrigation water management is jointly influenced by agricultural, economic, environmental, and regulatory drivers. How can the decision-making process be explained and improved?

À l'échelle territoriale, la gestion de l'eau d'irrigation est influencée conjointement par des facteurs agricoles, économiques, environnementaux et réglementaires. Comment est-ce que le processus de prise de décision peut expliquer et améliorer?

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS — **Page No.**

R.67.2.01 **WATSIM: AI AND SATELLITE DECISION SUPPORT FOR IRRIGATION** — 391
WATSIM: INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET SYSTEME D'AIDE A LA DECISION BASEE SUR LES DONNEES SATELLITAIRES POUR L'IRRIGATION
Aiten Alava, Prof. Nicolas Baghdadi, Mohamed-Dhia Turki, Jeremy Fain, Audrey Gabbay,Dr Mohamad Hamze, Dr Anil Khanal, Dr Benoît Nigon, Hugo Tricou, Piotr Stepnicki (Paris)

R.67.2.02 **CO-CREATING A REMOTE SENSING–BASED DIGITAL TOOL FOR IRRIGATION PERFORMANCE MONITORING: THE CASE OF THE OFFICE DU NIGER IN MALI** — 393
CO-CRÉATION D'UN OUTIL NUMÉRIQUE BASÉ SUR LA TÉLÉDÉTECTION POUR LE SUIVI DES PERFORMANCES D'IRRIGATION : LE CAS DE L'OFFICE DU NIGER AU MALI
S.J. Zwart , M. Dembélé , P. Schmitter , S. Konare , C.J. van der Sande , B. Koné and B. Kassambara (Ghana)

R.67.2.03 **ASSESSING FUTURE RUNOFFS UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS IN THE MAE KLONG RIVER BASIN, THAILAND** — 395
ÉVALUATION DES DÉBITS DE RUISSELLEMENT FUTURS SELON DIFFÉRENTS SCÉNARIOS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DE MAE KLONG, EN THAÏLANDE
Thepprasit C., Vongphet, J., Puttrawutichai, S., Ruangrassamee, P., Chaowiwat, W. and Sittichok, K. (Thailand)

R.67.2.04 **ECO-EFFICIENCY OF DIFFERENT LAND USE SCENARIOS BASED ON LIFE CYCLE ASSESSMENT** — 397
EFFICACITÉ ÉCOLOGIQUE DE DIFFÉRENTS SCÉNARIOS D'USAGES DES SOLS SUR LA BASE D'UNE ANALYSE DU CYCLE DE VIE
Agata Sferratore, Pacôme Dewaele, Fanélie Meyer, Nicolas Urruty, Hanna Audran, Mamadou Diarra, Loïc Duffar, Emmanuel Patenotre, Nicolas Rogy and Benjamin Seux (France)

R.67.2.05 **DROUGHT-STAGE SEGMENTATION AND XGBOOST-BASED PREDICTION OF IRRIGATION SUPPLY CAPACITY FOR MONSOON-DOMINATED AGRICULTURAL RESERVOIRS IN EAST ASIA** — 399
SÉGMENTATION DES PHASES DE SÉCHERESSE ET PRÉVISION À L'AIDE DE XGBOOST DE LA CAPACITÉ D'APPROVISIONNEMENT EN EAU D'IRRIGATION DES RÉSERVOIRS AGRICOLES SOUMIS À LA MONSOON EN ASIE ORIENTALE
Mihye Yang, Wonho Nam, Kwangya Lee, Kwangsik Yoon (Korea)

R.67.2.06 **ECONOMIC ANALYSIS TO AID DECISION-MAKING FOR AGROECOLOGICAL TRANSITION PROJECTS** — 401
ANALYSE ÉCONOMIQUE AU SERVICE DE LA PRISE DE DÉCISION POUR LES PROJETS DE TRANSITION AGROÉCOLOGIQUE
Deram Malerbe F., Bazin F. and Cédat S. (Belgium)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.67.2.07 **PRACTICE AND REFLECTIONS ON PROMOTING THE CONSTRUCTION AND MANAGEMENT OF MODERN IRRIGATION DISTRICTS THROUGH THE "SYNERGY OF GOVERNMENT AND MARKET"** **403**
PRATIQUES ET REFLEXIONS SUR LA PROMOTION DE LA CONSTRUCTION ET DE LA GESTION DE PERIMETRES IRRIGUES MODERNES GRACE A LA «SYNERGIE ENTRE GOUVERNEMENT ET MARCHE»
Renjing Ji, Jing Fu, Yupu He (China)

R.67.2.08 **NESTED SCALES AND INSTITUTIONAL FRAGMENTATION.THE CASE OF WATER GOVERNANCE IN THE CRAU PLAIN** **405**
ÉCHELLES IMBRIQUÉES ET FRAGMENTATION INSTITUTIONNELLE. LE CAS DE LA GOUVERNANCE DE L'EAU DANS LA PLAINE DE LA CRAU
Guérin Tristan, Montginoul Marielle, Molle François (Paris)

R.67.2.09 **WATER AND AGRICULTURAL RESILIENCE IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE** **407**
RÉSISTANCE DE L'EAU ET DE L'AGRICULTURE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE
Madhuri Rampalli, Nikhilesh Kumar (India)

R.67.2.10 **WATER RESOURCES VULNERABILITY AND ADAPTIVE STRATEGIES UNDER CLIMATE CHANGE IN ALGERIA** **409**
VULNÉRABILITÉ DES RESSOURCES EN EAU ET STRATÉGIES D'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN ALGÉRIE
Tarek Bouregaa (Algeria)

R.67.2.11 **SOIL VISION BY WEENAT: ESTIMATING SOIL MOISTURE FOR EUROPEAN AGRICULTURE USING MACHINE LEARNING METHODS** **412**
SOIL VISION PAR WEENAT: ESTIMATION DE L'HUMIDITÉ DU SOL POUR L'AGRICULTURE EUROPÉENNE À L'AIDE DE MÉTHODES D'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE
E. Buisson, M. Sauveur, P. Giquel, S. Coly, M. El Fakraoui, R. Vallée (France)

R.67.2.12 **ASSESSING FLOOD-INDUCED SALINITY RISKS IN COASTAL IRRIGATION SYSTEMS USING INUNDATION ANALYSIS AND WATER QUALITY DATA: A CASE STUDY OF INDRAMAYU, INDONESIA** **414**
ÉVALUATION DES RISQUES DE SALINITE INDUITS PAR LES INONDATIONS DANS LES SYSTEMES D'IRRIGATION COTIERS A L'AIDE D'ANALYSES D'INONDATION ET DE DONNEES SUR LA QUALITE DE L'EAU: UNE ETUDE DE CAS D'INDRAMAYU, EN INDONESIE
Sanidhya Nika Purnomo, Wahyu Widiyant, Alifia Nuraini Sugiartoputr, Dinda Dwi Oktavianingtiyas, Raja Muhamad Muslim, Muhammad Naufal Al Hafizh, Arief Dhiaksa, Alfyan Amar Pratama (Indonesia)

R.67.2.13 **CLUSTER-MATRIX TOOLS FOR IRRIGATED AGRICULTURE IN INTERFLUVE** **417**
OUTILS «CLUSTER-MATRICE» POUR L'AGRICULTURE IRRIGUÉE EN L'INTERFLUVE
Liudmila N. Medvedeva, and Irina G. Bondarik (Russia)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.67.2.14 **INTEGRATED MODELING OF FIELD DRAINAGE AND ENGINEERING SCHEDULING FOR PLAIN RIVER NETWORK IRRIGATION DISTRICTS IN SOUTHERN CHINA** 420
MODÉLISATION INTÉGRÉE DU DRAINAGE DES CHAMPS ET DE LA PROGRAMMATION DU GENIE POUR LES PERIMETRES IRRIGUES DU RÉSEAU FLUVIAL PLAT AU SUD DE LA CHINE
Boyu Mi, Haorui Chen1, Baozhong Zhang, Yuan Tao, Xiaoyan Guan, Xinggang Liu, Hui Sheng and Qinghong Yan(China)

R.67.2.15 **GCCM TECHNOLOGY FOR IRRIGATION CANAL REHABILITATION: TWO CASE STUDIES** 422
TECHNOLOGIE GCCM POUR LA RÉHABILITATION DES CANAUX D'IRRIGATION: DEUX ÉTUDES DE CAS
Tamás Szatmári, Darren Hughes, and József Richter (United Kingdom)

R.67.2.16 **SUSTAINABILITY ISSUES OF WATER USE ON THE DEVELOPMENT OF HETAO IRRIGATION DISTRICT, THE YELLOW RIVER BASIN** 424
QUESTIONS DE LA DURABILITÉ DE L'UTILISATION DE L'EAU DANS LE DÉVELOPPEMENT DU DISTRICT D'IRRIGATION DE HETAO, DU BASSIN VERSANT DE JAUNE
Weiying Feng, Chia Min Ho, Qingfeng Miao, Zhuangzhuang Feng, Isabel Maria Duarte, and José Manuel Gonçalves (china)

R.67.2.17 **FROM STARS TO REALITY: DEVELOPING A GEOSPATIAL APPLICATION FOR NATIONAL IRRIGATION PLANNING AND MONITORING – A PRACTICAL JOURNEY FROM RWANDA** 426
DES ÉTOILES À LA RÉALITÉ: DÉVELOPPER UNE APPLICATION GÉOSPATIALE POUR LA PLANIFICATION ET LE SUIVI DE L'IRRIGATION NATIONALE – VOYAGE PRATIQUE AU RWANDA
Romain Vidal, Jules Wijting, Stéphane Delichère (France)

R.67.2.18 **BRIDGING WATER ACCOUNTING AND THE WEFE NEXUS THROUGH AN INTERACTIVE WEB PLATFORM FOR CLIMATE-RESILIENT IRRIGATION MANAGEMENT AND PLANNING** 428
ÉTABLISSEMENT D'UN LIEN ENTRE LA COMPTABILITÉ DE L'EAU ET LE LIEN ENTRE WEFE VIA UNE PLATEFORME WEB INTERACTIVE POUR UNE GESTION ET UNE PLANIFICATION DE L'IRRIGATION RÉSISTANTE AU CLIMAT
Ali Hammani, Ehssan El Meknassi Youssoufi (Morocco)

R.67.2.19 **DEVELOPMENT OF AN ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR WATER DEMAND IN TAIWAN, SHIH-MEN REGION** 430
DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR LA DEMANDE EN EAU DANS LA RÉGION DE SHIH-MEN, A TAIWAN
Tung Yeh, Hsueh-Yen Shih, Tzu-Ying Lee, Cheng-Hsun Wu, and Candera Wijaya (Taiwan)

R.67.2.20 **CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR IRRIGATION MANAGEMENT TECHNOLOGY IN CALIFORNIAN SMALL FARMS** 433
DEFIS ET OPPORTUNITES LIES AUX TECHNOLOGIES DE GESTION DE L'IRRIGATION POUR LES PETITES EXPLOITATIONS AGRICOLES CALIFORNIENNES
G. Ingersoll, M. Fairbairn, and C. Leauthaud (United State)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.67.2.21 INCREASING SOCIAL DEMAND FOR PUBLIC ECOSYSTEM SERVICES OF IRRIGATION CANALS UNDER CLIMATE CHANGE AND URBANIZATION 435
AUGMENTATION DE LA DEMANDE SOCIALE POUR LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES PUBLICS DES CANAUX D'IRRIGATION DANS LE CADRE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DE L'URBANISATION
So Imuta, Kentaro Otsuka, Kohei Suzuki, and Keigo Noda (Japan)

R.67.2.22 MULTIPURPOSE SMART WATER NETWORKS: IOT AND DIGITAL TECHNOLOGY FOR OPTIMIZED WATER USES AND GLOBAL IRRIGATION MANAGEMENT 437
RÉSEAUX D'EAU INTELLIGENTS POLYVALENTS: IOT ET TECHNOLOGIE NUMÉRIQUE POUR L'OPTIMISATION DES USAGES D'EAU ET LA GESTION D'IRRIGATION À L'ÉCHELLE MONDIALE
Frédéric Bonnadier, Guillaume Dallard, Arnaud Ouedraogo, Emmanuel Patenotre, and Evelyne Tepinier (France)

R.67.2.23 REMOTE SENSING FOR SUSTAINABLE IRRIGATION MANAGEMENT: CURRENT APPROACHES AND FUTURE PERSPECTIVES 439
TÉLÉDÉTECTION POUR UNE GESTION DURABLE DE L'IRRIGATION: APPROCHES ACTUELLES ET PERSPECTIVES D'AVENIR
Christina Orieschnig, Julien Lecollinet, Guillaume Thirel, Franck Bellet, Gilles Boulet, and Jean-Philippe Venot (France)

R.67.2.24 RATIONALIZING RICE IRRIGATION STRATEGIES IN NORTHERN ITALY USING QGIS-SWAP-PADDY AND MODFLOW-6 441
RATIONALISATION DES STRATÉGIES D'IRRIGATION RIZICOLEAU NORD DE L'ITALIE À L'AIDE DE QGIS-SWAP-PADDY ET MODFLOW-6
Giulio L.C. Gilardi, Michele Rienzner, Darya Tkachenko, Marco Romani, Petra Baják, Michael Valtorta, Lorenzo Sangalli, Daniele Pedretti, Marco Masetti and Arianna Facchi (Italy)

R.67.2.25 ADAPTIVE AI-DRIVEN WATER MANAGEMENT FRAMEWORK FOR SHADEGAN WETLAND 443
CADRE DE GESTION DE L'EAU ADAPTATIF PILOTÉ PAR L'IA POUR LA ZONE HUMIDE DE SHADEGAN
Anna Pinnarelli, Mehdi Forouzanfar, and Khoshnaz Payandeh (Italy)

R.67.2.26 RESEARCH ON WATER AND LAND RESOURCES REGULATION TECHNOLOGY AND DEVELOPMENT STRATEGIES IN IRRIGATED AREAS OF THE YELLOW RIVER BASIN 445
RECHERCHE SUR LA TECHNOLOGIE DE RÉGULATION DES RESSOURCES EN EAU ET EN TERRE ET STRATÉGIES DE DÉVELOPPEMENT DANS LES ZONES IRRIGUÉES DU BASSIN VERSANT DE JAUNE
Sun Suyan, Li Wei, Gan Chun, Peng Shaoming, Long Xiaoxu, Li Guangxuan, Song Qiubo, and Li Yunling (china)

R.67.2.27 A MULTI-SCALE ASSESSMENT OF IRRIGATION GOVERNANCE AND SMART ALLOCATION MECHANISMS FOR ENHANCING WATER USE EFFICIENCY UNDER CLIMATE VARIABILITY IN MALAYSIA 447
UNE ÉVALUATION A ECHELLE MULTIPLE DE LA GOUVERNANCE DE L'IRRIGATION ET DES MÉCANISMES D'ALLOCATION INTELLIGENTE POUR AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE L'UTILISATION DE L'EAU FACE À LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE EN MALAISIE
Y. Hj Mohd Sani, and M.A.A. Jamaari (Malaysia)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.67.2.28 **THE XAI-NEXUS FRAMEWORK: BRIDGING GOVERNANCE GAPS THROUGH EXPLAINABLE AI FOR RESILIENT WATER MANAGEMENT** 449
LE CADRE XAI-NEXUS: COMBLER LES LACUNES DE GOUVERNANCE GRÂCE À L'IA EXPLICABLE POUR UNE GESTION RÉSISTANTE DE L'EAU
Behzad Navidi Nassaj, and Narges Zohrabi (Iran)

R.67.2.29 **REMOTE SENSING-BASED ASSESSMENT OF HYDRO-CLIMATIC AND LAND USE CHANGES IN THE KOK RIVER BASIN, NORTHERN THAILAND** 451
ÉVALUATION PAR TÉLÉDÉTECTION DES CHANGEMENTS HYDROCLIMATIQUES ET DES USAGES DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DE KOK, AU NORD DE LA THAÏLANDE
Kaprom C., Suiadee W., Prechawit C., Maneephai S., Kowsuvon N., Suepsahakarn R., Maekan E., Saelo W., Noicharoen T., Kosinyawong R., Siyanan S., Williams J., and Sriwongsitanon N., (Thailand)

R.67.2.30 **STUDY ON OPTIMAL ALLOCATION OF WATER-GRAIN SYSTEM IN IRRIGATION AREAS** 453
ÉTUDE SUR L'ALLOCATION OPTIMALE DU SYSTEME EAU-CEREALES DANS LES ZONES D'IRRIGATION
Wei Liu, Jinyang Li, and Yanyu Lin (China)

R.67.2.31 **MAPPING SOIL WATER AND CARBON FROM PLOT TO WATERSHED WITH MULTI-SOURCE DATA** 454
CARTOGRAPHIE DE L'EAU DU SOL ET DU CARBONE DE LA PARCELLE AU BASSIN VERSANT AVEC DES DONNÉES PROVENANT DE SOURCES MULTIPLES
Charrière S., Zhao XY., Doussan C., Bérard A., Flamain F., Pouget G., Chapelet A. and Courault D., (France)

R.67.2.32 **A PHYSICS-ML APPROACH FOR RESOLVING MORPHODYNAMIC INSTABILITIES IN HIGHLY REGULATED RIVER BASINS** 456
UNE APPROCHE ALLIANT PHYSIQUE ET APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE POUR RÉSOUDRE LES INSTABILITÉS MORPHODYNAMIQUES DANS LES BASSINS VERSANTS FORTEMENT RÉGULÉS
Sentani, S.I. Wahyudi, M. Mukhlisin and F.C Boogaard (Indonesia)

R.67.2.33 **REMOTE SENSING OF DRAINED AGRICULTURAL LANDS** 458
TÉLÉDÉTECTION DES TERRES AGRICOLES DRAINÉES
Yuri. G Yanko (Russia)

R.67.2.34 **RESEARCH ON TECHNICAL MEASURES AND STRATEGIES FOR IRRIGATION AND DRAINAGE DEVELOPMENT IN THE YELLOW RIVER BASIN UNDER CLIMATE CHANGE** 459
RECHERCHE SUR LES MESURES TECHNIQUES ET LES STRATÉGIES POUR LE DÉVELOPPEMENT DE L'IRRIGATION ET DU DRAINAGE DANS LE BASSIN VERSANT DE JAUNE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE
Shaoming Peng, Xiaoxu Long, Suyan Sun, Qiubo Song, and Yunling Li (China)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.67.2.35 ASSESSMENT OF BIAS CORRECTION FOR SATELLITE PRECIPITATION IN A MONSOON-INFLUENCED BASIN: PHETCHABURI RIVER BASIN, THAILAND 461
ÉVALUATION DE LA CORRECTION DU BIAIS DES PRÉCIPITATIONS SATELLITAIRES DANS UN BASSIN INFLUENCÉ PAR LA MOUSSON: BASSIN VERSANT DE PHETCHABURI, THAÏLANDE
Jutithep Vongphet, Thirasak Saion, Ketvara Sitichok Songsak Puttrawutichai, Chaiyapong Thepprasit, Polpech Samanmit, Bancha Kwanyuen and Sasiwimol Khawkomol, (Thailand)

R.67.2.36 SPATIO-TEMPORAL IRRIGATION DEMAND FORECASTING USING SATELLITE DATA AND MACHINE LEARNING 463
PREVISION SPATIO-TEMPORELLE DE LA DEMANDE EN EAU D'IRRIGATION À L'AIDE DE DONNÉES SATELLITAIRES ET D'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE
Mohsin Hafeez, Hafsa Aeman, Umar Liaquat, Sarfraz Munir, Habibullah Bodla, and Aarish Maqsood (Pakistan)

R.67.2.37 FROM IMT/ PIM TO WATERSHED DECISIONS: A REFRAMING APPROACH TO IRRIGATION GOVERNANCE 465
DE L'IMT/PIM AUX DÉCISIONS LIÉES AUX BASSINS VERSANTS: UNE APPROCHE DE RECADRAGE DE LA GOUVERNANCE DE L'IRRIGATION
Zahra Soltani and Narges Zohrabi (Iran)

R.67.2.38 SYNERGISTIC WATER-ENERGY MANAGEMENT: PHOTOVOLTAIC CANAL COVERS FOR CLIMATE RESILIENCE IN ARID REGIONS 467
GESTION SYNERGIQUE EAU-ÉNERGIE: COUVERTURES PHOTOVOLTAÏQUES DE CANAUX POUR LA RÉSISTANCE CLIMATIQUE DANS LES RÉGIONS ARIDES
Milad Rezaei, and Mohammad Javad Monem (Iran)

R.67.2.39 LEVERAGING ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND DATA GOVERNANCE FOR RESILIENT AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT: THE SAUDI ARABIAN EXPERIENCE 469
OPTIMISER L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET LA GOUVERNANCE DES DONNÉES POUR UNE GESTION RÉSISTANTE DE L'EAU AGRICOLE: L'EXPÉRIENCE DE L'ARABIE SAOUDIENNE
Mohammad. Alomair (Saudi)

R.67.2.40 AGRICULTURE AS A SOCIAL SECURITY MODEL: IMPLICATIONS FOR FOOD SECURITY AND LIVELIHOODS IN ZIMBABWE'S CHIVI DISTRICT OF MASVINGO PROVINCE 471
L'AGRICULTURE IRRIGUÉE COMME MODÈLE DE SÉCURITÉ SOCIALE :IMPLICATIONS POUR LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE ET LES MOYENS DE SUBSISTANCE DANS LE PERIMETRE DE CHIVI (PROVINCE DE MASVINGO), AU ZIMBABWE
Bezzel Chitsungo (Zimbabwe)

R.67.2.41 ENHANCING MULTI-DURATION EXTREME RAINFALL CHARACTERIZATION THROUGH BIVARIATE REGIONAL FREQUENCY ANALYSIS: INTEGRATING R-LARGEST AND ANNUAL MAXIMA 473
AMÉLIORER LA CARACTÉRISATION DES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES À DURÉES MULTIPLES GRÂCE À UNE ANALYSE BIDIMENSIONNELLE DE LA FRÉQUENCE RÉGIONALE BIVARIÉE: INTÉGRATION DES MAXIMA R-LES PLUS GRANDS ET ANNUELS
Adisa Hammed Akinsoji and Kyung Sook Choi (South Korea)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.67.2.42 ESTIMATING IRRIGATION DEMAND AT TERRITORIAL SCALE: AN OPEN-DATA BASED APPROACH 475
ESTIMATION DE LA DEMANDE EN EAU IRRIGATION A L'ECHELLE TERRITORIALE: UNE APPROCHE BASEE SUR DES DONNEES OUVERTES
P. Rouault, D. Dorchies, C. Richert, and G. Belaud (France)

R.67.2.43 WATER METERING INSTITUTIONS, SCARCITY SIGNALS, AND IRRIGATION EFFICIENCY: ECONOMIC IMPLICATIONS FOR WATER PRODUCTIVITY IN SOUTH AFRICA 476
INSTITUTIONS DE COMPTAGE D'EAU, SIGNAUX DE RARETÉ ET EFFICACITÉ DE L'IRRIGATION: IMPLICATIONS ÉCONOMIQUES POUR LA PRODUCTIVITÉ DE L'EAU EN AFRIQUE DU SUD
Grové B., Strydom J.D. and Matthews N. (South Africa)

R.67.2.44 SMART IRRIGATION AND DRAINAGE SYSTEM TO ENHANCE THE NORDIC AGRICULTURE RESILIENCE UNDER CLIMATE CHANGE 478
SYSTÈME INTELLIGENT D'IRRIGATION ET DE DRAINAGE POUR AMÉLIORER LA RÉSISTANCE DE L'AGRICULTURE NORDIQUE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE
Alireza Gohari, Mojtaba Saboori, Minna Mäkelä, Olle Häggblom, and Ali Torabi Haghighi (Finland)

R.67.2.45 IRRIGATION WATER USE EFFICIENCY OF AGROCENOSES AT LEFT BANK OF LOWER VOLGA RIVER 480
EFFICACITÉ DE L'UTILISATION DE L'EAU D'IRRIGATION DES AGROCÉNOSES SUR LA RIVE GAUCHE DE LA BASSE VOLGA
Anatoly Zeyliger, and Olga Ermolaeva (Russia)

R.67.2.46 RECHARGE BASIN DESIGN, SOUTHERN SANJOAQUIN MUNICIPAL UTILITY DISTRICT 481
CONCEPTION DU BASSIN DE REALIMENTATION, DISTRICT MUNICIPAL DE SERVICES PUBLICS DE SAN JOAQUIN DU SUD
Sam Schaefer P.E., Luis Flores, Fabian Acuna and Ethan Hunter, Grace Martin, and Roland Gross (USA)

R.67.2.47 INTEGRATED TERRITORIAL IRRIGATION REFORM UNDER LOW EFFICIENCY AND CLIMATE-CONSTRAINED RIVER FLOWS: IADA SEBERANG PERAK, MALAYSIA 483
RÉFORME INTÉGRÉE DE L'IRRIGATION TERRITORIALE DANS LE CONTEXTE D'UNE FAIBLE EFFICACITÉ ET DES DÉBITS FLUVIAUX CONTRAINTS PAR LE CLIMAT: IADA SEBERANG PERAK, MALAISIE
S.H. Husain and S.P. Lim (Malaysia)

R.67.2.48 MOSIS - SATELLITE-MANAGED IRRIGATION WATER FEES - APPLICATION TO RICE PERIMETER IN SENEGAL 485
MOSIS - TARIFICATION DE L'EAU D'IRRIGATION GEREES PAR SATELLITE - APPLICATION SUR LE PERIMETRE RIZICOLE DU SENEGAL
Jean-Philippe Luc, and Marie Lefranc (France)

R.67.2.49 ASSESSMENT OF HYDRAULIC PERFORMANCE OF CANAL USING AERIAL SURVEY AND HEC-RAS MODEL: CASE STUDY OF GUJARAT, INDIA 487
ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE HYDRAULIQUE DU CANAL À L'AIDE D'UNE ÉTUDE AÉRIENNE ET D'UN MODÈLE HEC-RAS: ÉTUDE DE CAS DE L'ETAT DE GUJARAT, INDE
Arbaaz Shaikh, Azazkhan Pathan, Harsh Shah, and Vivek Kapadia (India)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.67.2.50 **EVOLUTION OF REMOTE SENSING APPLICATIONS IN THAILAND: FROM ENVIRONMENTAL MONITORING TO NATIONAL WATER ACCOUNTING AND WATER RESOURCES MANAGEMENT** 489
ÉVOLUTION DES APPLICATIONS DE TÉLÉDÉTECTION EN THAÏLANDE: DU SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTAL À LA COMPTABILITÉ NATIONALE DE L'EAU ET À LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU
Nutchanart Sriwongsitanon, James A. Williams, Chanphit Kaprom, Sansarith Thianpopirug, Ekkarin Maekan, Chainarong Ophaphaibun, Nattakorn Prasertthonggorn, Chaiwat Prechawit, Satit Maneephai, Watchara Suiadee, Noppadon Kowsuvon, Rasu Suepsahakarn, Hubert H.G. Savenije, and Wim Bastiaanssen (Thailand)

R.67.2.51 **ASSESSMENT OF GROUNDWATER AND SURFACE WATER USE EFFICIENCY (WUE) AND ECONOMIC WATER PRODUCTIVITY ACROSS THAILAND AGRICULTURAL SECTOR THROUGH THE LENS OF SUSTAINABILITY** 492
ÉVALUATION DE L'EFFICACITE DE L'UTILISATION DES EAUX SOUTERRAINES ET DE SURFACE (WUE) ET DE LA PRODUCTIVITE ECONOMIQUE DE L'EAU DANS LE SECTEUR AGRICOLE THAÏLANDAIS A TRAVERS LE PRISME DE LA DURABILITE
Aksara Putthividhya, Sasin Jirasirirak, and Somkiat Prajamwong (Thailand)

R.67.2.52 **WATER SOBRIETY AS A LEVER FOR IMPROVED TERRITORIAL WATER ALLOCATION** 495
LA SOBRIÉTÉ COMME LEVIER POUR AMÉLIORER L'ALLOCATION DES EAUX TERRITORIALES
Sandrine Pignard, and Pascal Auzier (France)

R.67.2.53 **EARTH OBSERVATION–ENABLED DECISION SUPPORT FOR TERRITORIAL-SCALE IRRIGATION WATER MANAGEMENT** 496
AIDE À LA DÉCISION ACTIVÉE PAR L'OBSERVATION DE LA TERRE POUR LA GESTION DE L'EAU D'IRRIGATION À L'ÉCHELLE TERRITORIALE
Guido D'urso, Carlo De Michele, Oscar Rosario Belfiore, and Salvatore Falanga Bolognesi (Italy)

WATSIM: AI AND SATELLITE DECISION SUPPORT FOR IRRIGATION

WATSIM : INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET SYSTEME D'AIDE A LA DECISION BASEE SUR LES DONNEES SATELLITAIRES POUR L'IRRIGATION

Aiten Alava, Nicolas Baghdadi, Mohamed-Dhia Turki, Jeremy Fain[1], Audrey Gabbay, Dr Mohamad Hamze, Dr Anil Khanal, Dr Benoît Nigon, Hugo Tricou, and Piotr Stepnicki

ABSTRACT

Climate change is amplifying hydrological variability through rising temperatures, altered rainfall regimes, and more frequent extreme events, which in turn lengthen, intensify, and desynchronise drought episodes. These dynamics undermine the capacity of territories to guarantee water security, sustain economic activities, and preserve aquatic and groundwaterdependent ecosystems. For basin organisations and regulatory agencies, growing uncertainty complicates the allocation of limited water resources among irrigation, drinkingwater supply, industry, hydropower generation, and environmental flows, while regulatory pressure and stakeholder expectations for transparency continue to increase. In certain regions, successive dry years and recurring conflicts among users have made these tensions highly visible, with agriculture frequently exposed to early and severe restrictions.

Conventional management approaches, relying on rating curves, static operating rules, and expost diagnostics, remain largely reactive and offer limited capacity to explore alternative restriction or allocation strategies before critical thresholds are reached. Proactive management therefore requires decisionsupport tools capable of projecting future resource availability, simulating contrasted abstraction scenarios, and providing a shared quantitative basis for planning, and droughtmanagement gestion. WatSim responds to these needs with a basin-scale hydrological simulator. Mainly developed by BWI (Blue Water Intelligence), with INRAE's TETIS as scientific partner and co-funded by the Occitanie Region under France 2030 via Bpifrance, the platform is structured around four functions: representing hydrological dynamics at high spatial and temporal resolution under climate stress; explicitly modelling abstractions by use, especially agricultural withdrawals; integrating satellite data to better characterise demand and resource conditions; and providing a scenario-simulation environment to test graduated restrictions, cropping-system adjustments, and structural or operational measures such as reservoir creation or reconfiguration.

WatSim supports more anticipatory, transparent, and adaptive water governance in the face of increasing drought risk, with a specific focus on mediumterm projections over a sixmonth horizon that match the timescale of agricultural decisionmaking and seasonal waterallocation negotiations.

Keywords: Climate change; frequent extreme events; Proactive management; hydrological dynamics; water governance.

RESUME

Le changement climatique renforce la variabilité hydrologique en raison de la hausse des températures, de la modification des régimes pluviométriques et de la fréquence accrue des événements climatiques extrêmes, ce qui à son tour prolongent, intensifient et désynchronisent les épisodes de sécheresse. Ces dynamiques compromettent la capacité des territoires

1 BWI's CEO, jfain@bwi.earth, 96 rue de la Victoire, 75009, Paris, France

à garantir la sécurité hydrique, à soutenir les activités économiques et à préserver les écosystèmes aquatiques et ceux qui dépendent des eaux souterraines. Pour les organismes de bassin et les autorités de régulation, l'incertitude croissante complique la répartition des ressources en eau limitées entre l'irrigation, l'approvisionnement en eau potable, l'industrie, la production hydroélectrique et les débits environnementaux, tandis que la pression réglementaire et les attentes des parties prenantes concernant la transparence ne cessent de s'accroître. Dans certaines régions, des années de sécheresse successives et des conflits récurrents entre les usagers ont rendu ces tensions très visibles, l'agriculture étant fréquemment soumise à des restrictions précoces et sévères.

Les approches de gestion conventionnelles, qui s'appuient sur des courbes de tarage, des règles d'exploitation statiques et des diagnostics effectifs, restent largement réactives et offrent peu de possibilités d'explorer des stratégies alternatives de restriction ou de répartition avant que des seuils critiques ne soient atteints. Une gestion proactive nécessite donc des outils d'aide à la décision capables de projeter la disponibilité future des ressources, de simuler des scénarios de prélèvement contrastés et de fournir une base quantitative commune pour la planification et la gestion de la sécheresse.

WatSim répond à ces besoins grâce à un simulateur hydrologique à l'échelle du bassin versant. Développée principalement par BWI (Blue Water Intelligence), avec le projet TETIS de l'INRAE comme partenaire scientifique et cofinancée par la région Occitanie dans le cadre du programme France 2030 via Bpifrance, la plateforme s'articule autour de quatre fonctions : la représentation des dynamiques hydrologiques à haute résolution spatiale et temporelle en situation de stress climatique; la modélisation explicite des prélèvements par usage, en particulier les prélèvements agricoles; la mise à disposition d'un environnement de simulation de scénarios permettant de tester des restrictions progressives, l'intégration des données satellitaires pour mieux caractériser la demande et l'état des ressources; et des ajustements des systèmes agricoles, ainsi que des mesures structurelles ou opérationnelles telles que la création ou la redéfinition de réservoirs.

WatSim favorise une gouvernance d'anticipation de l'eau plus transparente et évolutive face au risque croissant de sécheresse, en mettant particulièrement l'accent sur des projections à moyen terme sur un horizon de six mois, qui correspondent à l'échelle temporelle de la prise de décision agricole et des négociations saisonnières sur la répartition de l'eau.

Mots-clés : Changement climatique; Evénements climatiques extrêmes; Gestion proactive; Dynamique hydrologique; Gouvernance de l'eau.

CO-CREATING A REMOTE SENSING–BASED DIGITAL TOOL FOR IRRIGATION PERFORMANCE MONITORING: THE CASE OF THE OFFICE DU NIGER IN MALI

CO-CRÉATION D'UN OUTIL NUMÉRIQUE BASÉ SUR LA TÉLÉDÉTECTION POUR LE SUIVI DES PERFORMANCES D'IRRIGATION : LE CAS DE L'OFFICE DU NIGER AU MALI

S.J. Zwart[1], M. Dembélé[2], P. Schmitter[3], S. Konare[4], C.J. van der Sande[5], B. Koné[6] and B. Kassambara[7]

ABSTRACT

Irrigation authorities in the Sahel are under growing pressure to do more with less water, yet most operational monitoring systems remain volumetric and report agricultural performance only indirectly. The Office du Niger (ON) in Mali manages one of West Africa's largest irrigation schemes, equipping approximately 142,000 ha of smallholder rice and private sugar production. Its existing system monitors irrigation deliveries but does not relate this directly to crop yields and actual water demands, while field data collection is increasingly constrained by security conditions. This paper describes the co-creation of IPON (Irrigation Performante de l'Office du Niger), a remote sensing–based digital tool co-created by the Office du Niger, the International Water Management Institute and eLEAF between 2021 and 2025.

Rather than delivering a pre-built product, the partners invested in a structured listening phase: information needs at various management levels were diagnosed against existing reporting workflows, and irrigation performance indicators were selected with end-users. IPON combines Water Productivity through Open access of Remotely sensed derived data (WaPOR) layers on actual and reference evapotranspiration, net primary production, and rainfall with measured irrigation deliveries to compute eleven irrigation performance indicators at the zones and tertiary scales from 2018 onwards, presented through a Tableau Public dashboard maintained by ON staff. The paper documents the indicators against the information needs they address, and the co-creation steps that secured institutional ownership. An independent post-launch evaluation surveying thirteen ON technical staff found that all respondents had used IPON and 61.5% judged that it fully or largely meets the analytical needs of the seasonal report, with an overall utility rating of 3.46 out of 5. The case shows that for large publicly managed schemes, sequencing trust-building before tool-building is as decisive as the underlying remote sensing technology.

Keywords : Irrigation performance; co-creation; remote sensing; WaPOR; water productivity; Office du Niger; Mali; decision-support tool; institutional ownership; Tableau.

RESUME

Les autorités chargées de l'irrigation au Sahel subissent une pression croissante pour produire davantage avec moins d'eau, alors que la plupart des systèmes de suivi opérationnels restent volumétriques et ne rendent compte des performances agricoles que de manière indirecte.

1 International Water Management Institute (IWMI), Accra, Ghana. Email: s.zwart@cgiar.org
2 International Water Management Institute (IWMI), Accra, Ghana. Email: moctar.dembele@cgiar.org
3 International Water Management Institute (IWMI), Colombo, Sri Lanka. Email: p.schmitter@cgiar.org
4 Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Bamako, Mali. Email: seriba.konare@fao.org
5 eLEAF, Wageningen, Netherlands. Email: corne.van.der.sande@eleaf.com
6 Office du Niger, Ségou, Mali. Email: bakui2000@yahoo.fr
7 Office du Niger, Ségou, Mali. Email: kassbarry@gmail.com

L'Office du Niger (ON) au Mali gère l'un des plus grands réseaux d'irrigation de l'Afrique occidentale, alimentant environ 142 000 ha de rizières tenues par de petits exploitants et de cultures sucrières privées. Son système actuel surveille les apports d'eau d'irrigation, mais ne les relie pas directement aux rendements des cultures et aux besoins réels en eau, tandis que la collecte de données sur le terrain est de plus en plus entravée par les conditions de sécurité. Cet article décrit la co-création d'IPON (Irrigation Performante de l'Office du Niger), un outil numérique basé sur la télédétection, développé conjointement par l'Office du Niger, l'Institut international de gestion de l'eau et eLEAF entre 2021 et 2025.

Plutôt que de fournir un produit préfabriqué, les partenaires ont investi dans une phase d'écoute structurée : les besoins en informations aux différents niveaux de gestion ont été analysés par rapport aux plans de travail de rapport existants, et les indicateurs de performance d'irrigation ont été sélectionnés en collaboration avec les utilisateurs finaux. L'IPON ajoute les couches «Water Productivity through Open access of Remotely sensed derived data» (WaPOR) sur l'évapotranspiration réelle et de référence, la production primaire nette et les précipitations avec les débits d'irrigation mesurés afin de calculer onze indicateurs de performance de l'irrigation à l'échelle des zones et à l'échelle tertiaire à partir de 2018, présentés via un tableau de bord de Tableau Public géré par le personnel de l'ON. Cet article présente les indicateurs en fonction des besoins d'information auxquels ils répondent, ainsi que les étapes de co-création qui ont permis d'assurer l'appropriation institutionnelle. Une évaluation indépendante menée après le lancement auprès de treize membres du personnel technique des ON a révélé que tous les personnes interrogées avaient utilisé l'IPON et que 61,5% d'entre eux ont estimé qu'il répondait pleinement ou en grande partie aux besoins analytiques du rapport saisonnier, avec une note globale d'utilité de 3,46 sur 5. Cette étude de cas montre que, pour les grands périmètres gérés par le secteur public, il est tout aussi déterminant de privilégier l'instauration d'un climat de confiance avant la mise au point de l'outil que la technologie de télédétection sous-jacente.

Mots-clés : Performance de l'irrigation; Co-création; Télédétection; WaPOR; Productivité de l'eau; Office du Niger; Mali; Outil d'aide à la décision; Appropriation institutionnelle; Tableau.

ASSESSING FUTURE RUNOFFS UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS IN THE MAE KLONG RIVER BASIN, THAILAND

ÉVALUATION DES DÉBITS DE RUISSELLEMENT FUTURS SELON DIFFÉRENTS SCÉNARIOS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DE MAE KLONG, EN THAÏLANDE

Thepprasit C.[1], Vongphet, J.[2], Puttrawutichai, S.[3], Ruangrassamee, P.[4], Chaowiwat, W.[5] and Sittichok, K.[6]*

ABSTRACT

Climate change is influencing increasing challenges to irrigation water management, particularly in river basin scales where water is used in various sectors, and policy-driven allocation systems must operate under high climate variability. This study aims to examine future changes in runoffs under various climate change scenarios to support basin-scale decision-making for irrigation water management in the Mae Klong River Basin, Thailand. Climate projections were obtained from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) for four Shared Socioeconomic Pathways (SSP126, SSP245, SSP370, and SSP585). Three global climate models, which were BCC-CSM2-MR, CanESM5, and CESM2, were selected for this study.

The DWCM-AgWU hydrological model was applied to generate runoffs under these conditions. The model was calibrated and validated with six locations, and results revealed that an R^2 of 0.82-0.90/0.74-0.90, an NSE of 0.49-0.89/0.46-0.88, and a PBIAS in the absolute of 53.8–0.46 / 54.3–1.09. Future hydrological responses were analyzed for two planning horizons: a near-future period (2025–2037), aligned with Thailand's 20-year national development strategy, and a far-future period (2038–2100). Results indicated that most climate scenarios projected an increase in average monthly precipitation during the rainy season, while a reduction was consistently projected during the dry season. Simulated monthly runoff at three main locations (Srinagarind Dam, Vajiralongkorn Dam, and Mae Klong Dam) generally increased during the late rainy season (August–October).

The peak runoff shifting was also revealed in the Srinagarind and Mae Klong dams. Annual runoffs presented a significantly increasing trend under SSP5-8.5 for all locations and both periods. This output can support and understand climate-driven hydrological risks and informed irrigation water management strategies at the basin scale.

Keywords: irrigation water management; runoffs; hydrological responses; climate-driven hydrological risks; irrigation water management.

1 Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen campus, Kasetsart University, Nakhon Pathom province, Thailand, Email: fengcpth@ku.ac.th
2 Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen campus, Kasetsart University, Nakhon Pathom province, Thailand, Email: fengjtv@ku.ac.th
3 Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen campus, Kasetsart University, Nakhon Pathom province, Thailand, Email: Songsak.pu@ku.th
4 Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, Email: Piyatida.H@chula.ac.th
5 NHC Steering and Operations Center (NHCSOC), Hydro Informatics Institution, Bangkok Province, Thailand, Email: winai@hii.or.th
6 Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen campus, Kasetsart University, Nakhon Pathom province, Thailand Email: fengkrs@ku.ac.th

RESUME

Le changement climatique rend la gestion de l'eau d'irrigation de plus en plus complexe, en particulier à l'échelle des bassins versants où l'eau est utilisée dans divers secteurs, et où les systèmes de répartition définis par les politiques doivent fonctionner dans un contexte de forte variabilité climatique. Cette étude vise à examiner les évolutions futures des débits de ruissellement selon différents scénarios de changement climatique afin de soutenir la prise de décision à l'échelle du bassin concernant la gestion des eaux d'irrigation du bassin versant de Mae Klong, en Thaïlande. Les projections concernant le climat ont été obtenues à partir de la phase 6 du Projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP6) pour quatre trajectoires socio-économiques partagées (SSP126, SSP245, SSP370 et SSP585). Trois modèles climatiques mondiaux, à savoir BCC-CSM2-MR, CanESM5 et CESM2, ont été retenus pour cette étude. Le modèle hydrologique DWCM-AgWU a été utilisé pour simuler les débits de ruissellement dans ces conditions. Le modèle a été calibré et validé sur six sites, et les résultats ont montré un R^2 compris entre 0,82 et 0,90 / 0,74 et 0,90, un NSE compris entre 0,49 et 0,89 / 0,46 et 0,88, et une PBIAS en valeur absolue comprise entre 53,8 et 0,46 / 54,3 et 1,09. Les réponses hydrologiques futures ont été analysées pour deux horizons de planification : un avenir proche (2025-2037), alignée sur la stratégie nationale de développement de 20 ans de la Thaïlande, et un avenir lointain (2038-2100). Les résultats ont indiqué que la plupart des scénarios climatiques prévoyaient une augmentation des précipitations mensuelles moyennes pendant la saison des pluies, tandis qu'une diminution était systématiquement prévue pendant la saison sèche. Le ruissellement mensuel simulé sur trois sites principaux (les barrages de Srinagarind, de Vajiralongkorn et de Mae Klong) a généralement augmenté vers la fin de la saison des pluies (août-octobre). Un décalage de ruissellement maximum a également été observé au niveau des barrages de Srinagarind et de Mae Klong. Les débits annuels ont présenté une tendance à la hausse significative dans le cadre du scénario SSP5-8.5 pour tous les sites et les deux périodes. Ces résultats peuvent contribuer à la compréhension des risques hydrologiques liés au climat et à l'élaboration de stratégies éclairées de gestion de l'eau d'irrigation à l'échelle du bassin.

Mots-clés : Gestion de l'eau d'irrigation; Ruissellement; Réponses hydrologiques; Risques hydrologiques liés au climat; Gestion de l'eau d'irrigation.

ECO-EFFICIENCY OF DIFFERENT LAND USE SCENARIOS BASED ON LIFE CYCLE ASSESSMENT

EFFICACITÉ ÉCOLOGIQUE DE DIFFÉRENTS SCÉNARIOS D'USAGES DES SOLS SUR LA BASE D'UNE ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Agata Sferratore[1] Pacôme Dewaele[1], Fanélie Meyer[1], Nicolas Urruty[1], *Hanna Audran[1], Mamadou Diarra[1], Loïc Duffar[1], Emmanuel Patenotre[1], Nicolas Rogy[2] and Benjamin Seux[1]

ABSTRACT

Climate change is increasingly challenging water resource management, requiring decision-makers to balance mitigation of greenhouse gas (GHG) emissions with adaptation strategies. This study investigates whether the construction of an inter basin water transfer infrastructure constitutes an effective solution for securing regional water supply, using a Territorial Life Cycle Assessment (LCA) approach. The analysis is applied to a real case study in Provence (Southern France), covering approximately 15,000 ha with agricultural and potable water needs.

Three scenarios are compared: (1) continuation without any new water transfer infrastructure, relying on existing systems and groundwater supply when available; (2) development of a new inter-basin transfer system (mainly gravity fed) enabling expanded irrigation; and (3) the same infrastructure combined with agricultural diversification toward more food-oriented production.

The LCA integrates impacts from infrastructure construction and operation (materials, energy use) as well as agricultural practices (inputs, works…). A focus was made on GHG emissions and a Single Score indicator. Socio-economic and functional benefits are also assessed through gross margin, employment (FTE), and nutrient-based biomass production (NR9 score).

Results show that scenarios including new infrastructure (2 and 3) generate slightly higher environmental impacts than the baseline, but within the same order of magnitude. However, these scenarios significantly enhance agricultural productivity, economic returns, and employment. Scenario 3 yields the highest edible biomass due to diversification. Eco-efficiency analysis (relating service provision to environmental impact) indicates that scenarios 2 and 3 outperform the baseline, with scenario 3 emerging as the most efficient overall.

The study is an example of integrative approach combining environmental and socio-economic indicators through LCA, based on eco-efficiency ratios. Such an approach can help the decision-making process to determine whether a development project, despite its impact, brings real added value to a region.

Keywords: Climate change; water resource management; agricultural diversification; agricultural productivity; decision-making process.

RESUME

Le changement climatique rend la gestion des ressources en eau de plus en plus complexe, obligeant les preneurs de décision à rechercher un équilibre entre la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et les stratégies d'adaptation. Cette étude examine la manière dont la construction d'une infrastructure de transfert d'eau interbassin constitue une solution efficace

1 Société du Canal de Provence, Le Tholonet - CS 70064 - 13182 Aix-en-Provence CEDEX 5, France Email: agata.sferratore@canal-de-provence.com

2 IFP Energies nouvelles, 1 et 4 avenue de Bois Préau, 92852 Rueil-Malmaison, France Email: nicolas.rogy@ifpen.fr

pour sécuriser l'approvisionnement régional en eau, en utilisant une approche d'analyse du cycle de vie (LCA) territoriale. L'analyse porte sur une étude de cas réelle menée en Provence (sud de la France), couvrant environ 15 000 ha de terre ayant des besoins en eau agricole et potable.

Trois scénarios sont comparés : (1) le maintien de la situation actuelle sans nouvelle infrastructure de transfert d'eau, en s'appuyant sur les systèmes existants et l'approvisionnement en eaux souterraines lorsque celui-ci est disponible; (2) le développement d'un nouveau système de transfert interbassin (principalement gravitaire) permettant d'expansion de l'irrigation; et (3) la combinaison de même infrastructure avec une diversification agricole vers une production davantage axée sur l'alimentation.

Le LCA intègre les impacts liés à la construction et à l'exploitation des infrastructures (matériaux, consommation d'énergie) ainsi qu'aux pratiques agricoles (intrants, travaux…). L'accent a été mis sur les émissions de gaz à effet de serre et sur un indicateur de note unique. Les bénéfices socio-économiques et fonctionnels sont également évalués à travers la marge brute**,** l'emploi (équivalents temps pleins) et la production de biomasse basée sur les nutriments (score NR9).

Les résultats montrent que les scénarios incluant de nouvelles infrastructures (2 et 3) donnent lieu aux impacts environnementaux légèrement supérieurs à ceux du scénario de référence, tout en restant du même ordre de grandeur. Cependant, ces scénarios améliorent considérablement la productivité agricole, les retours économiques et l'emploi. Le scénario 3 produit la plus grande quantité de biomasse comestible grâce à la diversification. L'analyse d'efficacité écologique (qui met en relation le service rendu et l'impact environnemental) indique que les scénarios 2 et 3 surpassent le scénario de référence, le scénario 3 étant jugé comme le plus efficace dans l'ensemble.

Cette étude illustre une approche intégrée combinant des indicateurs environnementaux et socio-économiques par le biais du LCA, sur la base de taux de l'efficacité écologique. Une telle approche peut faciliter le processus de prise de décision visant à déterminer la manière dont un projet de développement, malgré son impact, apporte une valeur réelle ajoutée à une région.

Mots-clés : Changement climatique; Gestion des ressources en eau; Diversification agricole; Productivité agricole; Processus de prise de décision.

DROUGHT-STAGE SEGMENTATION AND XGBOOST-BASED PREDICTION OF IRRIGATION SUPPLY CAPACITY FOR MONSOON-DOMINATED AGRICULTURAL RESERVOIRS IN EAST ASIA

SÉGMENTATION DES PHASES DE SÉCHERESSE ET PRÉVISION À L'AIDE DE XGBOOST DE LA CAPACITÉ D'APPROVISIONNEMENT EN EAU D'IRRIGATION DES RÉSERVOIRS AGRICOLES SOUMIS À LA MONSOON EN ASIE ORIENTALE

Mihye Yang[1], Wonho Nam[2], Kwangya Lee[3], and Kwangsik Yoon[4]

ABSTRACT

Agricultural reservoirs in South Korea operate under a highly seasonal hydroclimatic regime dominated by the East Asian monsoon, with a large share of annual precipitation concentrated in summer. This strong seasonality, combined with increasing hydroclimatic variability and recurrent droughts, has intensified the need for more adaptive reservoir drought management. Conventional operation practices often rely on static storage thresholds or fixed rule curves, which may be insufficient for early drought recognition and staged operational response. In this study, a data-driven drought management framework is proposed for agricultural reservoirs by integrating statistical drought stage classification with machine-learning-based short-term storage ratio prediction. Two major agricultural reservoirs in the Yeongsan River basin, Jangseong Reservoir and Naju Reservoir, were selected as case studies. First, reservoir-specific drought stages were defined from long-term storage ratio distributions using percentile thresholds. Second, an Extreme Gradient Boosting (XGBoost) model was developed to predict short-term reservoir storage ratio using antecedent storage, rainfall, cumulative rainfall, and seasonal variables. Third, scenario-based simulations were conducted under representative drought-year meteorological conditions and different initial storage states to assess possible drought stage transitions. Finally, predicted storage ratios were converted to storage volumes and linked to estimates of available agricultural water supply. The framework is designed to support operationally interpretable drought warning and adaptive irrigation management by combining historical drought context with near-term forecast information. The results indicate that the proposed approach can provide a practical basis for reservoir-specific drought diagnosis, forecast-informed response planning, and supply-risk assessment under monsoon-driven and data-limited conditions.

Keywords: agricultural reservoir; drought management; storage ratio; XGBoost; machine learning; South Korea; water supply; monsoon climate.

RESUME

En Corée du Sud, les réservoirs agricoles fonctionnent selon un régime hydroclimatique fortement saisonnier, dominé par la mousson d'Asie orientale, une grande partie des précipitations annuelles étant concentrée en été. Cette forte saisonnalité, conjuguée à une variabilité hydroclimatique croissante et à des sécheresses récurrentes, a renforcé la nécessité d'avoir une gestion plus adaptative des réservoirs en période de sécheresse. Les pratiques d'exploitation conventionnelles s'appuient souvent sur des seuils de stockage statiques ou

1 Department of Integrated Systems Engg., Hankyong National University, Anseong, Republic of Korea
2 School of Social Safety and Systems Engineering, National Agricultural Water Research Center, Hankyong National University, Anseong, Republic of Korea
3 Institute of Agricultural Science, Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea
4 Rural& Bio-Systems Eng. Dept. Chonnam National University, Gwangju, Korea: ksyoon@jnu.ac.kr

des courbes de régulation fixes, qui peuvent s'avérer insuffisants pour une détection précoce de la sécheresse et une réponse opérationnelle par étapes. Dans cette étude, un cadre de gestion de la sécheresse fondé sur les données est proposé pour les réservoirs agricoles, en intégrant une classification statistique des stades de sécheresse à une prévision à court terme du taux de stockage basé sur l'apprentissage automatique. Deux grands réservoirs agricoles situés dans le bassin versant de Yeongsan, le réservoir de Jangseong et celui de Naju, ont été retenus comme études de cas. Tout d'abord, des stades de sécheresse spécifiques à chaque réservoir ont été définis à partir des distributions à long terme des taux de stockage utilisant des seuils basés sur les centiles. Ensuite, un modèle Extreme Gradient Boosting (XGBoost) a été développé pour prédire le taux de stockage des réservoirs à court terme à partir du niveau de stockage antécédent, des précipitations, des précipitations cumulées et de variables saisonnières. Troisièmement, des simulations basées sur des scénarios ont été réalisées en tenant compte de conditions météorologiques représentatives d'une année de sécheresse et pour différents états de stockage initiaux, afin d'évaluer les transitions possibles entre les différents stades de sécheresse. Enfin, les taux de stockage prévus ont été convertis en volumes de stockage et mis en relation avec des estimations de l'approvisionnement en eau agricole disponible. Ce cadre est conçu pour faciliter la mise en place d'alertes de sécheresse interprétables sur le plan opérationnel et d'une gestion adaptative de l'irrigation, en combinant le contexte historique de la sécheresse avec des informations de prévision à court terme. Les résultats indiquent que l'approche proposée peut fournir une base pratique pour le diagnostic de la sécheresse spécifique à chaque réservoir, la planification des mesures d'intervention fondées sur les prévisions et l'évaluation des risques liés à l'approvisionnement dans des conditions marquées par la mousson et des données limitées.

Mots-clés : Réservoir agricole; Gestion de la sécheresse; Taux de stockage; XGBoost; Apprentissage automatique; Corée du Sud; Approvisionnement en eau; Climat de mousson.

ECONOMIC ANALYSIS TO AID DECISION-MAKING FOR AGROECOLOGICAL TRANSITION PROJECTS

ANALYSE ÉCONOMIQUE AU SERVICE DE LA PRISE DE DÉCISION POUR LES PROJETS DE TRANSITION AGROÉCOLOGIQUE

Deram Malerbe F.[1], Bazin F.[2] and Cédat S.[3]

ABSTRACT

As with any major change to an economic system, the agroecological transition can only succeed if stakeholders, primarily farmers, see it as being in their best interest. When conducted properly, economic analysis can be a powerful tool for assessing stakeholders' interests and anticipating the risks of change for them. Economic analysis is not so much about calculating the internal rate of return (IRR)—which has limited scope—but rather about identifying the drivers of change and incorporating them into the transition approach. By examining the strategies of the stakeholders involved, the issues at stake, and the impact that decisions will have on each of them, economic analysis makes it possible to model how complex systems may respond to changes. Once the key factors for each stakeholder are better understood, it becomes possible to define possible strategies and the actions needed to ensure that each stakeholder has both the motivation and the means to contribute to the transition. Economic analysis can then be used to compare different pathways to achieving the desired outcomes. In this way, economic analysis serves as a tool to help define appropriate strategies and make decisions.

The proposed approach differentiates between key stakeholders and specifies the economic and financial analysis to be carried out at the level of each stakeholder to define the conditions of their involvement, by studying their situation, their capacities, their expectations, and the relationships between them. Originally developed as part of the COSTEA[4] to support the design of irrigation and drainage (I&D) projects, this approach can also be applied to ecological transition projects, as these too involve profound changes to existing agricultural systems—changes that generally cannot be undertaken by farmers alone, either technically or financially.

Keywords: Agroecological transition; stakeholder; appropriate strategies; economic analysis; agricultural systems.

RESUME

Comme pour tout changement majeur d'un système économique, la transition agroécologique ne peut aboutir que si les parties prenantes, essentiellement des agriculteurs, lorsqu'ils croient que c'est dans leur meilleur intérêt de le faire. Lorsqu'elle est menée correctement, l'analyse économique peut constituer un outil puissant pour évaluer les intérêts des parties

1 Independent consultant, Ch. de Waterloo 441, 1050 Belgium Email: fdm@aeda-consult.eu
2 IRAM, Parc scientifique Agropolis - Bâtiment 3 - 34980 Montferrier sur Lez, France Email: f.bazin@iram-fr.org
3 IRAM, Parc scientifique Agropolis - Bâtiment 3 - 34980 Montferrier sur Lez, France Email: s.cedat@iram-fr.org
4 The COSTEA Think Tank (https://www.comite-costea.fr/), dedicated to water for food in the face of climate change challenges, was established in France in 2013 with financial support from the French Development Agency (AFD). Its mission is to produce, share, and promote knowledge and policy recommendations to address the challenges of irrigated agriculture.

prenantes et anticiper les risques que le changement représente pour elles. L'analyse économique ne consiste pas tant à calculer le taux de rentabilité interne (TRI) – dont la portée est limitée – qu'à identifier les moteurs du changement et à les intégrer dans l'approche de transition. En examinant les stratégies des parties prenantes impliquées, les enjeux liés à cette question et l'impact que les décisions auront sur chacune d'entre elles, l'analyse économique permet de modéliser la manière dont les systèmes complexes peuvent réagir aux changements. Une fois que les facteurs clés pour chaque partie prenante sont mieux compris, il devient possible de définir des stratégies envisageables et les actions nécessaires pour s'assurer que chaque partie prenante dispose à la fois de la motivation et des moyens de contribuer à la transition. L'analyse économique peut alors être utilisée pour comparer différentes voies permettant d'atteindre les résultats souhaités. De cette manière, l'analyse économique sert d'outil pour aider à définir des stratégies appropriées et à prendre des décisions.

L'approche proposée distingue les principales parties prenantes et précise l'analyse économique et financière à mener au niveau de chacune d'entre elles afin de définir les conditions de leur implication, en étudiant leur situation, leurs capacités, leurs attentes et les relations qui les unissent. Initialement développée dans le cadre du COSTEA pour soutenir la conception de projets d'irrigation et de drainage (I&D), cette approche peut également s'appliquer aux projets de transition écologique, car ceux-ci impliquent eux aussi des changements profonds des systèmes agricoles existants — changements qui, en général, ne peuvent être entrepris par les agriculteurs seuls, que ce soit sur le plan technique ou financier.

Mots-clés : Transition agroécologique; Partie prenante; Stratégies appropriées; Analyse économique; Systèmes agricoles.

PRACTICE AND REFLECTIONS ON PROMOTING THE CONSTRUCTION AND MANAGEMENT OF MODERN IRRIGATION DISTRICTS THROUGH THE "SYNERGY OF GOVERNMENT AND MARKET"

PRATIQUES ET REFLEXIONS SUR LA PROMOTION DE LA CONSTRUCTION ET DE LA GESTION DE PERIMETRES IRRIGUES MODERNES GRACE A LA «SYNERGIE ENTRE GOUVERNEMENT ET MARCHE»

Renjing Ji[1], Jing Fu[2], and Yupu He[3]

ABSTRACT

The "Synergy of Government and Market" serves as a crucial pathway to enhance the capacity of irrigation districts in supporting and safeguarding national food security. Based on the pilot practices launched by the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China to promote the construction of modern irrigation districts through deepening the comprehensive reform of agricultural water prices, this paper expounds four modes for introducing social capital, including concession operation, the "Farmland Irrigation+", agricultural water rights trading and green finance, and analyzes the implementation paths, practical effects and applicable conditions of each model.Furthermore, the paper puts forward targeted suggestions for attracting social capital to participate in the construction and management of modern irrigation districts, such as adhering to government guidance, establishing a sound water price formation mechanism, promoting moderate-scale operation, and advancing industrial integration and development. The research is intended to provide a reference for the innovation of construction and management modes of modern irrigation districts under the background of the reform of water conservancy investment and financing.

Keywords: Synergy of government and market; modern irrigation districts; concession operation model; "farmland irrigation+" model; agricultural water rights trading model; green finance model.

RESUME

La «synergie entre gouvernement et marché» sert d'un moyen crucial à améliorer la capacité des districts d'irrigation pour soutenir et pour préserver la sécurité alimentaire nationale. Sur la base des pratiques pilotes lancées par le Ministère des ressources en eau de la République populaire de Chine pour promouvoir la construction de périmètres irrigués modernes grâce à l'approfondissement de la réforme globale des prix de l'eau agricole, cet article expose quatre modèles d'introduction du capital social, dont l'exploitation des concessions, le «Farmland Irrigation+», le commerce des droits d'eau agricoles et la finance verte, et analyse les voies de mise en œuvre, les effets pratiques et les conditions applicables à chaque modèle. En outre, le document propose des recommandations ciblées pour attirer le capital social afin de participer à la construction et à la gestion des périmètres irrigués modernes, telles que l'adhésion aux directives gouvernementales, l'établissement d'un mécanisme solide de fixation du prix de l'eau, la promotion d'une exploitation à échelle modérée ainsi que l'intégration et le développement industriels. La recherche vise à fournir une référence pour l'innovation des

1 Renjing Ji, senior engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, jirenjing@126.com.
2 Jing Fu, engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, 1173699585@qq.com.
3 Yupu He, Professorate Senior Engineer, Nanjing Hydraulic Research Institute, China, heyupu28@163.com, Corresponding author.

modes de construction et de gestion des périmètres irrigués modernes dans le contexte de la réforme de l'investissement et du financement de la conservation de l'eau.

Mots-clés : Synergie entre gouvernement et marché; Périmètres irrigués modernes; Modèle de gestion par concession; Modèle «Irrigation agricole +; Modèle d'échange de droits d'eau agricole; Modèle de finance verte.

NESTED SCALES AND INSTITUTIONAL FRAGMENTATION.THE CASE OF WATER GOVERNANCE IN THE CRAU PLAIN

ÉCHELLES IMBRIQUÉES ET FRAGMENTATION INSTITUTIONNELLE. LE CAS DE LA GOUVERNANCE DE L'EAU DANS LA PLAINE DE LA CRAU

Guérin Tristan[1], Montginoul Marielle[1], and Molle François[1]

ABSTRACT

The Crau region in southern France is a unique hydrosystem where groundwater and surface water are tightly interconnected through agricultural practices. The aquifer, which supplies drinking water to over 300,000 people and supports agricultural and industrial uses, depends on gravity-fed irrigation of hay meadows for nearly 70% of its recharge. Water originates from the Durance River and is conveyed through a network of canals. This creates unusual dynamics: groundwater levels are highest in summer and lowest in winter. Paradoxically, rainy years can lower the water table because reduced irrigation decreases artificial recharge. Although the aquifer is not structurally overexploited, projected declines in Durance flows and more frequent droughts are intensifying debates over water allocation and challenging the legitimacy of gravity irrigation, often perceived as inefficient despite the ecosystem services it provides. Understanding water-sharing governance in Crau requires considering three temporal dimensions: the long-term balance of the aquifer, short-term drought events, and upstream hydrological variability in the Durance basin. Water scarcity thus reflects a structural vulnerability that becomes more visible during crises. The 2022 drought exposed weaknesses in short-term management. Interdepartmental drought regulations seek to harmonize water management across Durance-dependent territories but often overlook local hydrogeological specificities, creating inconsistencies. The crisis also revealed insufficient preparedness despite lessons from the 2007 drought. Conflicts emerged between upstream and downstream users and among irrigators within Crau. Based on interviews with farmers, water managers, state representatives, and agricultural organizations, this article shows that hydrological interdependencies generate a complexity that institutions and local actors struggle to fully grasp. It examines how multiple spatial and temporal dimensions of scarcity interact and questions whether current governance arrangements can effectively manage these interdependencies.

Keywords: agricultural and industrial uses; drinking water; temporal dimensions; gravity irrigation; Water scarcity.

RESUME

La région de la Crau, situé au sud de la France, est un système hydrologique unique où les eaux souterraines et les eaux de surface sont étroitement liées par le biais des pratiques agricoles. L'aquifère, qui fournit de l'eau potable à plus de 300 000 personnes et soutient des usages agricoles et industriels, dépend de l'irrigation gravitaire des prairies naturelles pour près de 70% de sa recharge. L'eau prend sa source dans la rivière Durance et est transportée à travers le réseau de canaux. Cela crée une dynamique inhabituelle : les niveaux d'eau souterraine sont plus élevés en été et plus bas en hiver. Paradoxalement, les années pluvieuses peuvent abaisser la nappe phréatique car une irrigation réduite

1 UMR G-Eau – Université de Montpellier, INRAE, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, IRD, L'Institut Agro Montpellier - 361 rue JF Breton - BP 5095 - 34196 Montpellier Cedex 5 Email adress : marielle.montginoul@inrae.fr

diminue la recharge artificielle. Bien que l'aquifère ne soit pas structurellement surexploité, les baisses prévues des débits de la Durance et les sécheresses plus fréquentes intensifient les débats sur l'allocation de l'eau et remettent en question la légitimité de l'irrigation gravitaire, souvent perçue comme inefficace malgré les services écosystémiques qu'elle fournit. La compréhension de la gouvernance du partage de l'eau à la Crau exige la prise en compte trois dimensions temporelles : l'équilibre à long terme de l'aquifère, les épisodes de sécheresse à court terme et la variabilité hydrologique en amont dans le bassin de la Durance. La pénurie d'eau reflète donc une vulnérabilité structurelle qui devient plus visible pendant les crises. La sécheresse de l'année 2022 a démontré des faiblesses de la gestion à court terme. Les réglementations interdépartementales sur la sécheresse recherchent à harmoniser la gestion de l'eau dans les territoires dépendants de la Durance, mais négligent souvent les spécificités hydrogéologiques locales, ce qui donne lieu aux incohérences. La crise a également révélé un manque de préparation malgré les leçons tirées de la sécheresse de l'année 2007. Des conflits sont apparus entre les usagers en amont et en aval, ainsi qu'entre les irrigants au sein de la Crau. Sur la base des entretiens tenus avec des agriculteurs, des gestionnaires de l'eau, des représentants de l'État et des organisations agricoles, cet article montre que les interdépendances hydrologiques donnent lieu à une complexité que les institutions et les acteurs locaux ont du mal à saisir pleinement. Il examine la manière dont les multiples dimensions spatiales et temporelles de la rareté interagissent et s'interroge sur la capacité des dispositifs de gouvernance actuels à gérer efficacement ces interdépendances.

Mots-clés : Usages agricoles et industriels; Eau potable; Dimensions temporelles; Irrigation gravitaire; Pénurie d'eau.

WATER AND AGRICULTURAL RESILIENCE IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE

RÉSISTANCE DE L'EAU ET DE L'AGRICULTURE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Madhuri Rampalli[1], and Nikhilesh Kumar[2]

ABSTRACT

Climate change poses a profound global challenge, heightening vulnerability and exposure to risks that disrupt societies worldwide. It intensifies extreme weather events, exacerbating threats to water security and agricultural productivity through heat waves, prolonged droughts, erratic monsoons, floods, and cyclones. These phenomena aggravate water scarcity and crop failures, particularly in vulnerable regions like India, where agriculture consumes over 80% of freshwater resources yet loses up to 60% due to inefficient practices. The present study focuses on tackling the above issues via an integrated digital platform in the field of water with aquaWISE and agriculture with fieldWISE. This study proposes an integrated AI-enabled digital framework combining hydrological intelligence, remote sensing, IoT systems, and geospatial analytics to strengthen climate-resilient water and agricultural governance. It advances water security across the food-water-energy nexus, with deployments in over 8 cities serving around 1.3 million people. Flood monitoring covers 406 reservoirs and 35 river basins, while digital twins enable real-time oversight of 1,832 km of water conductor systems. Notable impacts include onboarding about 20 million farmers via fieldWISE, monitoring around 200,000 irrigation tanks, and reducing energy consumption by 8%. By leveraging satellite data integrated with AI/ML models, the fieldWISE platform enables periodical sowing progression monitoring, crop health assessment, crop classification, pictorial pest detection, agricultural monitoring, and climate-smart operations through field-level risk advisories. Together, these systems address risks from inadequate preparedness through timely alerts and early warnings, enabling informed decision-making. Demonstrated outcomes include advisories to around 12 million farmers, processing large amount of satellite data across 15.4 million hectares of farmland, a 10-15% potential yield increase, protection of around 800,000 hectares from pests. This paper outlines various impacts and applications using aquaWISE and fieldWISE by its innovative approaches, technical frameworks, demonstrated impacts, and scalable pathways for building climate-resilient water-agriculture systems.

Keywords: Climate resilience, AI irrigation, digital twins, aquaWISE, fieldWISE, aquaIRRIGATION, precision agriculture, water optimization, Water Security, remote sensing, Geospatial analysis

RESUME

Le sérieux défi posé par le changement climatique souligne la vulnérabilité et l'exposition aux risques susceptibles de perturber les sociétés globales. Il intensifie les événements météorologiques extrêmes, aggravant les menaces pesant sur la sécurité hydrique et la productivité agricole à travers des vagues de chaleur, des sécheresses prolongées, des moussons erratiques, des inondations et des cyclones. Ces phénomènes aggravent la pénurie d'eau et les mauvaises récoltes, en particulier dans des régions vulnérables comme l'Inde, où l'agriculture consomme plus de 80% des ressources en eau douce mais perd jusqu'à

1 Knowledge & Partnership Manager, Vassar Labs, Hyderabad, India. Email: madhuri.rampalli@vassarlabs.com

2 CEO and Co-Founder, Vassar Labs, Hyderabad, India. Email: nikhilesh@vassarlabs.com

60% en raison de pratiques inefficaces. La présente étude se concentre sur la résolution des problèmes ci-dessus grâce à une platefore numérique intégrée - aquaWISE pour la gestion de l'eau et FieldWISE pour l'agriculture. Cette étude propose un cadre numérique intégré activé par l'intelligence artificielle (IA) combinant l'intelligence hydrologique, la télédétection, les systèmes IoT et l'analyse géo-spatiale afin de renforcer la gouvernance de l'eau et de l'agriculture résistante au climat. Elle fait progresser la sécurité hydrique à travers le lien entre alimentation-eau-énergie, avec des installations dans plus de 8 villes desservant environ 1,3 million de personnes. La surveillance des inondations couvre 406 réservoirs et 35 bassins versants, tandis que les jumeaux numériques permettent une surveillance en temps réel de 1 832 km de systèmes de distribution d'eau. Les impacts remarquables incluent l'intégration d'environ 20 millions d'agriculteurs via fieldWISE, la surveillance d'environ 200 000 réservoirs d'irrigation et une réduction de 8% de la consommation d'énergie. En exploitant les données satellitaires intégrées aux modèles d'IA et d'apprentissage automatique (ML), la plateforme fieldWISE permet une surveillance périodique de la progression des semis, une évaluation de la santé des cultures, une classification des cultures, une détection picturale des insectes nuisibles, une surveillance agricole et des exploitations climato-intelligentes grâce à des conseils sur les risques à l'échelle de la parcelle. Ensemble, ces systèmes traitent les risques liés à une préparation inadéquate à travers les alertes et les avertissements précoces en temps opportun, permettant ainsi une prise de décision éclairée. Les résultats démontrés comprennent des conseils à environ 12 millions d'agriculteurs, le traitement de grandes quantités de données satellitaires couvrant une superficie de 15,4 millions d'hectares de terres agricoles, une augmentation potentielle du rendement de 10 à 15% et une protection d'environ 800 000 hectares de terre contre les insectes nuisibles. Cet article souligne divers impacts et applications de l'aquaWISE et de l'fieldWISE en mettant en lumière leurs approches innovantes, leurs cadres techniques, leurs impacts démontrés et leurs voies évolutives permettant de construire des systèmes eau-agriculture résistants au climat.

Mots-clés : Résistance climatique; Irrigation par IA; Jumeaux numériques; AquaWISE; FieldWISE; AquaIRIGATION; Agriculture de précision; Optimisation de l'eau; Sécurité de l'eau; Télédétection; Analyse géospatiale.

WATER RESOURCES VULNERABILITY AND ADAPTIVE STRATEGIES UNDER CLIMATE CHANGE IN ALGERIA

VULNÉRABILITÉ DES RESSOURCES EN EAU ET STRATÉGIES D'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN ALGÉRIE

Tarek Bouregaa[1]

ABSTRACT

Algeria, the largest country in Africa, is facing increasing pressure on its water resources due to the combined impacts of climate change, rapid population growth, and steadily rising water demand from agricultural, domestic, and industrial sectors. The country is predominantly characterized by arid and semiarid climatic conditions, making its water resources particularly vulnerable to climatic variability and long-term climate change. Under these conditions, even modest shifts in temperature and precipitation patterns can lead to substantial impacts on water availability, drought occurrence, and overall water security. This study assesses the vulnerability of Algeria's water resources under changing climatic conditions by integrating long-term historical climate data covering the period 1951–2024 with future climate projections derived from multi-model ensembles of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). The analysis is conducted under five Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), which represent a range of plausible future greenhouse gas emission trajectories and socioeconomic development pathways. The results reveal a consistent and statistically meaningful long-term decline in precipitation over large parts of the country, accompanied by increased temporal variability and more frequent deviations from historical norms. These changes have led to an intensification of drought conditions, reflected in an increased frequency and severity of drought events identified using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). At the same time, significant increases in average, maximum and minimum air temperatures are observed across the historical record, with the most pronounced warming occurring after the 1990s. Climate projections suggest that these warming trends are likely to intensify throughout the twenty-first century, particularly under higher-emission scenarios such as SSP3-7.0 and SSP5-8.5, thereby exacerbating evaporative demand and further reducing effective water availability. The combined impacts of declining precipitation and rising temperatures have placed increasing stress on both surface water systems and groundwater reserves. This growing pressure is clearly reflected in the sharp reduction in per capita water availability, which has declined from approximately 1,500 m³ in 1962 to below 450 m³ in recent years, positioning Algeria well below the internationally recognized threshold for water scarcity. Using historical data (1980–2022), four machine learning models (AdaBoost, Random Forest, SVM, and Gradient Boosting) were trained to predict water stress levels. AdaBoost achieved the best generalization (testing R^2 = 0.967), with total water withdrawals and urban population identified as the dominant predictors, while climatic variables (SPEI, temperature) played a supporting role. Such trends highlight the heightened vulnerability of the national water system to both climatic and demographic drivers and raise concerns regarding the long-term sustainability of existing water use patterns. In response, Algeria has undertaken a series of large-scale adaptation measures aimed at improving water supply security and reducing exposure to climate-related risks. These measures include the expansion of seawater desalination programs, the strategic mobilization and regulation of groundwater resources, and substantial investments in hydraulic infrastructure designed to enhance storage, conveyance, and distribution efficiency. While these interventions

1 Plant and Animal Production Improvement Laboratory Faculty of nature and life sciences, Department of agronomy, University Ferhat Abbas Setif1, Algeria e-mail: ibnziad_1983@hotmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4041-7954

have contributed to mitigating immediate supply shortages, persistent challenges remain, particularly in terms of maintaining water quality, addressing pronounced regional disparities in water access, improving governance and institutional coordination, and ensuring the long-term financial sustainability of adaptation efforts. Overall, this study underscores the urgent need for integrated, climate-resilient water resource management approaches that explicitly account for future climate uncertainty. Strengthening the alignment between climate adaptation policies, water planning frameworks, and broader development strategies will be critical for enhancing resilience. The findings provide valuable evidence-based insights and transferable lessons for other arid and semi-arid countries in the Middle East and North Africa region that are facing similar climate-induced water stress and adaptation challenges.

Keywords: Water scarcity, Climate change, Algeria, CMIP6, Vulnerability, Adaptation.

RESUME

L'Algérie, le plus grand pays de l'Afrique, fait face à une pression croissante sur ses ressources en eau en raison des effets conjugués du changement climatique, de la croissance démographique rapide et de la hausse constante de la demande en eau des secteurs agricole, domestique et industriel. Le pays est essentiellement caractérisé par des conditions climatiques arides et semi-arides, ce qui rend ses ressources en eau particulièrement vulnérables à la variabilité climatique et au changement climatique à long terme. Dans le cadre de ces conditions, même des changements modestes de température et de précipitations peuvent avoir un impact important sur la disponibilité de l'eau, les sécheresses et la sécurité globale de l'approvisionnement en eau. Cette étude évalue la vulnérabilité des ressources en eau de l'Algérie dans des conditions climatiques changeantes en intégrant les données climatiques historiques à long terme couvrant la période 1951–2024 avec les projections climatiques futures issues d'ensembles multi-modèles de la phase 6 du projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP6). L'analyse s'appuie sur cinq scénarios de trajectoires socio-économiques partagées (SSP), qui représentent une gamme de trajectoires plausibles d'émissions de gaz à effet de serre et de voies de développement socio-économique. Les résultats constatent une baisse à long terme constante et statistiquement significative des précipitations à long terme sur la plupart du pays, accompagnée d'une variabilité temporelle accrue et d'écarts plus fréquents par rapport aux normes historiques. Ces changements ont donné lieu à une intensification des conditions de sécheresse, reflétée par une augmentation de la fréquence et de la gravité des épisodes de sécheresse identifiés grâce à l'indice d'évapotranspiration des précipitations normalisé (SPEI). Parallèlement, on constate une hausse significative des températures moyennes, maximales et minimales de l'air à travers les données historiques, le réchauffement le plus prononcé s'étant produit après les années 1990. Les projections climatiques proposent que ces tendances de réchauffement soient susceptibles de s'intensifier tout au long du XXIe siècle, en particulier dans le cadre des scénarios d'émissions plus élevées tels que SSP3-7,0 et SSP5-8,5, aggravant ainsi la demande d'évaporation et réduisant davantage la disponibilité efficace de l'eau. Les impacts combinés de la baisse des précipitations et de la hausse des températures ont exercé une pression croissante sur les systèmes d'eau de surface et les réserves d'eaux souterraines. Cette pression croissante se reflète clairement dans la forte réduction de la disponibilité de l'eau par habitant, qui est passée d'environ 1 500 m³ en 1962 à moins de 450 m³ au cours des dernières années, plaçant l'Algérie bien en dessous du seuil internationalement reconnu pour la pénurie d'eau. En utilisant des données historiques (1980–2022), quatre modèles d'apprentissage automatique (AdaBoost, Random Forest, SVM et Gradient Boosting) ont été entraînés pour prédire les niveaux de stress hydrique. AdaBoost a obtenu les meilleurs résultats en matière de généralisation (test R^2 = 0,967), avec les prélèvements d'eau totaux et la population urbaine identifiés comme les prédicteurs dominants, tandis que les variables climatiques (SPEI, température) ont joué un rôle de soutien. Ces tendances mettent en

évidence la vulnérabilité accrue du système national de l'eau aux facteurs climatiques et démographiques et soulèvent des préoccupations concernant la durabilité à long terme des modèles existants d'utilisation de l'eau. En réponse, l'Algérie a entrepris une série de mesures d'adaptation à grande échelle visant à améliorer la sécurité de l'approvisionnement en eau et à réduire l'exposition aux risques liés au climat. Ces mesures comprennent l'expansion des programmes de dessalement d'eau de mer, la mobilisation et la régulation stratégique des ressources en eaux souterraines, ainsi que des investissements substantiels dans les infrastructures hydrauliques conçues pour améliorer l'efficacité du stockage, du transport et de la distribution. Bien que ces interventions aient contribué à l'atténuation des pénuries d'approvisionnement immédiates, des défis persistants subsistent, en particulier en ce qui concerne le maintien de la qualité de l'eau, la lutte contre les disparités régionales marquées en matière d'accès à l'eau, l'amélioration de la gouvernance et la coordination institutionnelle, ainsi que la garantie de la viabilité financière à long terme des efforts d'adaptation. Dans l'ensemble, cette étude met l'accent sur le besoin urgent d'adopter des approches intégrées de gestion des ressources en eau résistantes au climat qui tiennent explicitement compte de l'incertitude climatique future. Le renforcement de l'alignement entre les politiques d'adaptation au climat, les cadres de planification de l'eau et les stratégies de développement plus larges sera essentiel pour améliorer la résistance. Les résultats fournissent des perspectives précieuses fondées sur des données probantes et des leçons transférables pour d'autres pays arides et semi-arides du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord qui sont confrontés à un stress hydrique d'origine climatique et à des défis d'adaptation similaires.

Mots-clés : Pénurie d›eau; Changement climatique; Algérie; CMIP6; Vulnérabilité, Adaptation.

SOIL VISION BY WEENAT: ESTIMATING SOIL MOISTURE FOR EUROPEAN AGRICULTURE USING MACHINE LEARNING METHODS

SOIL VISION PAR WEENAT : ESTIMATION DE L'HUMIDITÉ DU SOL POUR L'AGRICULTURE EUROPÉENNE À L'AIDE DE MÉTHODES D'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE

E. Buisson, M. Sauveur, [1]P. Giquel, S. Coly, M. El Fakraoui, and R. Vallée

ABSTRACT

In the context of growing water scarcity, optimising irrigation management is a major challenge for modern agriculture. Agriculture accounts for at least 70% of global freshwater withdrawals, and more than 50% of this water could be used more efficiently. One of the main operational obstacles lies in the difficulty of obtaining soil moisture data that are both accurate at the field scale and comprehensive enough to cover large territories for irrigation optimisation.

Weenat, a French company specialised in irrigation decision-support solutions since 2014, developed Soil Vision as part of the Meteoria and e-RASM research projects. This artificial intelligence system continuously estimates field-scale soil water content without requiring in-situ sensors on every field. The solution relies on a multi-source data fusion strategy integrating: a network of more than 20,000 in-situ soil sensors, a proprietary database of 2,000 physical soil samples, satellite data (NDVI, NDMI, EVI), and meteorological data spatialised at the square-kilometre resolution.

The core innovation consists of two machine learning models: the Soil Model, which characterises soil hydraulic properties from pedological data and laboratory measurements (XGBoost, MAE = 0.023 mm/mm volumetric water content, R^2 = 92%), and the Soil Vision model, which estimates real-time soil water content from multi-source data. The system was trained and tested on several thousand fields and validated on 50 pilot farms across Europe (more than 200 fields). More than 150 operational proof-of-concept trials were conducted during the 2025 season. Results show a mean absolute error of approximately 1.5% in volumetric water content and a relative error of 5.5%, covering 95% of French soil types and climatic conditions. These performances enable agricultural professionals to make proactive decisions on irrigation, tillage, fertilisation and harvest, contributing to a more resilient, efficient and sustainable agriculture.

Keywords: Water scarcity; water content; soil moisture data; irrigation; tillage.

RESUME

Dans le contexte de la croissance de la pénurie des ressources en eau, l'optimisation de la gestion de l'irrigation pose un défi majeur en ce qui concerne l'agriculture moderne. L'agriculture représente au moins 70% des prélèvements mondiaux d'eau douce, et plus de 50% de cette ressource pourrait être utilisée plus efficacement. L'un des principaux obstacles opérationnels réside dans la difficulté d'obtenir des données sur l'humidité du sol à la fois précises à l'échelle du champ et suffisamment complètes pour couvrir de vastes territoires en vue de l'optimisation de l'irrigation.

Weenat, société française spécialisée dans les solutions d'aide à la décision en irrigation depuis 2014, a développé Soil Vision dans le cadre des projets de recherche Meteoria et e-RASM. Ce système d'intelligence artificielle évalue de façon continue la teneur en eau du sol à l'échelle du champ sans exiger des capteurs in situ sur chaque champ. La solution repose

1 WET, Product & Innovation Department, Nantes, France — Email: emmanuel.buisson@weenat.com

sur une stratégie de fusion de données multi-sources intégrant : un réseau de plus de 20 000 capteurs de sol in situ, une base de données propriétaire de 2 000 échantillons physiques de sols, des données satellites (NDVI, NDMI, EVI), et des données météorologiques spatialisées à la résolution du kilomètre carré.

L'innovation de base comprend deux modèles d'apprentissage automatique : le Soi Model, qui caractérise les propriétés hydrauliques du sol à partir de données pédologiques et de mesures de laboratoire (XGBoost, MAE = 0,023 mm/mm de teneur en eau volumétrique, R^2 = 92%), et le modèle Soil Vision, qui estime.la teneur en eau du sol en temps réel à partir de données provenant de sources multiples. Le système a été formé et testé sur plusieurs milliers de champs et validé sur 50 fermes pilotes à travers l'Europe (plus de 200 champs). Plus de 150 essais opérationnels de validation de concept ont été menés au cours de la saison 2025. Les résultats montrent une erreur absolue moyenne d'environ 1,5% sur la teneur en eau volumétrique et une erreur relative de 5,5%, couvrant 95% des types de sol français et des conditions climatiques. Ces performances permettent aux professionnels de l'agriculture de prendre des décisions proactives en matière d'irrigation, de travail du sol, de fertilisation et de récolte, contribuant ainsi à une agriculture plus résistante, efficace et durable.

Mots-clés : Pénurie d›eau; Teneur en eau; Données sur l›humidité du sol; Irrigation; Travail du sol.

ASSESSING FLOOD-INDUCED SALINITY RISKS IN COASTAL IRRIGATION SYSTEMS USING INUNDATION ANALYSIS AND WATER QUALITY DATA: A CASE STUDY OF INDRAMAYU, INDONESIA

ÉVALUATION DES RISQUES DE SALINITE INDUITS PAR LES INONDATIONS DANS LES SYSTEMES D'IRRIGATION COTIERS A L'AIDE D'ANALYSES D'INONDATION ET DE DONNEES SUR LA QUALITE DE L'EAU : UNE ETUDE DE CAS D'INDRAMAYU, EN INDONESIE

Sanidhya Nika Purnomo[1], Wahyu Widiyant[2], Alifia Nuraini Sugiartoputr[3], Dinda Dwi Oktavianingtiyas[1], Raja Muhamad Muslim[1], Muhammad Naufal Al Hafizh[1], Arief Dhiaksa[2], and Alfyan Amar Pratama[3]

ABSTRACT

Coastal agricultural regions in Indonesia, especially along the northern coast of Java, are facing heightened pressures from tidal flooding, sea-level rise, land subsidence, and saltwater intrusion, jeopardizing the viability of irrigated rice cultivation. Indramayu Regency, situated on the northern coast of West Java, is a prominent agricultural region due to its irrigation infrastructure often facing tidal inundation and saltwater encroachment from coastal and estuarine systems. Although awareness of coastal flood threats is growing, there remains a scarcity of research that explicitly combines flood exposure mapping with assessments of irrigation water quality to estimate salinity risks impacting agricultural output. This study seeks to evaluate the salinity risk from flooding in the Indramayu coastal irrigation system by inundation analysis integrated with spatial and temporal water quality assessments from irrigation canals and adjacent rice fields.

A numerical flood model utilizing a digital elevation model (DEM) was employed to simulate coastal flood inundation zones under various tidal water level scenarios. DEM pre-processing encompassed basin filling, elevation correction, and slope normalization to enhance the depiction of flood extent. further, utilizing sea level data for typical high tides, extreme tidal occurrences, and future projection sea-level rise scenarios as downstream boundary conditions, a flood exposure map is produced, which is further employed to identify irrigation infrastructure and agricultural regions susceptible to coastal flooding. The water quality evaluation emphasizes metrics associated with water salinity, such as electrical conductivity (EC) and total dissolved solids (TDS), along with acidity (pH) as an ancillary indicator. Additionally, this water quality data is utilized to apply an IDW spatial interpolation technique for the creation of a salinity distribution map within the irrigation area, while a statistical correlation analysis is conducted to investigate the relationship between flood exposure levels and salinity concentrations in irrigation water and the rice field environment.

The analysis reveals that irrigation zones in coastal regions are significantly susceptible to tidal flooding, particularly under extreme tidal circumstances and anticipated sea-level rise scenarios. The spatial relationship between flood-prone regions and elevated salinity levels demonstrates that frequent tidal flooding substantially faciliates saltwater intrusion into irrigation canals and agricultural fields. Regular elevtions in EC and TDS levels were noted in regions subjected to regular irrigation, suggesting a possible decline in the

1 Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Universitas Jenderal Soedirman, Central Java, Indonesia, E-mail: sanidhyanika.purnomo@unsoed.ac.id
2 River Basin Organization for Sulawesi IV Kendari, Ministry of Public Work, Indonesia
3 Directorate General of Water Resources, Ministry of Public Works, Indonesia

appropriateness of irrigation water for rice agriculture. These findings underscore the significance of coastal flooding not merely as a hydrological threat but also as a catalyst for the deterioration of irrigation water quality and the increased danger of soil salinity.

This study assessed the ramifications for irrigation system resilience, encompassing diminished water appropriateness, heightened risk of soil salinization, and potential effects on agricultural yield. Following this assessment, adaptation measures were developed, encompassing improved drainage management, optimization of tidal gates, enhanced monitoring of irrigation water quality, and the incorporation of flood risk data into irrigation planning.

This study offers a comprehensive and cohesive method for assessing the relationships between coastal flooding and salinity that impact irrigated agriculture. This approach enhances decision-making for irrigation management in coastal agricultural systems experiencing heightened climate and environmental challenges, especially in delta regions and coastal lowlands equivalent to Indramayu.

Keywords: Coastal flooding, sea water intrusion, coastal irrigation system, north coast of Java.

RESUME

Les régions agricoles côtières en Indonésie, en particulier le long de la côte septentrionale de Java, sont confrontées à des pressions accrues dues aux inondations par les marées, à l'élévation du niveau de la mer, à l'affaissement des terres et à l'intrusion d'eau salée, ce qui compromet la viabilité de la culture de la riziculture irrigué. Le kabupaten d'Indramayu, située sur la côte septentrionale de Java occidental, est une région agricole de premier plan en raison de son infrastructure d'irrigation souvent confrontée à des inondations par les marées et à l'infiltration d'eau salée par les systèmes côtiers et estuariens. Bien que la prise de conscience des menaces liées aux inondations côtières progresse, il existe peu de recherches qui combinent explicitement la cartographie de l'exposition aux inondations avec les évaluations de la qualité de l'eau d'irrigation pour estimer les risques de salinité exerçant un impact sur la production agricole. Cette étude vise à évaluer le risque de salinité lié aux inondations dans le système d'irrigation côtier d'Indramayu par une analyse des inondations intégrée aux évaluations spatiales et temporelles de la qualité de l'eau des canaux d'irrigation et des rizières adjacentes.

Un modèle numérique d'inondation utilisant un modèle numérique d'élévation (MNE) a été utilisé pour simuler les zones d'inondation côtière dans le cadre de divers scénarios de niveau d'eau de marée. Le prétraitement du DEM a englobé le remplissage du bassin, la correction de l'élévation et la normalisation de la pente afin d'améliorer la représentation de l'étendue des crues. En outre, en utilisant des données sur le niveau de la mer pour les marées hautes typiques, les événements de marée extrêmes et les scénarios de projection future d'élévation du niveau de la mer comme conditions limites en aval, une carte d'exposition aux inondations est produite, qui est en outre utilisé pour identifier les infrastructures d'irrigation et les régions agricoles sensibles aux inondations côtières. L'évaluation de la qualité de l'eau met l'accent sur les mesures associées à la salinité de l'eau, telles que la conductivité électrique (CE) et les matières dissoutes totales (TDS), ainsi que l'acidité (pH) comme indicateur auxiliaire. De plus, ces données sur la qualité de l'eau sont utilisées pour appliquer une technique d'interpolation spatiale IDW afin de créer une carte de répartition de la salinité dans la zone d'irrigation, alors qu'une analyse de corrélation statistique est menée pour étudier la relation entre les niveaux d'exposition aux inondations et les concentrations de salinité dans l'eau d'irrigation et l'environnement des rizières.

L'analyse révèle que les zones d'irrigation dans les régions côtières sont particulièrement sensibles aux inondations par les marées, en particulier dans des circonstances de marée extrêmes et selon des scénarios prévus d'élévation du niveau de la mer. La relation spatiale entre les régions sujettes aux inondations et les niveaux de salinité élevés démontre que les inondations par les marées fréquentes facilitent considérablement l'intrusion d'eau salée dans les canaux d'irrigation et les champs agricoles. Des élévations régulières des niveaux de conductivité électrique (EC) et des matières dissoutes totales (TDS) ont été notées dans les régions soumises à une irrigation régulière, suggérant une baisse potentielle de la justesse de l'eau d'irrigation pour la riziculture. Ces résultats soulignent l'importance des inondations côtières non seulement en tant que menace hydrologique, mais aussi comme catalyseur de la détérioration de la qualité de l'eau d'irrigation et du danger accru de la salinité des sols.

Cette étude a évalué les ramifications pour la résistance du système d'irrigation, englobant la moindre justesse de l'eau, le risque accru de salinisation des sols et les effets potentiels sur le rendement agricole. À la suite de cette évaluation, des mesures d'adaptation ont été mises au point, comprenant la meilleure gestion du drainage, l'optimisation des clapets à marée, la surveillance accrue de la qualité de l'eau d'irrigation et l'intégration des données sur les risques d'inondation dans la planification de l'irrigation.

Cette étude propose une méthode complète et cohérente pour évaluer les relations entre les inondations côtières et la salinité qui exercent un impact sur l'agriculture irriguée. Cette approche facilite la prise de décision concernant la gestion de l'irrigation dans les systèmes agricoles côtiers confrontés à des défis climatiques et environnementaux accrus, en particulier dans les régions deltaïques et les basses terres côtières similaires à Indramayu.

Mots-clés : Inondation côtière; Intrusion d'eau de mer; Système d'irrigation côtier; Côte septentrionale de Java.

CLUSTER-MATRIX TOOLS FOR IRRIGATED AGRICULTURE IN INTERFLUVE

OUTILS «CLUSTER-MATRICE» POUR L'AGRICULTURE IRRIGUÉE EN L'INTERFLUVE

Liudmila N. Medvedeva[1], and Irina G. Bondarik[2]

ABSTRACT

The relevance of the study is explained by the need to improve the tools for assessing and predicting irrigated agriculture in natural and geographical zones – interfluvial areas, which are spaces located between two adjacent rivers and have a high production potential. The most famous interfluves are located in Mesopotamia in the valley of the Tigris and Euphrates Rivers; the Argentine Interfluve, located in the provinces of Corrientes and Entre Rios; the Baraba Lowland, which occupies the area between the Siberian Ob and Irtysh rivers. The genesis of mesopotamia shows that these are areas with a high level of development of many branches of agriculture (crop production, animal husbandry and fish farming). The cluster-matrix tools used in the study made an assessment of the productive agricultural potential and justified the reclamation and ecological stability of the Volga-Don interfluve, located in the south of the East European Plain in the Lower Volga and Middle Don basin. *The methodological basis of the study* was the concept of sustainable development of agricultural landscapes and tools that made it possible to conduct a SWOT analysis of agriculture, suggest vectors for the development of mesopotamia, taking into account the life cycle, and outline cluster integration processes. *The hypothesis of the study* is that a multi-factor assessment of the Volga-Don interfluve will allow us to justify the intensification of production with the formation of a "*zone of progressive irrigated agriculture*". *The aim of the study* was to strategize the Volga-Don interfluve in ensuring the intensification of agricultural production and establishing an ecological balance. *Conclusions:* The conceptual-scenario approach allowed us to model the future appearance of the Volga-Don interfluve as*a "zone of progressive irrigated agriculture*"with an estimated coefficient of ecological and meliorative intensity ≥ 0.65, programmed output of finished products from 81,708 hectares of irrigated land and attracting 2.8 billion rubles. public-private investment. To ensure the ecological sustainability of mesopotamia, we propose the following ratios of the main elements of the regional agricultural landscape: arable land-59 %, perennial stands-0.3 %, hayfields-2.3 %, pastures-32.6 %, forest stands-5.8 %.

The relevance of the study is explained by the need to improve the tools for assessing and predicting irrigated agriculture in the most important natural and geographical areas for agriculture - interfluve areas. The most famous interfluves are located in the Mesopotamia in Middle East, the Argentine Interfluve, the Barabinsk steppe in Siberia, the Volga-Don interfluve in the European part of Russia. These areas are characterized by traditional agricultural industries: crop production, cattle breeding, horticulture, and irrigation systems. The developed a facilities of cluster-matrix tools makes it possible to assess the productive potential and environmental sustainability of agricultural landscapes in interfluve. The object of the study was to determine the processes occurring in the agricultural landscapes of the

1 Doctor of Economics, Leading Researcher, VNIIOZ-Branch of FGBNU "Federal Research Center of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov (Federal Research Center VNIIGiM) (9 Timiryazev St., Volgograd, 400002, Russian Federation), milena.medvedeva2012@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-3650-2083.

2 PhD (Geohydrology), VPH ICID, Leading Researcher, FGBNU "Federal Research Center of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, (44, bild@ Bolshaya Academicheskay str., Moscow, 127431, Russian Federation), vp.bondarik@inbox.ru, ORCID: 0000-0002-6617-1801

Volga-Don interfluve of Russia. The methodological basis of the study is based on the methods developed by Russian scientists, including: multi-factor analysis, economic and mathematical modeling, and intelligent forecasting. The study hypothesis was the statement that attracting investment to irrigated agriculture using the mechanism of public-private partnership will form a "point of intensification of agricultural production" in the Volga-Don interfluve. The aim of the study was vector-strategic planning of agriculture in the Volga-Don interfluve based on cluster-matrix tools. Matrix research tools include SWOT analysis of agriculture and construction of the matrix "Production efficiency-multi-factor risks" with four groups of values that characterize production efficiency and risks, and 16 quadrants for making decisions on the different life cycle stages: decline, stagnation, optimization, development. Cluster tools allowed us to identify functioning integrated associations: vegetable growing cluster, grain - vegetable oil cluster, green cluster and garden intensification. Conclusions: the cluster-matrix tools of economic and mathematical modeling allowed us to identify vectors of strategic development of the Volga-Don interfluve in the field of agriculture through an increase in the area of irrigated land from 1.2% to 6.9% with an estimated productivity of 7.0 thousand feeding units per hectare and average production profitability about 32%. This study made it possible to establish a "point of intensification of agricultural production" in interfluve with land reclamation intensity coefficient ≥ 0.65, a programmed finished products yield (vegetable – 40.0 t/ha, crop (winter wheat) – 6.42 t/ha, fruit and berry - 35 t/ha), an optimal ratio of steppe agrolandscapes structural elements (arable land – 50-60%, perennial plantations – 0.3-0.5%, hayfields – 1.2 - 2.3%, pastures – 30.0- 34.8%, forest plantations – 5.1 – 8.2%).

Keywords*:* agriculture, interfluve, irrigated agriculture, cluster-matrix tools, productive and ecological potential.

RESUME

La pertinence de l'étude s'explique par la nécessité d'améliorer les outils d'évaluation et de prévision de l'agriculture irriguée en zones naturelles et géographiques – l'interfluve - espaces situés entre les deux rivières adjacentes ayant fort potentiel de production. Parmi les interfluves les plus célèbres, on peut citer la Mésopotamie (dans la vallée du Tigre et de l'Euphrate), l'interfluve argentin (situé dans les provinces de Corrientes et d'Entre Ríos) et la basse terre de Baraba (s'étendant entre les fleuves sibériens Ob et Irtych). La genèse de la Mésopotamie montre qu'il s'agit de zones à fort développement de nombreuses filières agricoles (productions agricoles, élevage et pisciculture). Les outils cluster-matrice utilisés dans l'étude ont permis d'évaluer le potentiel de production agricole et de justifier les mesures de mise en valeur et la stabilité écologique de l'interfluve Volga-Don, situé au sud de la plaine d'Europe orientale, entre les bassins de la Basse Volga et du Moyen Don. *La base méthodologique de l'étude* était le concept de développement durable des paysages agricoles et les outils qui ont permis de mener une analyse SWOT de l'agriculture, de proposer des vecteurs pour le développement de la Mésopotamie, en tenant compte du cycle de vie, et de définir les processus d'intégration du cluster. L'hypothèse de l'étude est qu'une évaluation multifactorielle de l'interfluve Volga-Don nous permettra de justifier l'intensification de la production par la création d'une «zone d'agriculture irriguée de pointe». L'étude visait à élaborer une stratégie pour l'interfluve Volga-Don en assurant l'intensification de la production agricole et en établissant un équilibre écologique. Conclusions : L'approche par scénarios conceptuels nous a permis de modéliser le devenir de l'interfluve Volga-Don, appelée «zone d'agriculture irriguée progressive», caractérisée par un coefficient estimé d'intensité écologique et d'amélioration de ≥ 0,65, ainsi qu'une production programmée de produits finis provenant de 81,708 hectares de terres irriguées et attirant 2,8 milliards de roubles d'investissements publics-privés. Pour assurer la durabilité écologique de la Mésopotamie, nous proposons les proportions suivantes des principaux éléments du paysage agricole régional : terres arables - 59%, cultures pérennes - 0,3%, prairies naturelles - 2,3 pâturages - 32,6%, zones forestières 5,8%.

La pertinence de l'étude s'explique par la nécessité d'améliorer les outils d'évaluation et de prévision applicables à l'agriculture irriguée en zones naturelles et géographiques les plus importantes pour l'agriculture - zones interfluves. Parmi les interfluves les plus célèbres, on peut citer la Mésopotamie (Moyen-Orient), l'interfluve argentin, la steppe de Barab (Sibérie) et l'interfluve Volga-Don (partie européenne de la Russie). Ces zones sont caractérisées par des industries agricoles traditionnelles : production agricole, élevage de bétail, horticulture et systèmes d'irrigation. Le développement d'un ensemble d'outils «cluster-matrice» permet d'évaluer le potentiel productif et la durabilité environnementale des paysages agricoles au sein de l'interfluve. L'objet de l'étude était de déterminer les processus se produisant dans les paysages agricoles de l'interfluve Volga-Don, en Russie. La base méthodologique de l'étude multi-factorielle se base sur les méthodes développées par des scientifiques russes, y compris : analyse multifactorielle, modélisation économique et mathématique, et prévisions intelligentes. L'hypothèse de l'étude était d'attirer les investissements dans l'agriculture irriguée en utilisant le mécanisme du partenariat public-privé pour créer un «point d'intensification de la production agricole» dans l'interfluve Volga-Don. L'objectif de l'étude était la planification stratégique orientée par vecteurs de l'agriculture dans l'interfluve Volga-Don basée sur des outils cluster-matrice. Les outils de recherche matriciels comprennent l'analyse SWOT de l'agriculture et la construction de la matrice « Efficacité de production - risques multifactoriels » avec quatre groupes de valeurs qui caractérisent l'efficacité de production et les risques, et utilisent 16 quadrants pour prendre des décisions sur les différentes stades du cycle de vie : déclin, stagnation, optimisation, développement. Les outils de cluster nous ont permis d'identifier des associations intégrées opérationnelles : cluster maraîcher, cluster céréales et huiles végétales, cluster vert et intensification des jardins. Conclusions : les outils cluster-matrice de modélisation économique et mathématique nous ont permis d'identifier des vecteurs de développement stratégique agricole de l'interfluve Volga-Don dans le domaine de l'agriculture grâce à une augmentation de la superficie des terres irriguées de 1,2% à 6,9%, avec une productivité estimée à 7 000 unités d'alimentation par hectare et une rentabilité moyenne de la production d'environ 32%. Cette étude a permis d'établir un «point d'intensification de la production agricole» en interfluve, caractérisé par un coefficient d'intensité de mise en valeur des terres ≥ 0,65, d'un rendement programmé en produits finis (légumes – 40,0 t/ha), culture (blé d'hiver) – 6,42 t/ha, fruits et baies - 35 t/ha), un taux optimal d'éléments structuraux des paysages et de l'agriculture de la steppe (terres arables – 50-60%, plantations pérennes – 0,3-0,5%, prairies naturelles – 1,2 - 2,3%, pâturages – 30,0 - 34,8%, plantations forestières – 5,1 - 8,2%).

Mots-clés : Agriculture; interfluve; Agriculture irriguée; Outils cluster-matrice; Potentiel productif et écologique.

INTEGRATED MODELING OF FIELD DRAINAGE AND ENGINEERING SCHEDULING FOR PLAIN RIVER NETWORK IRRIGATION DISTRICTS IN SOUTHERN CHINA

MODÉLISATION INTÉGRÉE DU DRAINAGE DES CHAMPS ET DE LA PROGRAMMATION DU GENIE POUR LES PERIMETRES IRRIGUES DU RÉSEAU FLUVIAL PLAT AU SUD DE LA CHINE

Boyu Mi[1], Haorui Chen[1,*], Baozhong Zhang[1], Yuan Tao[1], Xiaoyan Guan[1], Xinggang Liu[1], Hui Sheng[2] and Qinghong Yan[1]

ABSTRACT

Plain river network irrigation districts in southern China are characterized by flat terrain, dense and interwoven channels, weak natural drainage gradients, and intensive drainage infrastructure, making them highly vulnerable to waterlogging during plum-rain and typhoon rainfall. To analyze drainage processes under different storm conditions and evaluate the effects of hydraulic-structure scheduling, this study develops a coupled drainage simulation and scheduling model for plain river network irrigation districts. The model consists of four modules: a Xin'anjiang rainfall-runoff module, a conceptual pond module representing minor ditches, field canals, and pond bodies as lumped internal storage, a one-dimensional Saint-Venant hydrodynamic module for the backbone river network, and a rule-based scheduling module for sluice gates and pumping stations. The model was applied to the Shangtanghe Irrigation District in Zhejiang Province, China, which covers 206.5 km^2 and includes 30 main channels, 24 sluice gates, and 11 pumping stations. Calibration and validation against observed rainfall events produced district-wide Nash–Sutcliffe efficiencies of 0.997 and 0.988, respectively, with all 11 monitoring stations achieving NSE values no lower than 0.881. Scenario analysis across 16 design and historical rainfall cases shows that storage– discharge balance scheduling reduced reach exceedance ratios by up to 25 percentage points compared with regulation-based scheduling, while peak water-level reductions were generally within 0.05 m in design storms. For a 14-day plum-rain sequence, exceedance duration decreased from 86.0 to 49.2 h. Further optimization indicates that lowering control water levels and increasing pumping capacity act on different drainage phases and provide complementary benefits when combined. The results demonstrate that coupled hydrological-hydraulic simulation with dynamic structure scheduling can support drainage strategy assessment and improvement planning in lowland irrigation districts.

Keywords: irrigation districts; sluice gates; pumping stations; water levels; drainage strategy assessment.

RESUME

Les périmètres irrigués du réseau fluvial plat situés au sud de la Chine sont caractérisés par un terrain plat, des canaux denses et entrelacés, des gradients de drainage naturels faibles et une infrastructure de drainage intensive, ce qui les rend très vulnérables à l'engorgement lors des précipitations liées à la mousson asiatique orientale (pluies de la prune) et des précipitations durant les typhons. Pour analyser les processus de drainage sous différentes conditions de tempête et évaluer les effets de la programmation des ouvrages hydrauliques,

1 State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China
2 Water Conservancy Management and Service Center of Shangtanghe Basin, Haining, Zhejiang 314407, China* Corresponding Author. E-mail: chenhr@iwhr.com

cette étude développe un modèle couplé de simulation et de programmation du drainage pour les périmètres irrigués du réseau fluvial plat. Le modèle se compose de quatre modules : un module de l'écoulement naturel de type Xin'anjiang; un module conceptuel d'étangs représentant des fossés mineurs, des canaux de champs et des corps d'étangs en tant que stockage interne groupé; un module hydrodynamique unidimensionnel de Saint-Venant pour le réseau fluvial principal; et un module de programmation basé sur des règles pour les vannes d'écluse et les stations de pompage. Le modèle a été appliqué au périmètre irrigué de Shangtanghe dans la province du Zhejiang, en Chine, qui couvre une superficie de 206,5 km^2 et comprend 30 canaux principaux, 24 vannes et 11 stations de pompage. La calibration et la validation par rapport aux événements de précipitations observés ont produit des efficacités Nash–Sutcliffe à l'échelle du périmètre de 0,997 et 0,988, respectivement, les 11 stations de surveillance ayant toutes atteint des valeurs NSE supérieures ou égales à 0,881. L'analyse des scénarios sur 16 cas de précipitations nominales et historiques montre que la programmation de l'équilibre entre stockage et débit a permis de réduire les taux de dépassement des niveaux critiques dans les biefs jusqu'à 25 points de pourcentage par rapport à la programmation basée sur la réglementation, tandis que les réductions maximales des niveaux d'eau étaient généralement inférieures à 0,05 m lors des averses nominales. Pour un épisode de «pluies de la prune» d'une durée de 14 jours, la durée de dépassement des seuils critiques est passée de 86,0 à 49,2 heures. Une optimisation complémentaire indique que l'abaissement des niveaux d'eau de contrôle et l'augmentation de la capacité de pompage agissent sur des phases différentes du drainage et offrent des avantages complémentaires lorsqu'ils sont combinés. Les résultats démontrent que la simulation hydrologique-hydraulique couplée à la programmation dynamique des ouvrages peut soutenir l'évaluation de la stratégie de drainage et la planification de l'amélioration dans les périmètres irrigués de basse terre.

Mots-clés : Périmètres irrigués; Vannes d'écluse; Stations de pompage; Niveaux d'eau; Evaluation de la stratégie de drainage.

GCCM TECHNOLOGY FOR IRRIGATION CANAL REHABILITATION: TWO CASE STUDIES

TECHNOLOGIE GCCM POUR LA RÉHABILITATION DES CANAUX D'IRRIGATION : DEUX ÉTUDES DE CAS

Tamás Szatmári[1], Darren Hughes[2], and József Richter[3]

ABSTRACT

Ageing irrigation infrastructure, combined with intensifying climate pressures, is driving demand for rapid, cost-effective rehabilitation solutions that reduce water losses and extend asset service life. This paper examines the application of Geosynthetic Cementitious Composite Mat (GCCM) technology - specifically the CCX-M™ product conforming to ASTM D8364 Type II classification - as a practical alternative to conventional precast or cast-in-place concrete for irrigation canal lining and rehabilitation.

Two international case studies are presented. The first concerns the Tiszafüred II. Secondary Canal in Hungary, operated by the Middle Tisza District Water Directorate (KOTIVIZIG). In February 2022, a pilot section of this canal - part of a system originally constructed between 1937 and 1940 - was rehabilitated using CCX-M™ GCCM. The installation was completed in two working days under near-freezing winter conditions, within the narrow maintenance window available outside the irrigation season, and the canal was returned to service within one week. The case study documents construction methodology, cold-weather installation procedures, jointing techniques, and lessons learned for future large-scale adoption.

The second case study concerns the Henry Miller Reclamation District No. 2132 (HMRD) in Dos Palos, California, USA. In October 2023, approximately 2,600 m^2 of CCX-M™ were installed to rehabilitate a deteriorated concrete-lined irrigation canal serving ~190 km^2 of farmland. Installation was completed in just over three days, and post-installation seepage monitoring recorded a 96% reduction in water loss. The canal was returned to service within 24 hours of final hydration.

Comparison of the two projects demonstrates that GCCM technology delivers consistent performance across contrasting climatic environments, institutional contexts, and infrastructure conditions. Key conclusions include: installation speed significantly within available maintenance windows; seepage reduction performance consistent with established benchmarks; suitability for self-installation by district operational personnel; and applicability across a wide range of canal rehabilitation scenarios. The paper argues that GCCM solutions represent a viable and scalable response to the global challenge of irrigation infrastructure deterioration under accelerating climate stress.

Keywords: GCCM, Geosynthetic Cementitious Composite Mat, canal rehabilitation, irrigation infrastructure, water loss reduction, CCX-M, seepage control, climate resilience.

RESUME

Le vieillissement des infrastructures d'irrigation, combiné à l'intensification des pressions climatiques, stimule la demande croissante pour des solutions de réhabilitation rapides et

1 Tamás Szatmári, Concrete Canvas Ltd., Email: tamas.szatmari@concretecanvas.com, Mobile: +36 70 383 2954, Cowbridge Road, Talbot Green, Pontyclun, CF72 8HL, United Kingdom

2 Darren Hughes, Concrete Canvas Ltd., Email: darren.hughes@concretecanvas.com, Mobile: +44 (0)7799 711473, Cowbridge Road, Talbot Green, Pontyclun, CF72 8HL, United Kingdom

3 József Richter, Karcagi Szakaszmérnökség – Közép-Tisza-vidéki Vízügyi Igazgatóság, Email: richter.jozsef@kotivizig.hu, Mobile: +36 30 748 4155, Szent István sugárút 7, 5300 Karcag, Hungary,

rentables de réduire les pertes d'eau et de prolonger la durée de vie des ouvrages. Cet article examine l'application de la technologie des tapis composites cimentaires géosynthétiques (GCCM) - plus précisément le produit CCX-M™ conforme à la classification ASTM D8364 Type II - comme alternative pratique au béton conventionnel (préfabriqué ou coulé sur place) pour le revêtement et la réhabilitation des canaux d'irrigation.

Deux études de cas internationales sont présentées. La première concerne le canal secondaire Tiszafüred II en Hongrie, géré par la Direction des eaux du district de la Tisza moyenne (KOTIVIZIG). En février 2022, une section pilote de ce canal - faisant partie d'un système initialement construit entre 1937 et 1940 - a été réhabilitée à l'aide du CCX-M™ GCCM. L'installation a été réalisée en deux jours ouvrables dans des conditions hivernales proches du point de congélation, durant la courte période de maintenance disponible en dehors de la saison d'irrigation, et le canal a été remis en service en l'espace d'une semaine. L'étude de cas documente la méthodologie de construction, les procédures d'installation par temps froid, les techniques d'assemblage, et les leçons apprises pour une adoption future à grande échelle.

La deuxième étude de cas concerne le district d'aménagement hydraulique Henry Miller No. 2132 (HMRD) à Dos Palos, en Californie, aux États-Unis. En octobre 2023, environ 2 600 m² de CCX-M™ ont été installés pour réhabiliter un canal d'irrigation revêtu en béton détérioré desservant environ 190 km² de terres agricoles. L'installation a été achevée en un peu plus de trois jours, et la surveillance des infiltrations après l'installation a enregistré une réduction de 96% des pertes d'eau. Le canal a été remis en service dans l'intervalle de 24 heures suivant l'hydratation finale.

La comparaison de ces deux projets démontre que la technologie GCCM offre des performances constantes malgré la diversité des environnements climatiques, des contextes institutionnels et de l'état des infrastructures. Les principales conclusions incluent : une rapidité d'installation compatible avec les périodes de maintenance disponibles; des performances de réduction des infiltrations conformes aux références établies; une facilité de pose par le personnel opérationnel du district; et une applicabilité à un large éventail de scénarios de réhabilitation de canaux. Le document soutient que les solutions GCCM représentent une réponse viable et évolutive au défi mondial de la détérioration des infrastructures d'irrigation face à l'intensification du stress climatique.

Mots-clés: GCCM; Tapis composites cimentaires géosynthétiques; Réhabilitation du canal; Infrastructure d'irrigation; Réduction de la perte d'eau, CCX-M; Contrôle des infiltrations; Résistance climatique.

SUSTAINABILITY ISSUES OF WATER USE ON THE DEVELOPMENT OF HETAO IRRIGATION DISTRICT, THE YELLOW RIVER BASIN

QUESTIONS DE LA DURABILITÉ DE L'UTILISATION DE L'EAU DANS LE DÉVELOPPEMENT DU DISTRICT D'IRRIGATION DE HETAO, DU BASSIN VERSANT DE JAUNE

Weiying Feng[1], Chia Min Ho[2], Qingfeng Miao[3], Zhuangzhuang Feng[3], Isabel Maria Duarte[4], and José Manuel Gonçalves[4]

ABSTRACT

Sustainable water management is essential for addressing the water–energy–food nexus, particularly in irrigation districts facing climate variability and increasing inter-sectoral water competition. In arid and semi-arid regions, agricultural water use must be improved without compromising food production, farmer livelihoods, or ecological stability. This study analyses water management modernization in the Hetao Irrigation District (HID) of the Yellow River Basin through the framework of transitional change. Based on recent research, this study characterizes implemented modernization measures, including off-farm canal upgrading, improved on-farm surface irrigation, crop and soil management, drainage and salinity control, autumn irrigation regulation, and the expansion of drip irrigation systems. The results show that modernization has improved canal regulation, water delivery reliability, and field-level irrigation efficiency. Optimized border irrigation and precision land leveling reduced irrigation redundancy and improved water distribution uniformity, while drip irrigation enhanced precise water application and crop water productivity in suitable areas. However, the modernization process also revealed important trade-offs. The expansion of high-value cash crops may increase structural water demand, weakening expected water-saving effects. Reducing autumn irrigation can ease seasonal water pressure but may disturb salt leaching and increase salinization risks. In addition, advanced irrigation technologies require investment, energy, maintenance capacity, and farmer training, which may limit adoption among smallholders. Overall, irrigation modernization in the HID should be understood as an integrated transition rather than a single technological upgrade. Sustainable outcomes require coordinated engineering innovation, adaptive water allocation, crop-structure optimization, salinity monitoring, financial support, and institutional reform.

Keywords: Irrigation Modernization; Water–Energy–Food Nexus; Hetao Irrigation District; Water-Saving Irrigation; Soil Salinization.

RESUME

Une gestion durable de l'eau est essentielle pour traiter le lien entre eau-énergie-alimentation, en particulier dans les périmètres irrigués confrontés à la variabilité climatique et à une concurrence intersectorielle croissante concernant l'accès à l'eau. Dans les régions arides et semi-arides, l'utilisation agricole de l'eau doit être améliorée sans compromettre la production

1 Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing, 100191, China, E-mail: fengweiying@buaa.edu.cn
2 PhD student, School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing, 100191, China, E-mail: hochiamin@buaa.edu.cn
3 Associate Professor, College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China, E-mail: nmglrp@imau.edu.cn; fengzz95@emails.imau.edu.cn
4 Professor, Polytechnic Institute of Coimbra, Coimbra Agriculture School, CERNAS—Research Center for Natural Resources, Environment and Society, Bencanta, 3045-601 Coimbra, Portugal, E-mail: iduarte@esac.pt; jmmg@esac.pt

alimentaire, les moyens de subsistance des agriculteurs ou la stabilité écologique. Cette étude analyse la modernisation de la gestion de l'eau dans le périmètre irrigué de Hetao (HID) du bassin versant de Jaune dans le cadre du changement transitoire. Sur la base de recherches récentes menées, cette étude caractérise les mesures de modernisation mises en œuvre, y compris l'amélioration des canaux hors exploitation, l'irrigation de surface améliorée à la ferme, la gestion des cultures et des sols, le contrôle du drainage et de la salinité, la régulation de l'irrigation d'automne et l'expansion des systèmes d'irrigation goutte à goutte. Les résultats montrent que la modernisation a amélioré la régulation des canaux, la fiabilité de l'approvisionnement en eau et l'efficacité de l'irrigation au niveau du champ. L'optimisation de l'irrigation par planches et le nivellement de précision des terres ont réduit la redondance de l'irrigation et amélioré l'uniformité de la distribution d'eau, tandis que l'irrigation goutte-à-goutte a amélioré l'application précise de l'eau et la productivité de l'eau agricole dans les zones appropriées. Cependant, le processus de modernisation a également révélé d'importants compromis. L'expansion des cultures commerciales de haute valeur pourrait augmenter la demande structurelle en eau, ce qui donnera lieu à l'affaiblissement des effets attendus d'économie d'eau. La réduction de l'irrigation d'automne peut atténuer la pression hydrique saisonnière mais peut perturber le lessivage du sel et augmenter les risques de salinisation. En outre, les technologies d'irrigation avancées nécessitent des investissements, de l'énergie, des capacités de maintenance et de la formation des agriculteurs, ce qui peut limiter leur adoption par les petits exploitants. En général**,** la modernisation de l'irrigation dans périmètre irrigué de Hetao (HID) doit être comprise comme une transition intégrée plutôt qu'une simple mise au point technologique. Des résultats durables nécessitent une innovation technique coordonnée, une allocation adaptative de l'eau, une optimisation de la structure des cultures, une surveillance de la salinité, un soutien financier et une réforme institutionnelle.

Mots-clés : Modernisation de l'irrigation; Lien entre eau-énergie-alimentation; Périmètre irrigué de Hetao; Irrigation économe en eau; Salinisation des sols.

FROM STARS TO REALITY: DEVELOPING A GEOSPATIAL APPLICATION FOR NATIONAL IRRIGATION PLANNING AND MONITORING – A PRACTICAL JOURNEY FROM RWANDA

DES ÉTOILES À LA RÉALITÉ : DÉVELOPPER UNE APPLICATION GÉOSPATIALE POUR LA PLANIFICATION ET LE SUIVI DE L'IRRIGATION NATIONALE – VOYAGE PRATIQUE AU RWANDA

Romain Vidal[1], Jules Wijting[2], and Stéphane Delichère[3]

ABSTRACT

Rwanda is strongly committed to leveraging digital transformation to accelerate growth and rural development. A "Geospatial Hub" became operational in 2023 to provide centralized geospatial data, infrastructure and services with the ambition to support, among other things, the development of operational geospatial applications that strengthen evidencebased agricultural and water resource management. Within this framework, a Smart Irrigation Solution is being developed by the Rwanda Space Agency with the support of the French Agency for Development and aims of providing reliable and measurable data for irrigation planning and risks monitoring.

The objective is to compute and/or display, at various spatial and temporal scales, arable land suitable for irrigation, land that can be effectively irrigated, net irrigation water requirements, and water availability or water balance in major water bodies. The Solution, designed with the WIMES software toolbox powered by BRLi, integrates satellite observations, meteorological forecasts, hydrological modelling outputs, and agricultural datasets within a geospatial environment to generate near-real-time information on Net Irrigation Water Requirements (NIWR), water availability, and drought risk.

Given the limited availability of in-situ hydrological data, water resource availability is estimated using a coefficient-based – runoff and infiltration - approach derived from WEAP modelling outputs and satellite and field meteorological observations – rainfall, evapotranspiration and soil moisture. The platform produces operational indicators such as water availability and drought risk indicators to support decision makers in monitoring and anticipating critical situations and guiding sectoral decisions. Transforming a conceptual geospatial solution into an operational national system requires navigating various technical and institutional complexities. These include data availability and resolution constraints, crop identification challenges, uncertainties in modelling water basin behaviors and high institutional expectations.

This paper presents the system architecture, methodological approach, and implementation process, that were used, highlighting key challenges and lessons learned. The results demonstrate that robust and scalable irrigation decision-support systems can be developed in data-constrained environments through pragmatic modelling choices, effective data integration, and strong institutional engagement. This process also provides a significant opportunity for collaboration between institutions and disciplines, mobilizing the experiences, tools and capacities of different national stakeholders.

Keywords: spatial and temporal scales; agricultural and water resource management; water availability; meteorological forecasts; drought risk indicators.

1 BRLi, 1105 avenue Pierre Mendès France, Nîmes, France – romain.vidal@brl.fr
2 BRLi, 1105 avenue Pierre Mendès France, Nîmes, France – jules.wijting@brl.fr
3 BRLi, 1105 avenue Pierre Mendès France, Nîmes, France – stephane.delichere@brl.fr

RESUME

Le Rwanda est fermement engagé à tirer parti de la transformation numérique pour accélérer la croissance et le développement rural. Un «Centre Géospatial» est devenu opérationnel en 2023 pour fournir des données géospatiales centralisées, une infrastructure et des services avec l'ambition de soutenir, entre autres, le développement d'applications géospatiales opérationnelles qui renforcent la gestion des ressources agricoles et hydriques fondée sur des preuves.

Dans ce cadre, une solution d'irrigation intelligente est en cours de développement par l'Agence spatiale rwandaise avec le soutien de l'Agence française de développement. Elle vise à fournir des données fiables et mesurables pour la planification de l'irrigation et le suivi des risques. L'objectif est de calculer et/ou d'afficher, à différentes échelles spatiales et temporelles, les terres arables adaptées à l'irrigation, les terres potentiellement irrigables, les besoins nets en eau pour l'irrigation, ainsi que la disponibilité en eau ou le bilan hydrique dans les principaux corps d'eau.

La solution, conçue avec l'aide de la boîte à outils logicielle WIMES alimentée par BRLi, intègre des observations satellitaires, des prévisions météorologiques, des résultats de modélisation hydrologique et des ensembles de données agricoles au sein d'un environnement géospatial afin de générer des informations en temps quasi réel sur les besoins nets en eau d'irrigation. (NIWR), la disponibilité de l'eau et les risques de sécheresse.

Compte tenu de la disponibilité limitée des données hydrologiques in situ, la disponibilité des ressources en eau est estimée grâce à une approche basée sur les coefficients – ruissellement et infiltration - approche dérivée des résultats de modélisation WEAP et des observations météorologiques par satellite et sur le terrain – précipitations, évapotranspiration et humidité du sol. La plateforme produit des indicateurs opérationnels tels que ceux relatifs à la disponibilité de l'eau et aux risques de sécheresse pour aider les preneurs de décision à surveiller et à anticiper les situations critiques et à guider les décisions sectorielles.

La transformation d'une solution géospatiale conceptuelle en un système national opérationnel exige de surmonter diverses complexités techniques et institutionnelles. Il s'agit notamment des contraintes liées à la disponibilité et à la résolution des données, les difficultés d'identification des cultures, les incertitudes liées à la modélisation du comportement des bassins versants et les attentes institutionnelles élevées.

Ce document présente l'architecture du système, l'approche méthodologique et le processus de mise en œuvre qui ont été utilisés, en soulignant les principaux défis et leçons apprises. Les résultats démontrent que des systèmes robustes et évolutifs d'aide à la décision en irrigation peuvent être développés dans des environnements contraints par les données grâce à des choix pragmatiques de modélisation, une intégration efficace des données et un fort engagement institutionnel. Ce processus offre également une occasion importante de collaboration entre les institutions et les disciplines, en mobilisant les expériences, les outils et les capacités des différentes parties prenantes nationales.

Mots-clés : Echelles spatiales et temporelles; Gestion agricole et des ressources en eau; Disponibilité en eau; Prévisions météorologiques; Indicateurs de risque de sécheresse.

BRIDGING WATER ACCOUNTING AND THE WEFE NEXUS THROUGH AN INTERACTIVE WEB PLATFORM FOR CLIMATE-RESILIENT IRRIGATION MANAGEMENT AND PLANNING

ÉTABLISSEMENT D'UN LIEN ENTRE LA COMPTABILITÉ DE L'EAU ET LE LIEN ENTRE WEFE VIA UNE PLATEFORME WEB INTERACTIVE POUR UNE GESTION ET UNE PLANIFICATION DE L'IRRIGATION RÉSISTANTE AU CLIMAT

Ali Hammani[1], and Ehssan El Meknassi Youssoufi[2]

ABSTRACT

In the face of increasing climate variability, population growth, and competing water demands, integrated approaches to water resources planning and management are more critical than ever. Traditional approaches often operate in sectoral silos, failing to account for the complex interactions between water, energy, food production, and ecosystems. This paper presents a novel, generic web-based geospatial Decision Support System for integrated Water Resources Planning and Management, grounded in Water Accounting and framed within the WEFE Nexus approach. A core design principle is the platform's applicability to any spatial management unit, making it a transferable tool for diverse hydrological and institutional contexts. Built with Django and open-source geospatial technologies, the system integrates both observed and satellite-derived data to construct comprehensive, multi-scale water balances. On the supply side, the platform integrates surface water, groundwater, and non-conventional resources (wastewater reuse, desalination, rainwater harvesting). On the demand side, it quantifies consumption across agricultural, urban, industrial, and environmental flow sectors. The energy dimension captures pumping energy, hydropower, solar and wind energy for irrigation, and the energy costs of desalination and wastewater treatment. Environmental impacts are assessed through ecosystem health indicators, aquifer overexploitation monitoring, and environmental flow quantification. A distinguishing feature is the participatory simulation module, enabling multi-stakeholder exploration of water management scenarios under different climate projections. Stakeholders collaboratively assess trade-offs across the WEFE nexus and evaluate agricultural strategies (agroecology, precision agriculture, intensive farming, greenhouse extension) with quantified effects on water saving, crop yields, energy consumption, and carbon sequestration. The platform was tested on the Loukkos river basin in northern Morocco, demonstrating its ability to produce spatially explicit water accounts, simulate cascading WEFE nexus effects under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 climate pathways, and support participatory, evidence-based decision-making for climate-resilient irrigation management. The platform is open-source and readily transferable to other river basins and water-scarce regions worldwide.

Keywords: Water Accounting; WEFE Nexus; Decision Support System; Participatory simulation; Irrigation management; Climate resilience.

RESUME

Face à l'augmentation de la variabilité climatique, à la croissance démographique et à la concurrence pour l'accès à l'eau, les approches intégrées de planification et de gestion des ressources en eau sont plus essentielles que jamais. Les approches traditionnelles

1 Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rural Engineering, Rabat, Morocco; [2]Independent Senior Consultant, Irrigation and Water Management Specialist, Rabat, Morocco

fonctionnent souvent en silos sectoriels, sans tenir compte des interactions complexes entre l'eau, l'énergie, la production alimentaire et les écosystèmes. Cet article présente un nouveau système d'aide à la décision géospatial générique basé sur le web pour la planification et la gestion intégrées des ressources en eau, fondé sur la comptabilité de l'eau et s'inscrit dans l'approche du lien entre WEFE (Eau-Énergie-Alimentation-Écosystèmes). Un principe de conception fondamental est l'applicabilité de la plateforme à toute unité de gestion spatiale, ce qui en fait un outil transférable pour divers contextes hydrologiques et institutionnels. Construit avec Django et des technologies géospatiales «open-source», le système intègre à la fois des données observées et issues de satellites pour élaborer des bilans hydriques complets à multi-échelles. Sur le plan de l'offre, la plateforme intègre les eaux de surface, les eaux souterraines et les ressources non conventionnelles (réutilisation des eaux usées, dessalement, collecte des eaux pluviales). Du côté de la demande, il quantifie la consommation par les secteurs agricoles, urbains, industriels et environnementaux. La dimension énergétique englobe l'énergie de pompage, l'hydroélectricité, l'énergie solaire et éolienne pour l'irrigation, ainsi que les coûts énergétiques du dessalement et du traitement des eaux usées. Les impacts environnementaux sont évalués à l'aide d'indicateurs de la santé des écosystèmes, du suivi de la surexploitation des aquifères et de la quantification des débits environnementaux. Une caractéristique distinctive est le module de simulation participative, permettant aux diverses parties prenantes d'explorer des scénarios de gestion de l'eau sous différentes projections climatiques. Les parties prenantes évaluent de manière collaborative les compromis à travers le lien entre WEFE et analysent les stratégies agricoles (agroécologie, agriculture de précision, agriculture intensive, extension des serres) avec des effets quantifiés sur l'économie d'eau, les rendements des cultures, la consommation d'énergie et la séquestration du carbone. La plateforme a été testée sur le bassin versant de Loukkos, au nord du Maroc, démontrant sa capacité à produire des comptes de l'eau spatialement explicites, à simuler les effets en cascade du lien entre WEFE sous les trajectoires climatiques SSP2-4.5 et SSP5-8.5, et à soutenir une prise de décision participative fondée sur des preuves pour une gestion de l'irrigation résistante au climat. La plateforme est «open-source» et facilement transférable à d'autres bassins fluviaux et régions du monde où l'eau se fait rare.

Mots clés : Comptabilité de l'eau; Lien entre WEFE; Système d'aide à la décision; Simulation participative; Gestion de l'irrigation; Résistance climatique.

DEVELOPMENT OF AN ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR WATER DEMAND IN TAIWAN, SHIH-MEN REGION

DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR LA DEMANDE EN EAU DANS LA RÉGION DE SHIH-MEN, A TAIWAN

Tung Yeh[1], Hsueh-Yen Shih[1], Tzu-Ying Lee[1], Cheng-Hsun Wu[2], and Candera Wijaya[1]

ABSTRACT

Water constitutes an essential resource for paddy cultivation, with insufficient water supply leading to crop mortality or diminished yields. In Taiwan, precipitation exhibits significant temporal variability, with rainfall during the wet season ranging from 1.5 to 9 times that of the dry season. Geographically, the terrain has steep slopes and short rivers. According to long-term statistics, an average of about 57% of runoff is not effectively utilized and flows directly into the sea. Furthermore, the increasing impact of climate change has rendered water resource availability more unpredictable. Consequently, accurate estimation of crop water demand is vital for both governmental agencies and agricultural practitioners. The extensive scale of irrigation areas complicates direct field investigations. In this regard, remote sensing technologies present significant advantages for large-scale monitoring compared to conventional ground-based surveys. Taiwan's agricultural landscape is characterized by complex cultivation patterns, with fragmented and small field boundaries. The manual analysis rate of aerial imagery is approximately 1,000 hectares per day, depending on conditions, which limits its practical application. The Taiwan Ministry of Agriculture (MOA) operates aircraft equipped with Leica DMCIII large-format cameras, which are capable of generating aerial orthoimages with a spatial resolution of 0.15 meters. These aircraft conduct aerial surveys of Taiwan approximately twice annually, facilitating crop monitoring. Furthermore, the integration of artificial intelligence technologies enables the autonomous identification of crop planting areas. This research introduces a methodology that integrates an Artificial Intelligence (AI) deep learning model to identify paddy field areas with established irrigation formulas to automatically estimate water demand in the Shih-men region of Taiwan. High-resolution orthoimages of paddy fields, which were manually annotated, served as the training data. The AI model was fine-tuned using the Low-Rank Adaptation (LoRA) technique applied to Meta AI's pretrained Segment Anything Model (SAM) with the backbone Visual Transformer Base (ViT-B). SAM, a pixel classification model, directly outputs delineated paddy field areas. When implemented in the Shih-men region, the model attained an F1 score of 0.85.

The MOA has released parcel map data delineating field boundaries, enabling crop identification through object classification models. In this research, a Feature-Classifier model was employed as an alternative approach for paddy field identification. Compared to SAM, the Feature-Classifier demands lower computational resources and processing time. When implemented in the Shih-men region, the model attained an F1 score of 0.84, comparable to that of SAM, although it depends on the availability of parcel map data. Additionally, it was observed that the Feature-Classifier exhibits reduced accuracy in cases where the parcel size is smaller than the feature tile or when the parcel shape is a concave polygon.

1 Agricultural Engineering Research Center, No. 196-1, Zhongyuan Rd., Zhongli Dist., Taoyuan City 32061, Taiwan. E-mail: yehtong144@aerc.org.tw, isacyen@aerc.org.tw, zylee@aerc.org.tw, rbhung@aerc.org.tw

2 National Taiwan University, No. 1, Section 4, Roosevelt Rd, Xuefu Village, Da'an District, Taipei City, 10617, Taiwan. E-mail: b10602039@g.ntu.edu.tw

Following the delineation of paddy field areas via AI models, irrigation formulas were applied to estimate total water demand. Key factors incorporated into the irrigation calculations included field seepage, effective rainfall within the fields, paddy field evaporation, and canal water conveyance efficiency. Regarding field seepage, this research used the soil management group map as the data, which divided soil drainage into three levels. Rainfall and evaporation rates were calculated using weather information released by the Central Weather Administration.

In summary, this study introduces a methodology that integrates artificial intelligence-driven delineation of paddy field areas with the application of irrigation formulas to estimate water demand, thereby offering a potential alternative to manual identification of planting regions. Additionally, the research contributes a labeled dataset comprising high-resolution orthoimages of paddy fields, which is suitable for training AI models. Moreover, the study presents a comparative evaluation of pixel-based and object-based classification approaches for the identification of paddy fields.

Keywords: Artificial intelligence; water supply; water demand; canal water conveyance efficiency; identification of paddy field.

RESUME

L'eau constitue une ressource essentielle pour la riziculture, avec un approvisionnement en eau insuffisant donnant lieu à une perte des cultures ou à une diminution des rendements. À Taiwan, les précipitations présentent une forte variabilité temporelle, avec des précipitations pendant la saison des pluies allant de 1,5 à 9 fois celles de la saison sèche. Sur le plan géographique, le terrain possède des pentes raides et des rivières courtes. Selon les statistiques à long terme, une moyenne d'environ 57% du ruissellement n'est pas utilisée efficacement et se déverse directement dans la mer. En outre, l'impact croissant du changement climatique a rendu la disponibilité des ressources en eau plus imprévisible. Par conséquent, une estimation précise des besoins en eau des cultures est essentielle à la fois pour les agences gouvernementales et les praticiens agricoles. L'étendue des zones d'irrigation rend toutefois les enquêtes de terrain complexes. À cet égard, les technologies de télédétection présentent des avantages significatifs pour la surveillance à grande échelle par rapport aux enquêtes terrestres conventionnelles. Le paysage agricole de Taïwan se caractérise par des modes de culture complexes, avec des parcelles fragmentées et petites. Le taux d'analyse manuelle de l'imagerie aérienne est d'environ 1 000 hectares par jour, selon les conditions, ce qui limite son application pratique. Le ministère de l'agriculture de Taiwan (MOA) exploite des avions équipés de caméras Leica DMCIII à grand format, qui sont capables de produire des ortho-images aériennes avec une résolution spatiale de 0,15 mètre. Ces avions effectuent des relevés aériens de Taiwan environ deux fois par an, ce qui facilite le suivi des cultures. De plus, l'intégration des technologies d'intelligence artificielle permet une identification autonome des zones de culture.

Cette recherche présente une méthodologie qui intègre un modèle d'apprentissage profond d'intelligence artificielle (IA) pour identifier les rizières avec des formules d'irrigation établies afin d'estimer automatiquement la demande en eau dans la région de Shih-men à Taiwan. Les ortho-images à haute résolution des rizières, qui ont été annotées manuellement, ont servi de données d'entraînement. Le modèle d'IA a été affiné à l'aide de la technique LoRA (Low-Rank Adaptation) appliquée au modèle pré-entraîné SAM (Segment Anything Model) de Meta AI, avec la base du transformateur visuel (ViT-B). SAM, un modèle de classification en pixels, sort directement les zones de rizières délimitées. Lorsqu'il est mis en œuvre dans la région de Shih-men, le modèle a atteint un score F1 de 0,85.

Le ministère de l'Agriculture (MOA) a publié des données cartographiques de parcelles représentant les limites des parcelles, permettant l'identification des cultures grâce à des modèles de classification d'objets. Dans cette recherche, un modèle de classification par caractéristiques a été utilisé comme approche alternative pour l'identification des rizières. Par rapport à SAM, le classificateur de caractéristiques exige des ressources de calcul et un temps de traitement réduit. Lorsqu'il a été mis en œuvre dans la région de Shih-men, le modèle a atteint un score F1 de 0,84, par rapport à celui de SAM, bien qu'il dépende de la disponibilité des données cartographiques des parcelles. De plus, il a été observé que le classificateur de caractéristiques présente une précision réduite dans les cas où la taille de la parcelle est inférieure à celle de la tuile caractéristique ou lorsque la forme de la parcelle est un polygone concave.

Suite à la présentation des rizières via des modèles d'IA, des formules d'irrigation ont été appliquées pour estimer la demande totale en eau. Les facteurs clés intégrés dans les calculs d'irrigation comprenaient l'infiltration sur le terrain, les précipitations efficaces sur les parcelles, l'évaporation des rizières et l'efficacité du transport de l'eau par canal. En ce qui concerne les infiltrations sur le terrain, cette recherche a utilisé la carte du groupe de gestion des sols comme données, qui divisaient le drainage du sol en trois niveaux. Les taux de précipitations et d'évaporation ont été calculés à partir des informations météorologiques publiées par l'Administration météorologique centrale (CWA).

En résumé, cette étude introduit une méthodologie qui intègre la présentation des rizières basée sur l'intelligence artificielle avec l'application de formules d'irrigation pour estimer la demande en eau, offrant ainsi une alternative potentielle à l'identification manuelle des régions de culture. De plus, la recherche contribue à un ensemble de données marquées comprenant des ortho-images de haute résolution des rizières, adapté à l'entraînement de modèles d'IA. En outre, l'étude présente une évaluation comparative des approches de classification basée sur les pixels et basée sur les objets pour l'identification des rizières.**

Mots-clés : Intelligence artificielle; Approvisionnement en eau; Demande en eau; Efficacité du transport de l'eau par canal; Identification des rizières.

CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR IRRIGATION MANAGEMENT TECHNOLOGY IN CALIFORNIAN SMALL FARMS

DEFIS ET OPPORTUNITES LIES AUX TECHNOLOGIES DE GESTION DE L'IRRIGATION POUR LES PETITES EXPLOITATIONS AGRICOLES CALIFORNIENNES

G. Ingersoll[1,2], M. Fairbairn [2, 3], and C. Leauthaud [1, 2, 3]

ABSTRACT

This study investigates the extent to which the irrigation needs of small farmers are met by currently available technology by examining irrigation sensing and management technology extension efforts in California's central coast. This was accomplished through open-ended interviews with small farmers, extension professionals and technology developers from the public and private sectors. These data were then subjected to a coding analysis informed by a theoretical framework of critical agricultural technology literature focusing on digital agriculture and sensing technology. The study begins with an examination of the methodologies and goals of precision irrigation and the critical perspective of critical agricultural studies. Next, the technologies utilized by extension professionals are described and analyzed. These are then contrasted to the ways in which small farmers practice irrigation and utilize technology. Finally, the possible reasons for limited success in technology extension efforts are discussed. These findings suggest that currently available sensing and management technologies have limited applications in small farmer systems due to the marginal status of most small farmer systems, as well as the political economic context in which technological development and extension takes place. However, these findings are limited by the size and scope of the data currently collected and thus is a preliminary analysis.

Keywords: irrigation management technology; small farmers; private sectors; political economic context.

RESUME

Cette étude examine la mesure dans laquelle les besoins en irrigation des petits exploitants sont satisfaits par les technologies actuellement disponibles, en examinant les efforts de vulgarisation des technologies de détection et de gestion de l'irrigation sur la côte centrale de la Californie. Ce travail s'est appuyé sur des entretiens ouverts menés auprès de petits exploitants, des professionnels de la vulgarisation et des développeurs de technologies des secteurs public et privé. Les données recueillies ont ensuite été soumises à une analyse de codage fondée sur un cadre théorique issu de la littérature critique sur la technologie agricole, axée sur l'agriculture numérique et les technologies de détection.

L'étude commence par un examen des méthodologies et des objectifs de l'irrigation de précision et la perspective critique des études agricoles critiques. Ensuite, les technologies utilisées par les professionnels de la vulgarisation sont décrites et analysées. Celles-ci sont ensuite contrastées avec la façon dont les petits exploitants pratiquent l'irrigation et utilisent la technologie. Enfin, les raisons possibles du succès limité des efforts de vulgarisation des

1 University of California, Center for Agroecology, Santa Cruz, United States
2 University of California Agriculture and Natural Resources (ANR), Davis, United States
3 University of California, Santa Cruz, Environmental Studies Department, Santa Cruz, United States Corresponding author : G. Ingersoll, UC Santa Cruz, Department of Environmental Studies,1156 High Street, Santa Cruz, CA 95064, USA. e-mail: gringers@ucanr.edu

technologies sont discutées. Ces résultats proposent que les technologies de détection et de gestion actuellement disponibles ont moindre application dans les systèmes de petits exploitants en raison du statut marginal de la plupart des systèmes de petits exploitants, ainsi que du contexte politique et économique dans lequel se déroulent le développement et la vulgarisation des technologies. Cependant, ces conclusions sont limitées par l'ampleur et la portée des données actuellement recueillies et constituent donc une analyse préliminaire.

Mots-clés : Technologies de gestion de l'irrigation; Petits exploitants; Secteur privé; Contexte politico-économique.

INCREASING SOCIAL DEMAND FOR PUBLIC ECOSYSTEM SERVICES OF IRRIGATION CANALS UNDER CLIMATE CHANGE AND URBANIZATION

AUGMENTATION DE LA DEMANDE SOCIALE POUR LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES PUBLICS DES CANAUX D'IRRIGATION DANS LE CADRE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DE L'URBANISATION

So Imuta[1], Kentaro Otsuka[2], Kohei Suzuki[3], and Keigo Noda[4]

ABSTRACT

Climate change and urbanization are increasing flood risk in paddy areas where irrigation, drainage, and local flood management are closely connected. In monsoon Asia, flood risk studies have mainly developed basin-scale assessments and adaptation measures for large river basins and floodplains. However, in urbanized paddy areas in Japan, agricultural canals are also required to regulate local flood risk through daily operation by Land Improvement Districts (LIDs). This paper discusses how agricultural water infrastructure should be understood and managed under such changing conditions, using the Kottsu irrigation project in Aichi Prefecture as a case study.

The case study showed that urbanization and changing rainfall conditions have increased inflow loads to agricultural canals and have added operational burdens related to flood risk reduction to existing irrigation management. Even as paddy fields have decreased, irrigation water must still be delivered to remaining farmland, while canals must also receive increased rainfall-driven inflows from urbanized areas. These findings indicate that the flood risk reduction function of paddy fields and agricultural water infrastructure is sustained not only by physical facilities, but also by continuous operation and management by the LID.

Based on this case, the paper argues that flood risk reduction should be understood not only as part of agricultural multifunctionality, but also as an ecosystem service sustained by local water management. This perspective clarifies two challenges: benefit-burden asymmetry between those who receive flood risk reduction benefits and those who bear management burdens, and the accumulation of future flood risk through limited recognition of flood risk. Finally, the paper discusses VESPa as a researcher-initiated case study that organizes ecosystem services into shareable information and provides an entry point for stakeholder discussion on sustainable water management in urbanized paddy areas.

Keywords: Climate change; urbanization; agricultural canals; agricultural water infrastructure; flood risk reduction.

RESUME

Le changement climatique et l'urbanisation augmentent les risques d'inondation dans les zones de rizières où l'irrigation, le drainage et la gestion locale des inondations sont étroitement liés. En Asie de la mousson, les études sur le risque d'inondation se sont principalement concentrées sur des évaluations à l'échelle du bassin versant et des mesures d'adaptation

1 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 1138657, Japan. Email: soimuta0825@g.ecc.u-tokyo.ac.jp
2 United Graduate School of Agricultural Sciences, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 5011193, Japan. Email: otsuka.kentarou.s9@s.gifu-u.ac.jp
3 Tagayasu Co., Ltd., 181 Koizumicho, Toyama, Toyama 9398082, Japan Email: kohei@tgys.co.jp
4 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 1138657, Japan. Email: nodakeigo@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

pour les grands bassins versants et les plaines inondables. Cependant, dans les zones de rizières urbanisées au Japon, les canaux agricoles sont également nécessaires pour régler le risque d'inondation locale grâce au fonctionnement quotidien des Districts d'amélioration des terres (LID). Cet article examine la manière dont les infrastructures hydrauliques agricoles doivent être comprises et gérées dans des conditions aussi changeantes, en utilisant l'étude de cas du projet d'irrigation de Kottsu, menée dans la préfecture d'Aichi.

L'étude de cas a montré que l'urbanisation et l'évolution des conditions pluviométriques ont augmenté les charges d'écoulement sur les canaux agricoles et ont ajouté des charges opérationnelles liées à la réduction des risques d'inondation à la gestion existante de l'irrigation. Même si les rizières ont diminué, l'eau d'irrigation doit encore être acheminée vers les terres agricoles restantes, tandis que les canaux doivent également recevoir des écoulements accrus des précipitations provenant des zones urbanisées. Ces résultats indiquent que la fonction de réduction des risques d'inondation des rizières et des infrastructures hydrauliques agricoles est soutenue non seulement par les ouvrages physiques, mais aussi par l'exploitation continue et la gestion par le LID.

Sur la base de ce cas, l'article soutient que la réduction des risques d'inondation doit être comprise non seulement comme une composante de la multifonctionnalité agricole, mais aussi comme un service écosystémique soutenu par la gestion locale de l'eau. Cette perspective clarifie deux défis : l'asymétrie bénéfice-charge entre ceux qui reçoivent des avantages de réduction du risque d'inondation et ceux qui supportent des charges de gestion, et l'accumulation du risque d'inondation futur par une reconnaissance limitée du risque d'inondation. Enfin, l'article traite de la VESPa en tant qu'une étude de cas initiée par des chercheurs qui organise les services écosystémiques en informations partageables et fournit un point d'entrée pour tenir des discussions avec les parties prenantes sur la gestion durable de l'eau dans les zones de rizières urbanisées.

Mots-clés : Changement climatique; Urbanisation; Canaux agricoles; Infrastructures hydrauliques agricoles; Réduction des risques d'inondation.

MULTIPURPOSE SMART WATER NETWORKS: IOT AND DIGITAL TECHNOLOGY FOR OPTIMIZED WATER USES AND GLOBAL IRRIGATION MANAGEMENT

RÉSEAUX D'EAU INTELLIGENTS POLYVALENTS: IOT ET TECHNOLOGIE NUMÉRIQUE POUR L'OPTIMISATION DES USAGES D'EAU ET LA GESTION D'IRRIGATION À L'ÉCHELLE MONDIALE

Frédéric Bonnadier[1], Guillaume Dallard[2], Arnaud Ouedraogo[3], Emmanuel Patenotre[1], and Evelyne Tepinier[3]

ABSTRACT

The article presents the REImu program developed by the Société du Canal de Provence (SCP), which aims to transform its multipurpose water distribution networks into"Smart Water Networks" using digital technologies such as IoT, Big Data, artificial intelligence, and hydraulic modeling. This initiative responds to increasing pressures on water resources due to climate change and seeks to improve water allocation, efficiency, and sustainability at a territorial scale.

SCP operates a vast infrastructure of 6,000 km of pipelines and 68,000 delivery points supplying water for multiple uses, including irrigation, drinking water, industry, and urban services. Launched in 2020, REImu is mainly based on the deployment of smart water meters, with around 45% already installed by 2026. These devices produce detailed consumption data (hourly to monthly), which are integrated into a cloud-based information system alongside other datasets such as weather, SCADA, GIS, and remote sensing data.

This data-driven approach provides significant benefits for both the operator and users. For SCP, it improves the understanding of network behavior, enables better anticipation of peak demand, and supports more efficient system design and operation. For customers, digital services such as consumption monitoring dashboards, leak alerts, and personalized recommendations encourage more responsible and informed water use. Additionally, the data support more flexible and sustainable contractual arrangements.

Two key innovations are highlighted. First, the development of a new connected irrigation turnout (Prisunik/Prizius), equipped with an ultrasonic full-flow meter, improves measurement accuracy, reliability, and ease of handling compared to older devices. This solution is intended for large-scale deployment across the network.

Second, the project introduces digital twins of water networks, combining real-time data with advanced modeling tools. By integrating artificial intelligence and adapting the historical Clément probabilistic formula into the EPANET modeling environment, SCP has developed a new platform (OSIREM) for simulation, design, and operational optimization. Finally, the project paves the way for the FutureHydro initiative, which aims to create a large-scale living laboratory integrating hydraulics, agronomy, and data science to enhance climate resilience and promote sustainable water management.

Keywords: Smart Water Networks; water allocation; drinking water; hydraulic modeling; water networks.

1 Société du Canal de Provence, Engineering and Services, AIX EN PROVENCE, France
2 Société du Canal de Provence, Purchase, AIX EN PROVENCE, France
3 Société du Canal de Provence, Water Service, AIX EN PROVENCE, France

RESUME

L'article présente le programme REImu développé par la Société du Canal de Provence (SCP), qui vise à transformer ses réseaux de distribution d'eau polyvalents en «Réseaux d'eau intelligents» grâce à des technologies numériques telles que l'IoT, le Big Data, l'intelligence artificielle et la modélisation hydraulique. Cette initiative est une réponse aux pressions croissantes exercées sur les ressources en eau dues au changement climatique et recherche à améliorer l'allocation de l'eau, son efficacité et sa durabilité à l'échelle territoriale.

La SCP exploite une vaste infrastructure de 6 000 km de conduites et 68 000 points de distribution fournissant de l'eau pour usages multiples, y compris l'irrigation, l'eau potable, l'industrie et les services urbains. Lancée en 2020, le programme sREImu repose pour l'essentiel sur le déploiement de compteurs d'eau intelligents, dont environ 45% étant déjà installés d'ici 2026. Ces dispositifs produisent des données de consommation détaillées (horaires à mensuelles), qui sont intégrées dans un système d'information basé sur le cloud aux côtés d'autres ensembles de données tels que les données météorologiques, SCADA, SIG et de télédétection.

Cette approche basée sur les données offre des avantages significatifs à la fois pour l'opérateur et les usagers. Pour la SCP, elle améliore la compréhension du comportement du réseau, permet une meilleure anticipation de la demande maximum et soutient une conception et une exploitation plus efficaces du système. Pour les clients, des services numériques tels que des tableaux de bord de suivi de la consommation, des alertes de fuites et des recommandations personnalisées encouragent une utilisation plus responsable et mieux informée de l'eau. En outre, les données soutiennent des dispositifs contractuels plus flexibles et durables.

Deux innovations clés sont mises en évidence. Tout d'abord, le développement d'un nouvel ouvrage de prise d'eau d'irrigation connecté (Prisunik/Prizius), équipé d'un débitmètre ultrasonique complet, améliore la précision des mesures, la fiabilité et la facilité de manipulation par rapport aux anciens dispositifs. Cette solution est destinée à un déploiement à grande échelle sur le réseau.

Deuxièmement, le projet introduit des jumeaux numériques de réseaux d'eau, combinant des données en temps réel avec des outils de modélisation avancés. En intégrant l'intelligence artificielle et en adaptant la formule probabiliste historique de Clément à l'environnement de modélisation EPANET, la SCP a développé une nouvelle plateforme (OSIREM) pour la simulation, la conception et l'optimisation opérationnelle.

Enfin, le projet ouvre la voie à l'initiative FutureHydro, qui vise à créer un laboratoire vivant à grande échelle intégrant l'hydraulique, l'agronomie et la science des données afin d'améliorer la résistance climatique et de promouvoir une gestion durable de l'eau.

Mots-clés : Réseaux d'eau intelligents; Allocation de l'eau; Eau potable; Modélisation hydraulique; Réseaux d'eau.

REMOTE SENSING FOR SUSTAINABLE IRRIGATION MANAGEMENT: CURRENT APPROACHES AND FUTURE PERSPECTIVES

TÉLÉDÉTECTION POUR UNE GESTION DURABLE DE L'IRRIGATION : APPROCHES ACTUELLES ET PERSPECTIVES D'AVENIR

Christina Orieschnig[1], Julien Lecollinet[2], Guillaume Thirel[3], Franck Bellet[4], Gilles Boulet[3,5] and Jean-Philippe Venot[1]

ABSTRACT

Given the increasing pressure on water resources and uncertainty related to future climatic developments, there is much debate regarding improving water use efficiency in agriculture. Such debate hinges on comprehensive information on both the qualitative and quantitative state of water resources as well as their current use in irrigated agriculture. However, obtaining that information can often be challenging, especially since networks for measuring hydrological data and for tracking irrigation water use are often sparse. This is where remote sensing can offer valuable supplementary insights to inform irrigation management.

Remote sensing approaches have evolved considerably over the past decades, with a great diversity of satellite data becoming available, offering ever-higher degrees of temporal and spatial resolution. From classifying irrigated crops, to assessing the availability and use of irrigation water resources, remote sensing can deliver actionable insights for both researchers and stakeholders. In addition, new satellite missions, multi-sensor data fusion, and integrations with machine learning and artificial intelligence can help refine irrigation water management. Increasingly, remote sensing data is also being integrated into operational tools designed for stakeholders and managers.

This contribution offers an overview of how remote sensing contributes to irrigation water management, including the imagery and tools that are available. We further highlight general limitations of remote sensing in irrigation water management - from restricted temporal and spatial resolutions, over questions of implementation, to a lack of co-creation that often poses a barrier to the adoption of operational tools - as well as offering perspectives to overcome them. To arrive at this synthesis, we have pooled the opinions and insights of researchers and experts from international organisations involved in irrigation water management, such as the World Bank and the UN's Food and Agriculture Organisation (FAO), in a series of three online workshops.

Keywords: Remote sensing; irrigation water management; machine learning and artificial intelligence; temporal and spatial resolutions; online workshops.

RESUME

Au vu de la pression accrue sur les ressources en eau et des incertitudes liées aux évolutions climatiques futures, l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau en agriculture fait l'objet de nombreux débats. Un tel débat repose sur des informations complètes à la fois sur l'état qualitatif et quantitatif des ressources en eau ainsi que sur leur utilisation actuelle dans

1 UMR G-EAU, IRD, AgroParisTech, Institut Agro, Cirad, INRAE, University of Montpellier
2 SCP-Société du Canal de Provence
3 Univ Toulouse, CNES, CNRS, INRAE, IRD, CESBIO, Toulouse, France
4 BRLi-Bas Rhône Languedoc
5 Indo-French Cell for Water Science, ICWaR, Indian Institute of Science, Bangalore, India

l'agriculture irriguée. Cependant, peut souvent, il est difficile de recueillir ces informations, d'autant plus que les réseaux de calcule des données hydrologiques et de suivi de l'utilisation de l'eau d'irrigation sont souvent rares. C'est là que la télédétection peut offrir des informations supplémentaires précieuses pour orienter la gestion de l'irrigation.

Les approches de la télédétection ont considérablement évolué au cours des dernières décennies, grâce à la disponibilité d'une grande diversité des données satellitaires, offrant des degrés toujours plus élevés de résolution temporelle et spatiale. Depuis la classification des cultures irriguées à l'évaluation de la disponibilité et de l'utilisation des ressources en eau d'irrigation, la télédétection peut fournir des informations exploitables pour les chercheurs et les parties prenantes. En outre, les nouvelles missions satellitaires, la fusion de données provenant des capteurs multiples et l'intégration de l'apprentissage automatique et de l'intelligence artificielle peuvent aider à affiner la gestion de l'eau d'irrigation. De plus en plus, les données de télédétection sont également intégrées dans des outils opérationnels conçus pour les parties prenantes et les gestionnaires.

Cette contribution offre un aperçu de la façon dont la télédétection contribue à la gestion de l'eau d'irrigation, y compris les images et les outils disponibles. Nous soulignons en outre les limites générales de la télédétection en ce qui concerne la gestion de l'eau d'irrigation – allant des résolutions temporelles et spatiales restreintes relatives aux questions de mise en œuvre, à un manque de co-création qui constitue souvent un obstacle à l'adoption d'outils opérationnels — tout en proposant des perspectives pour les surmonter. Pour parvenir à cette synthèse, nous avons rassemblé les opinions et les perspectives des chercheurs et des experts provenant des organisations internationales impliquées dans la gestion de l'eau d'irrigation, telles que la Banque mondiale et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), dans le cadre d'une série de trois ateliers en ligne.

Mots-clés: Télédétection; Gestion de l'eau d'irrigation; Apprentissage automatique et intelligence artificielle; Résolutions temporelles et spatiales; Ateliers en ligne.

RATIONALIZING RICE IRRIGATION STRATEGIES IN NORTHERN ITALY USING QGIS-SWAP-PADDY AND MODFLOW-6

RATIONALISATION DES STRATÉGIES D'IRRIGATION RIZICOLE AU NORD DE L'ITALIE À L'AIDE DE QGIS-SWAP-PADDY ET MODFLOW-6

Giulio L.C. Gilardi[1], Michele Rienzner[2], Darya Tkachenko[3], Marco Romani[3], Petra Baják[2], Michael Valtorta[2], Lorenzo Sangalli[2], Daniele Pedretti[2], Marco Masetti[2] and Arianna Facchi[1]

ABSTRACT

Rice-growing regions need irrigation strategies that meet crop water demand while sustaining groundwater recharge and improving resilience to water scarcity. Irrigation efficiency in these areas depends strongly on groundwater levels, which control percolation in fields and canals and affect flows from springs and watercourses. In Lomellina, northern Italy, a major rice-growing district (125,000 ha, 63,000 under rice), cultivation has traditionally relied on wet seeding and continuous flooding (WFL). In recent years, water-saving practices such as dry seeding with delayed flooding (DFL) and intermittent flooding (FTI) have increasingly replaced WFL, altering both the seasonal volume and timing of irrigation demand and groundwater recharge.

This study applies the QGIS-SWAP-Paddy framework, a spatialized version of the well-known SWAP model, integrated with a module simulating channel-network percolation, to assess these processes in Lomellina. The framework was calibrated for 2020 and validated for 2018 - 2019 using daily irrigation discharge data provided by the Irrigation User Association and the current irrigation management (PMR: 20% WFL and 80% FTI). Four scenarios - PMR, WFL, DFL, and AWD (wet seeding and alternate wetting and drying guided by a soil water status threshold) - were simulated for 2013 - 2023. Compared with WFL, the seasonal irrigation volume decreased by 18%, 30% and 32% under DFL, AWD and PMR, respectively. However, when considering peak irrigation discharge (June - July), the order of requirements was as follows: DFL > WFL > PMR = AWD. Percolation patterns mirrored the irrigation requirements. AWD was found to be a very promising strategy, promoting earlier groundwater recharge while reducing competition for irrigation during the peak months. The framework is currently being coupled with MODFLOW-6 to enable more accurate modelling of the complex interaction between groundwater levels and irrigation use.

Keywords: Irrigation strategies; crop water demand; water-saving practices; water scarcity; Irrigation efficiency.

RESUME

Les régions rizicoles exigent des stratégies d'irrigation qui répondent à la demande en eau des cultures tout en maintenant la recharge des eaux souterraines et en renforçant la résistance face à la pénurie d'eau. L'efficacité de l'irrigation dans ces zones dépend fortement des niveaux d'eau souterraine, qui contrôlent la percolation dans les champs et les canaux et exercent des impacts sur les débits des sources et des cours d'eau. À Lomellina, au nord de l'Italie, une importante région rizicole (125000 ha de terre, dont 63 000 ha de terre consacrée

1 Università degli Studi di Milano (UNIMI), Department of Agricultural and Environmental Sciences – Production, Landscape, Agroenergy (DiSAA), Milan, Italy
2 Università degli Studi di Milano (UNIMI), Department of Earth Sciences 'Ardito Desio', Milan, Italy
3 Ente Nazionale Risi (ENR), Centro Ricerche sul Riso, Castello D'Agogna, Italy Corresponding author (e-mail): giulio.gilardi@unimi.it

au riz), repose traditionnellement sur un ensemencement humide et des inondations continues (WFL). Au cours des dernières années, les pratiques d'économie d'eau telles que l'ensemencement à sec avec inondation différée (DFL) et les inondations intermittentes (FTI) ont de plus en plus remplacé le WFL, modifiant à la fois le volume saisonnier et le calendrier de la demande en irrigation et la recharge des eaux souterraines.

Cette étude applique le cadre QGIS-SWAP-Paddy, une version spatialisée du modèle bien connu SWAP, intégré à un module simulant la percolation canal-réseau, pour évaluer ces processus à Lomellina. Le cadre a été calibré pour l'année 2020 et validé pour la période 2018-2019 à l'aide des données de débit d'irrigation quotidien fournies par l'Association des usagers d'irrigation et la gestion actuelle de l'irrigation (PMR : 20 % WFL et 80 % FTI). Quatre scénarios - PMR, WFL, DFL et AWD (ensemencement humide et l'humidification et le séchage alternés guidés par un seuil d'humidité du sol) - ont été simulés pour la période 2013-2023. Par rapport à la méthode WFL, le volume d'irrigation saisonnier a diminué de 18%, 30% et 32% sous DFL, AWD et PMR, respectivement. Cependant, en ce qui concerne le débit d'irrigation maximal (juin-juillet), l'ordre des exigences était le suivant : DFL > WFL > PMR = AWD. Les modèles de percolation reflétaient les besoins en irrigation. L'AWD s'est révélée être une stratégie très prometteuse, favorisant une recharge plus précoce des eaux souterraines tout en réduisant la concurrence pour l'irrigation pendant les mois de demande maximum. Le cadre est actuellement lié à MODFLOW-6 pour permettre une modélisation plus précise de l'interaction complexe entre les niveaux d'eau souterraine et l'utilisation de l'irrigation.

Mots-clés : Stratégies d'irrigation; Besoins en eau des cultures; Pratiques d'économie d'eau; Pénurie d'eau; Efficacité de l'irrigation.

ADAPTIVE AI-DRIVEN WATER MANAGEMENT FRAMEWORK FOR SHADEGAN WETLAND

CADRE DE GESTION DE L'EAU ADAPTATIF PILOTÉ PAR L'IA POUR LA ZONE HUMIDE DE SHADEGAN

Anna Pinnarelli[1], Mehdi Forouzanfar[2], and Khoshnaz Payandeh[3,*]

ABSTRACT

Wetland–agriculture systems are increasingly exposed to water scarcity, climatic variability, upstream hydraulic regulation, drainage inflows, and growing livelihood pressure. In such contexts, irrigation water management cannot be treated as a purely technical task because crop production, wetland condition, local livelihoods, and broader territorial resilience are affected simultaneously and often through competing demands. This challenge is particularly relevant in environmentally sensitive and institutionally complex territories, where static allocation rules are often unable to respond to rapid environmental and socio-economic change.

This paper proposes an adaptive AI-driven framework for water management using the Shadegan wetland–agriculture system in south-western Iran as a case study. The framework is designed to support more responsive and transparent decision-making under uncertainty and is organized around three integrated components. The first is a multi-purpose monitoring component based on satellite observations, meteorological records, environmental sensing, and contextual socio-economic information, enabling a more complete understanding of current territorial conditions. The second is a data-driven analytical and forecasting component intended for trend detection, crop water requirement estimation, environmental change screening, and scenario generation under uncertain future conditions. The third is a multi-criteria decision-support component used to compare and rank management options under agricultural, environmental, economic, livelihood, and institutional constraints.The study contributes a territorially oriented decision framework through which monitoring, forecasting, multi-criteria evaluation, feedback, and revision are linked within a single operational loop. This allows management options to be updated as field conditions,implementation constraints, and local priorities evolve. The framework is grounded in the Shadegan case and informed by the experience of the Conservation of Iranian Wetlands Project, including pilot villages associated with sustainable agriculture and wetland-compatible livelihood practices. A structured and operational basis is thus provided for the next phase of territorial water management in wetland–agriculture systems.

Keywords: adaptive irrigation management; artificial intelligence; remote sensing; decision support; Shadegan Wetland; conceptual framework

1 Department of Mechanical, Energy and Management Engineering, University of Calabria, Rende (CS), Italy; anna.pinnarelli@unical.it

2 AI Application Development in Strategic Industries Research Group, Ahv. C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran; mehdi.forouzanfar@iau.ac.ir

3 AI Application Development in Agriculture, Environment and Medicine Research Group, Ahv. C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran; khpayandeh@iau.ac.ir

* Corresponding author: Khoshnaz Payandeh; email: khpayandeh@iau.ac.ir

RESUME

Les systèmes agricoles des zones humides sont de plus en plus exposés à la rareté de l'eau, à la variabilité climatique, à la régulation hydraulique en amont, aux apports de drainage et à la pression croissante sur les moyens de subsistance. Les systèmes d'agriculture des zones humides sont de plus en plus exposés à la rareté de l'eau, à la variabilité climatique, à la régulation hydraulique en amont, aux apports de drainage et à la pression croissante sur les moyens de subsistance. Dans de tels contextes, la gestion de l'eau d'irrigation ne peut pas être traitée comme une tâche purement technique car la production agricole, l'état des zones humides, les moyens de subsistance locaux et la résistance territoriale plus large sont affectés simultanément et souvent par des demandes concurrentes. Ce défi est particulièrement pertinent dans les territoires écologiquement sensibles et institutionnellement complexes, où les règles d'allocation statiques sont souvent incapables de répondre aux changements environnementaux et socio-économiques rapides.

Cet article propose un cadre adaptatif piloté par l'IA pour la gestion de l'eau en utilisant le systèmedes zones humides et agricoles de Shadegan au sud-ouest de l'Iran comme étude de cas. Le cadre est conçu pour soutenir une prise de décision plus réactive et transparente en situation d'incertitude et s'organise autour de trois composantes intégrées. Le premier est un composant de surveillance polyvalent basé sur des observations satellitaires, des relevés météorologiques, la détection environnementale et des informations socio-économiques contextuelles, permettant une compréhension plus complète des conditions territoriales actuelles. Le second est un composant analytique et de prévision fondé sur des données, destiné à la détection des tendances, à l'estimation des besoins en eau des cultures, au suivi des changements environnementaux et à l'élaboration de scénarios dans des conditions futures incertaines. Le troisième est un composant d'aide à la décision multicritères utilisé pour comparer et classer les options de gestion en fonction des contraintes agricoles, environnementales, économiques, institutionnelles et liées aux moyens de subsistance. L'étude contribue à un cadre décisionnel à l'échelle du territoire dans lequel le suivi, la prévision, l'évaluation multicritère, le retour d'information et la révision sont liés au sein d'une boucle opérationnelle unique. Cela permet d'actualiser les options de gestion à mesure que les conditions sur le terrain, les contraintes de mise en œuvre et les priorités locales évoluent. Le cadre est fondé sur le cas de Shadegan et éclairé par l'expérience du Projet de conservation des zones humides iraniennes, y compris les villages pilotes associés à une agriculture durable et des pratiques de subsistance compatibles avec les zones humides. Une base structurée et opérationnelle est ainsi fournie pour la prochaine phase de gestion territoriale des eaux dans les systèmes de zones humides–agricoles.

Mots-clés : Gestion adaptative de l'irrigation; Intelligence artificielle; Télédétection; Aide à la décision; Zone humide de Shadegan; Cadre conceptual.

RESEARCH ON WATER AND LAND RESOURCES REGULATION TECHNOLOGY AND DEVELOPMENT STRATEGIES IN IRRIGATED AREAS OF THE YELLOW RIVER BASIN

RECHERCHE SUR LA TECHNOLOGIE DE RÉGULATION DES RESSOURCES EN EAU ET EN TERRE ET STRATÉGIES DE DÉVELOPPEMENT DANS LES ZONES IRRIGUÉES DU BASSIN VERSANT DE JAUNE

Sun Suyan[1*], Li Wei[2], Gan Chun[3], Peng Shaoming[4], Long Xiaoxu[5], Li Guangxuan[6], Song Qiubo[7], and Li Yunling[8]

ABSTRACT

The irrigated areas in the Yellow River Basin are facing severe water scarcity and ecological pressure. The complex interactive feedback relationships among the water-ecology-energy-food (WEEF) nexus constrain regional sustainable development. This study systematically analyzes the WEEF interactive mechanism, establishes a comprehensive evaluation index system, and integrates the XGBoost model with the SHAP method to identify key driving factors. A system dynamics model is employed to simulate the evolution trends of multiple systems. Furthermore, an ecology-oriented collaborative regulation technology and development strategies for water and land resources in irrigated areas are proposed. The research reveals core issues in the Yellow River Basin's irrigated areas, such as water resource overexploitation and imbalanced water-use structure, and quantifies the driving mechanisms of natural and anthropogenic activities on ecosystems and agricultural patterns. The findings provide a scientific decision-making basis for implementing the "Four Water Determinations" principle and for ensuring food security and ecological security in the Yellow River Basin.

Keywords: Yellow River Basin; Irrigated area; Water and land resources; Water-ecology-energy-food (WEEF) coupling; System dynamics; Regulation strategy.

RESUME

Les zones irriguées du bassin versant de Jaune sont confrontées à une grave pénurie d'eau et à des pressions écologiques. Les relations de réaction interactives complexes au sein du lien entre eau-écologie-énergie-alimentation (WEEF) limitent le développement durable régional. Cette étude analyse de manière systématique le mécanisme interactif du lien entre

1 Professor, The General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design of the Ministry of Water Resources, Bejing CHINA, E-mail:sunsuyan@giwp.org.cn
2 Researcher, The General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design of the Ministry of Water Resources, Bejing CHINA, E-mail:liweilv@giwp.org.cn
3 Researcher, Schoolof Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou CHINA, Email: ganchun@gs.zzu.edu.cn
4 Professor, The General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design of the Ministry of Water Resources, Bejing CHINA, E-mail: pengshaoming@giwp.org.cn
5 Researcher, The General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design of the Ministry of Water Resources, Bejing CHINA, E-mail: longxiaoxu@giwp.org.cn
6 Researcher, The General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design of the Ministry of Water Resources, Bejing CHINA, E-mail:liguangxuan@giwp.org.cn
7 Professor, The General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design of the Ministry of Water Resources, Bejing CHINA, E-mail:Songqiubo@giwp.org.cn
8 Professor, The General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design of the Ministry of Water Resources, Bejing CHINA, E-mail:liyunling@giwp.org.cn

WEEF, établit un système d'indice d'évaluation complet et intègre le modèle XGBoost à la méthode SHAP pour identifier les facteurs déterminants clés. Un modèle de dynamique des systèmes est utilisé pour simuler les tendances d'évolution de plusieurs systèmes. En outre, une technologie de régulation collaborative axée sur l'écologie et des stratégies de développement des ressources en eau et en terres dans les zones irriguées sont proposées. La recherche met en lumière des problèmes fondamentaux qui existent dans les zones irriguées du bassin versant de Jaune, tels que la surexploitation des ressources en eau et le déséquilibre de la structure de consommation de l'eau, et quantifie l'impact exercé par des principaux mécanismes des activités naturelles et anthropiques sur les écosystèmes et les modèles agricoles. Les résultats fournissent une base scientifique pour la prise de décision relative à la mise en œuvre du principe des «quatre déterminations de l'eau» et pour assurer la sécurité alimentaire et la sécurité écologique dans le bassin versant de Jaune.

Mots-clés : Bassin versant de Jaune; Zone irriguée; Ressources en eau et en terres; Lien entre eau-écologie-énergie-aliment (WEEF); Dynamique des systèmes; Stratégie de régulation.

A MULTI-SCALE ASSESSMENT OF IRRIGATION GOVERNANCE AND SMART ALLOCATION MECHANISMS FOR ENHANCING WATER USE EFFICIENCY UNDER CLIMATE VARIABILITY IN MALAYSIA

UNE ÉVALUATION A ECHELLE MULTIPLE DE LA GOUVERNANCE DE L'IRRIGATION ET DES MÉCANISMES D'ALLOCATION INTELLIGENTE POUR AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE L'UTILISATION DE L'EAU FACE À LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE EN MALAISIE

Y. Hj Mohd Sani [1], and M.A.A. Jamaari[2]

ABSTRACT

Water security and agricultural sustainability have become increasingly interconnected policy concerns as climate variability intensifies across Southeast Asia. In Malaysia, irrigated paddy cultivation remains central to national food security strategies, yet the sector faces growing pressure from competing water demands, aging irrigation infrastructure, institutional fragmentation, and increasing hydrological uncertainty. Although the country receives abundant annual rainfall, temporal and spatial variability in water availability continues to affect irrigation reliability, particularly within major granary areas that account for most domestic rice production. Simultaneously, Malaysia's rice self-sufficiency ratio (SSR) has remained below strategic national targets despite decades of investment in irrigation infrastructure and agricultural modernization.

This paper critically examines irrigation governance and smart water allocation mechanisms through a multi-scale analytical framework encompassing national, basin, irrigation-scheme, and farm-level dimensions. A systematic review methodology was employed, synthesizing evidence from peer-reviewed literature, government policies, irrigation master plans, climate adaptation studies, and recent agricultural water management reports. Particular emphasis is placed on evaluating institutional arrangements, governance effectiveness, technological innovation, and climate resilience within Malaysia's irrigation sector.

The analysis demonstrates that while Malaysia has established a relatively comprehensive policy framework for integrated water resources management, significant governance challenges remain. Fragmented institutional responsibilities, limited integration of climate information into operational decision-making, inadequate data interoperability, and constrained stakeholder participation continue to reduce water allocation efficiency. The findings further indicate that smart irrigation technologies, digital water accounting systems, remote sensing platforms, and adaptive governance arrangements offer substantial opportunities to improve water productivity while strengthening resilience to climate variability.

The paper proposes a Smart Multi-Scale Irrigation Governance Framework that integrates climate-informed decision-making, digital technologies, participatory governance, and adaptive water allocation mechanisms. The framework contributes to current debates on irrigation modernization by demonstrating that governance reform and technological innovation must progress simultaneously if Malaysia is to achieve long-term water security, agricultural productivity, and food system resilience. The proposed framework is further aligned with the Kuala Lumpur Joint Declaration on Irrigation and Infrastructure for Food Security (2025), which recognizes irrigation modernization, climate-smart technologies, integrated water resources management (IWRM), and strengthened stakeholder participation as essential pillars for achieving resilient food systems under climate change.

1 Ministry of Agriculture and Food Security, Division of Irrigation and Agriculture Drainage, Putrajaya, Malaysia, mail: yuslina@water.gov.my

2 Ministry of Agriculture and Food Security, Division of Irrigation and Agriculture Drainage, Putrajaya, Malaysia Email: aliifaimran@water.gov.my

Keywords: Irrigation governance, climate variability, water use efficiency, smart irrigation, rice self-sufficiency, adaptive governance, Malaysia.

RESUME

La sécurité de l'eau et la durabilité agricole sont devenues des préoccupations politiques de plus en plus interconnectées à mesure que la variabilité climatique s'intensifie dans toute l'Asie du sud-est. En Malaisie, la riziculture irriguée reste au cœur des stratégies nationales de sécurité alimentaire, mais le secteur est confronté à une pression croissante en raison de la concurrence des demandes en eau, du vieillissement des infrastructures d'irrigation, de la fragmentation institutionnelle et del'incertitude hydrologique croissante. Bien que le pays reçoive des précipitations annuelles abondantes, la variabilité temporelle et spatiale de la disponibilité en eau continue d'affecter la fiabilité de l'irrigation, en particulier dans les principales zones de greniers qui représentent la partie majeure de la production nationale de riz. Simultanément, le taux d'autosuffisance de la Malaisie en riz (SSR) est resté inférieur aux objectifs stratégiques nationaux malgré des décennies d'investissements dans les infrastructures d'irrigation et la modernisation agricole.

Cet article examine de manière critique la gouvernance de l'irrigation et les mécanismes d'allocation intelligente de l'eau à travers un cadre analytique à échelle multiple englobant les dimensions nationales, de bassin, de périmètre irrigué et d'exploitation agricole. Une méthodologie de d'analyse systématique a été utilisée, synthétisant les preuves issues de la littérature évaluée par des pairs, des politiques gouvernementales, des plans directeurs d'irrigation, des études d'adaptation au climat et des rapports récents sur la gestion de l'eau en agriculture. Un accent particulier est mis sur l'évaluation des dispositifs institutionnels, de l'efficacité de la gouvernance, de l'innovation technologique et de la résistance climatique au sein du secteur de l'irrigation malaisien.

L'analyse démontre que, malgré la mise en place par la Malaisie d'un cadre politique relativement complet pour la gestion intégrée des ressources en eau, d'importants défis de gouvernance persistent. La fragmentation des responsabilités institutionnelles, l'intégration limitée des informations climatiques dans la prise de décision opérationnelle, l'interopérabilité insuffisante des données et la participation restreinte des parties prenantes continuent de réduire l'efficacité de l'allocation de l'eau. Les résultats indiquent en outre que les technologies d'irrigation intelligentes, les systèmes numériques de comptabilité de l'eau, les plateformes de télédétection et les dispositifs de gouvernance adaptative offrent des opportunités substantielles pour améliorer la productivité de l'eau tout en renforçant la résistancece à la variabilité climatique.

Le document propose un cadre de gouvernance d'irrigation à échelle multiple intelligent qui intègre la prise de décision éclairée par le climat, les technologies numériques, la gouvernance participative et des mécanismes adaptatifs d'allocation de l'eau. Le cadre contribue aux débats actuels sur la modernisation de l'irrigation en démontrant que la réforme de la gouvernance et l'innovation technologique doivent progresser simultanément pour que la Malaisie puisse atteindre la sécurité hydrique à long terme, la productivité agricole et la résistance du système alimentaire. Le cadre proposé est en outre aligné sur la Déclaration conjointe de Kuala Lumpur sur l'irrigation et les infrastructures de la sécurité alimentaire (2025), qui reconnaît la modernisation de l'irrigation, les technologies intelligentes face au climat et la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE), et a renforcé la participation des parties prenantes en tant que piliers essentiels pour parvenir à des systèmes alimentaires résistants dans le cadre du changement climatique.

Mots-clés : Gouvernance de l'irrigation; Variabilité climatique; Efficacité de l'utilisation de l'eau; Irrigation intelligente; Autosuffisance en riz; Gouvernance adaptative; Malaisie.

THE XAI-NEXUS FRAMEWORK: BRIDGING GOVERNANCE GAPS THROUGH EXPLAINABLE AI FOR RESILIENT WATER MANAGEMENT

LE CADRE XAI-NEXUS : COMBLER LES LACUNES DE GOUVERNANCE GRÂCE À L'IA EXPLICABLE POUR UNE GESTION RÉSISTANTE DE L'EAU

Behzad Navidi Nassaj[1] and Narges Zohrabi[2]*

ABSTRACT

Artificial intelligence is increasingly deployed in water governance to process complex, uncertain, and multi-scalar environmental information. Yet predictive capability alone does not ensure governance relevance. In water management, technical outputs must also be interpretable, communicable, defensible, and institutionally actionable across settings marked by hydroclimatic uncertainty, competing stakeholder priorities, and public accountability. This paper addresses that challenge by proposing XAI-Nexus, a conceptual framework for bridging explainable artificial intelligence, semantic mediation, and human validation in resilient water governance. The framework is developed through an integrative and concept-building research design that draws on literature from explainable AI, responsible AI governance, large language model mediation, and nexus-oriented water decision support. XAI-Nexus is organized around five interdependent layers: evidence input, XAI interpretation, semantic mediation, human validation and governance review, and decision-support packaging. Together, these layers transform technical evidence including hydrological models, scenario outputs, and stakeholder inputs into governance-ready knowledge that is traceable, reviewable, and audience-responsive. To support implementation, the framework is complemented by three operational instruments: a decision documentation protocol, a trust–transparency assessment matrix, and a phased implementation roadmap. The paper argues that the central challenge in contemporary water governance is not only uncertainty or analytical complexity, but a crisis of decidability in which knowledge remains immobilized between analysis and action. XAI-Nexus is therefore advanced not as an automated governor, but as accountable decision infrastructure that enables explanation, translation, validation, and documentation. The study contributes a governance-oriented understanding of AI in which transparency and trust are treated as operational capacities essential to resilient and defensible water management.

Keywords: Artificial intelligence; water governance; water management; stakeholder priorities; analytical complexity.

RESUME

L'intelligence artificielle est de plus en plus déployée dans la gouvernance de l'eau pour traiter des informations environnementales complexes, incertaines à échelle multiple. Cependant, la capacité prédictive à elle seule ne garantit pas la pertinence de la gouvernance. Dans la gestion de l'eau, les résultats techniques doivent également être interprétables, communicables, justifiables et, actionnables sur le plan institutionnel, dans des contextes marqués par l'incertitude hydro climatique, les priorités concurrentes des parties prenantes et la responsabilité publique. Cet article relève ce défi en proposant XAI-Nexus, un cadre conceptuel pour relier l'intelligence artificielle explicable, la médiation sémantique et la

1 Ph.D. in Water Resources Engineering, Executive Secretary of ICID IRPID-IRN Email: Behzad.Navidi@gmail.com

2 Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. Email: NargesZohrabi@gmail.com (Corresponding author)

validation humaine dans la gouvernance résistante de l'eau. Le cadre est développé à travers une conception de recherche intégrative et conceptuelle qui s'appuie sur la littérature issue de l'IA explicable, la gouvernance responsable de l'IA, la médiation des grands modèles de langage et de l'aide à la décision axée sur les liens dans le domaine de l'eau. XAI-Nexus est organisé autour de cinq couches interdépendantes : l'apport de preuves, l'interprétation XAI, la médiation sémantique, la validation humaine et l'examen de la gouvernance, ainsi que le packaging d'aide à la décision. Ensemble, ces couches transforment des preuves techniques, y compris des modèles hydrologiques, des résultats de scénarios et des contributions des parties prenantes en connaissances prêtes pour la gouvernance, facile à suivre**,** révisables et adaptées au public. Pour soutenir la mise en œuvre, le cadre est complété par trois instruments opérationnels : un protocole de documentation des décisions, une matrice d'évaluation de la confiance et de la transparence et une feuille de route de mise en œuvre progressive. L'article soutient que le défi majeur de la gouvernance contemporaine de l'eau n'est pas seulement l'incertitude ou la complexité analytique, mais une crise de prise de décision dans laquelle les connaissances restent immobilisées entre analyse et action. XAI-Nexus est donc avancé non pas en tant que système de gouvernance automatisé, mais en tant qu'infrastructure de décision responsable permettant l'explication, la traduction, la validation et la documentation. L'étude apporte une compréhension de l'IA axée sur la gouvernance, dans laquelle la transparence et la confiance sont considérées comme des capacités opérationnelles essentielles à une gestion résistante et justifiable de l'eau.

Mots-clés: Intelligence artificielle; Gouvernance de l'eau; Gestion de l'eau; Priorités des parties prenantes; Complexité analytique.

REMOTE SENSING-BASED ASSESSMENT OF HYDRO-CLIMATIC AND LAND USE CHANGES IN THE KOK RIVER BASIN, NORTHERN THAILAND

ÉVALUATION PAR TÉLÉDÉTECTION DES CHANGEMENTS HYDROCLIMATIQUES ET DES USAGES DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DE KOK, AU NORD DE LA THAÏLANDE

Kaprom C.[1, 2, 3], Suiadee W.[2, 3], Prechawit C.[2, 3], Maneephai S.[2, 3], Kowsuvon N.[2, 3, 4], Suepsahakarn R.[2, 3], Maekan E.[1, 3], Saelo W.[3], Noicharoen T.[3], Kosinyawong R.[3], Siyanan S.[3], Williams J.[1], and Sriwongsitanon N.[1, 2, 4, *]

ABSTRACT

Thailand is increasingly affected by climate change and land use change, which have significantly altered hydrological processes and increased environmental and disaster risks. The Kok River Basin, a transboundary watershed along the Thailand–Myanmar border, has experienced growing climate variability and environmental pressures. This study analyzes spatiotemporal changes in the basin during 1994–2024 by integrating remote sensing data with in-situ observations and applying trend analysis using the Mann–Kendall (MK) test and Sen's slope (SS) estimator. The analysis covers four sub-basins (Sai, Ruak, Kham, and Kok) and key variables including rainfall, streamflow, water quality, land surface temperature (LST), land use change, and fire occurrence. The results indicate a statistically significant increasing trend in land surface temperature, with an overall rise of approximately 0.57–1.05 °C. Land use change analysis shows urban expansion of up to 25%, while agricultural land decreased by 17.9–28.3%, partly due to land conversion, abandonment, and degradation into degraded forest areas. Fire hotspot analysis reveals a slight overall decrease of approximately 2% in annual averages; however, increases are observed in forested (4.9%) and urban (26.7%) areas, indicating shifting fire risk patterns. Rainfall variability has increased, particularly over the last decade, with more frequent extreme wet and dry events based on the Standardized Precipitation Index (SPI). Monthly trend analysis shows a significant decrease in rainfall during May in both the Sai and Ruak sub-basins, suggesting a delayed onset of the rainy season.

The Ruak sub-basin also exhibits decreasing rainfall in July and March, indicating intra-seasonal dry spells and reduced off-season rainfall. Streamflow shows significant decreasing trends, while flood and drought events have become more frequent under increased rainfall variability. Water quality analysis indicates heavy metal contamination, particularly arsenic, with concentrations of 0.027–0.031 mg/L, exceeding national standards and likely associated with upstream mining activities. Overall, the integration of remote sensing and field-based data demonstrates strong capability for monitoring long-term spatiotemporal environmental changes in complex transboundary basins. The findings provide important scientific evidence to support water resources management, disaster risk reduction, and climate change adaptation planning.

Keywords: Remote sensing; Hydro-climatic variability; Land use and land cover (LULC) change; Climate change; Standardized Precipitation Index (SPI); Mann–Kendall (MK) trend test; Sen's slope (SS) estimator; Kok River Basin.

1 Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management (SENSWAT), Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand
2 Thai National Committee on Irrigation and Drainage (THAICID), Bangkok, Thailand
3 Royal Irrigation Department (RID), Bangkok, Thailand
4 Asian Regional Working Group (ASRWG), International Commission on Irrigation and Drainage (ICID)
* Corresponding author : fengnns@ku.ac.th

RESUME

La Thaïlande est de plus en plus touchée par le changement climatique et l'évolution des usages de sol, phénomènes qui ont considérablement modifié les processus hydrologiques et augmenté les risques environnementaux et de catastrophes. Le bassin versant de Kok, un bassin versant transfrontalier, situé le long de la frontier entre la Thaïlande et le Myanmar, connaît une variabilité climatique croissante et subit des pressions environnementales. Cette étude analyse les changements spatio-temporels survenus dans le bassin entre la période 1994–2024 en intégrant les données de télédétection aux observations in situ et en appliquant une analyse des tendances à l'aide du Test de Mann-Kendall (MK) et l'estimateur de la pente de Sen (SS). L'analyse couvre quatre sous-bassins (Sai, Ruak, Kham et Kok) et des variables clés telles que les précipitations, le débit, la qualité de l'eau, la température de surface terrestre (LST), le changement d'usage des sols et la fréquence d'incendies.

Les résultats indiquent une tendance à l'augmentation statistiquement significative de la température de la surface des sols, avec une hausse globale d'environ 0,57–1,05 °C. L'analyse du changement d'usage des sols montre une expansion urbaine allant jusqu'à 25%, tandis que les terres agricoles ont diminué de 17,9–28,3%, en partie en raison de la conversion des terres, l'abandon et la dégradation des zones forestières dégradées. L'analyse des points chauds d'incendie révèle une légère diminution globale d'environ 2% des moyennes annuelles; cependant, des augmentations sont observées dans les zones forestières (4,9%) et urbaines (26,7%), ce qui indique des tendances changeantes en matière de risque d'incendie. La variabilité des précipitations a augmenté, en particulier au cours de la dernière décennie, avec une fréquence accrue des événements extrêmes humides et secs selon l''indice de précipitations normalisé (SPI). L'analyse des tendances mensuelles montre une diminution significative des précipitations en mai dans les sous-bassins de Sai et de Ruak, ce qui suggère un début tardif de la saison des pluies.

Le sous-bassin de Ruak constate également une baisse des précipitations en juillet et mars, indiquant des périodes sèches intra-saisonnières et une réduction des précipitations hors saison. Le débit des cours d'eau montre des tendances significatives à la baisse, tandis que les inondations et les sécheresses sont devenues plus fréquentes en raison de la variabilité accrue des précipitations. L'analyse de la qualité de l'eau indique une contamination par des métaux lourds, en particulier l'arsenic, avec des concentrations de 0,027–0,031 mg/L, dépassant les normes nationales et probablement associées aux activités minières en amont. Dans l'ensemble, l'intégration de la télédétection et des données recueillies sur le terrain montre qu'il est possible de suivre les changements environnementaux spatiotemporels à long terme dans les bassins transfrontaliers complexes. Les résultats fournissent des preuves scientifiques importantes pour soutenir la gestion des ressources en eau, la réduction des risques de catastrophes et la planification de l'adaptation au changement climatique.

Mots-clés : Télédétection; Variabilité hydro-climatique; Changements de l'usage des sols/ de la couverture terrestre (LULC); Changement climatique; Indice de précipitation normalisé (SPI); Test de tendance de Mann-Kendall (MK); Estimateur de la pente de Sen (SS); Bassin versant de Kok.

STUDY ON OPTIMAL ALLOCATION OF WATER-GRAIN SYSTEM IN IRRIGATION AREAS

ÉTUDE SUR L›ALLOCATION OPTIMALE DU SYSTEME EAU-CEREALES DANS LES ZONES D›IRRIGATION

Wei Liu[1], Jinyang Li[2], and Yanyu Lin[3]

ABSTRACT

To address water deficit in irrigation districts and improve the utilization efficiency of water and soil resources, this study takes the Moyiyan Irrigation District in Sichuan Province as a case study and constructs an optimal water resources allocation function with the objectives of minimizing water deficit and maximizing economic benefit. By combining the multi-objective genetic algorithm (NSGA-II) with the entropy-weight TOPSIS evaluation model, this study optimizes water resources and selects preferred schemes under different precipitation guarantee rates. The results show that the optimized schemes save 59.9 × 10^4 m^3 and 512.7 × 10^4 m^3 of water resources in the irrigation district under the 50% and 75% precipitation guarantee rates, respectively; economic benefit increases by 3.83% and 6.92%, respectively, compared with the baseline year; and the proportion of rice planting area is optimized to 57.7% and 48.8%, thereby achieving coordination between resource utilization and economic benefit. This study provides a theoretical basis and practical pathway for regional adaptive management and sustainable agricultural development in irrigation districts.

Keywords: irrigation district; optimal water resources allocation; NSGA-II algorithm; entropy-weight TOPSIS evaluation model; planting structure.

RESUME

Pour remédier au déficit hydrique dans les périmètres irrigués et améliorer l'efficacité de l'utilisation des ressources en eau et en sol, cette étude traite le perimètre irrigué de Moyiyan situé dans la province du Sichuan comme une étude de cas et construit une fonction optimale d'allocation des ressources en eau avec les objectifs de minimiser le déficit en eau et de maximiser les avantages économiques. En combinant l'algorithme génétique multi-objectif (NSGA-II) avec le modèle d'évaluation TOPSIS avec pondération par entropie, cette étude optimise les ressources en eau et sélectionne des projets sous différents taux de garantie de précipitation. Les résultats montrent que les projets optimisés économisent 59,9 × 10^4 m^3 et 512,7 × 10^4 m^3 de ressources en eau dans le perimètre irrigué, dans le cadre de taux de garantie de précipitations de 50% et 75%, respectivement; les avantages économiques augmentent de 3,83% et 6,92%, respectivement, par rapport à l'année de référence; et la proportion de la superficie consacrées à la riziculture est optimisée à 57,7% et 48,8%, assurant ainsi une coordination entre l'utilisation des ressources et les avantages économiques. Cette étude fournit une base théorique et une voie pratique pour la gestion adaptative régionale et le développement agricole durable au sein des périmètres irrigués.

Mots-clés : Périmètre irrigué; Allocation optimale des ressources en eau; Algorithme NSGA-II; Modèle d'évaluation TOPSIS avec pondération par entropie; Structure des cultures.

1 Wei Liu, senior engineer, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, China. Mainly engaged in research on agricultural water resources management.
2 Jinyang Li, postgraduate,China Institute of Water Resources and Hydropower Research,China.
3 Yanyu Lin,Associate Professor, Heilongjiang Bayi Agricultural,University, Daqing, China.

MAPPING SOIL WATER AND CARBON FROM PLOT TO WATERSHED WITH MULTI-SOURCE DATA

CARTOGRAPHIE DE L'EAU DU SOL ET DU CARBONE DE LA PARCELLE AU BASSIN VERSANT AVEC DES DONNÉES PROVENANT DE SOURCES MULTIPLES

Charrière S.[1], Zhao XY.[2], Doussan C.[1], Bérard A.[1], Flamain F.[1], Pouget G.[1], Chapelet A.[1] and Courault D.[1],

ABSTRACT

Perennial Mediterranean crops such as orchards and vineyards display strong variability in water-use and inter-row management. Inter-rows may be left grassed to ease pruning and harvest, or ploughed to reduce competition for water with the trees. Irrigation can be applied via drippers, micro-sprinklers or flooding, each influencing the fate of soil organic carbon (SOC). Assessing SOC variability at regional scales, especially in relation to irrigation practices, remains challenging.

A multi-scale approach was applied in the Ouvèze-Ventoux watershed (southeastern France), where orchards and vineyards dominate. Soil samples from 17 plots (0-30 cm depth) were analyzed for SOC, physico-chemical properties and visible-mid-infrared spectra. Spectral calibration (PLSR or Cubist) yielded a high R^2 (~0.89), enabling the detection of intra-field SOC variations (5-45 g kg^{-1}) across four orchards under contrasting management (grass vs. no-grass; drip-micro-sprinkler vs. no irrigation). An electromagnetic induction (EMI) survey performed on the same fields revealed an emerging correlation between in-phase EMI signal and SOC ($R^2 \approx 0.44$), suggesting EMI could qualitatively map SOC at field scale. Sentinel-2 imagery (using winter scenes with lowest NDVI) also correlated with field-averaged SOC ($R^2 \approx 0.60$), indicating the potential for watershed-wide SOC mapping using satellite data.

Satellite data from Sentinel-1 and 2 were also used to determine soil moisture dynamics using data over four years for five orchards, measuring surface (0-5 cm) and 0-50 cm depth water stock. A random-forest model integrating Sentinel-1 backscatter (VV, VH), Sentinel-2 derived spectral indices (FCOVER, Redness Index), Copernicus Soil Water Index, and local rainfall achieved an overall fit of $R^2 \approx 0.7$ for moisture predictions. The model performance indicates that satellite-based monitoring of field-scale soil moisture is feasible for present and past times. It should be however tested before applying it to other pedoclimatic contexts.

Combining spectrometric SOC estimates, remote-sensing moisture retrievals, and geophysical EMI measurements offers a diachronic framework to interpret SOC evolution alongside water availability and irrigation management across Mediterranean agroecosystems.

Keywords: Perennial Mediterranean crops; irrigation practices; orchards and vineyards; Copernicus Soil Water Index; soil moisture.

RESUME

Les cultures méditerranéennes pérennes telles que les vergers et les vignobles présentent une forte variabilité en matière de l'utilisation de l'eau et la gestion inter-rang. Les inter-rangs peuvent être laissés gazonnés pour faciliter l'élagage et la récolte, ou labourés pour réduire la concurrence pour l'eau avec les arbres. L'irrigation peut être appliquée via des goutteurs, des

1 INRAE-AU, UMR EMMAH, 84000 Avignon, France
2 CSIRO Agr & Food, GPO Box 1700, Canberra, ACT 2601, Australia

micro-asperseurs ou des inondations, chacun influençant le devenir du carbone organique du sol (SOC). L'évaluation de la variabilité du SOC à des échelles régionales, en particulier en ce qui concerne les pratiques d'irrigation, reste difficile.

Une approche à échelle multiple a été mise en œuvre dans le bassin versant de l'Ouvèze-Ventoux (sud-est de la France), où dominent les vergers et les vignobles. Des échantillons de sol provenant de 17 parcelles (profondeur de 0-30 cm) ont été analysés pour déterminer le carbone organique du sol (SOC), les propriétés physico-chimiques et les spectres infrarouges moyens visibles. La calibration spectrale (PLSR ou cubiste) a donné un R^2 élevé (~0,89), permettant la détection de variations du SOC intra-champ (5-45 g kg^{-1}) dans quatre vergers soumis à la gestion contrastée (herbe vs. absence d'herbe; micro-sprinkler goutte-à-goutte vs. absence d'irrigation). Une étude d'interférence électromagnétique (EMI) réalisée sur les mêmes parcelles a révélé une corrélation émergente entre le signal EMI en phase et le carbone organique du sol (SOC) ($R^2 \approx 0,44$), suggérant que l'EMI pourrait permettre une cartographie qualitative du SOC à l'échelle de la parcelle. Les images de Sentinel-2 (utilisant des scènes hivernales avec le plus faible NDVI) ont également montré une corrélation avec la teneur moyenne en SOC sur le terrain ($R^2 \approx 0,60$), ce qui indique la possibilité de cartographier le SOC à l'échelle du bassin versant à l'aide de données satellitaires.

Les données satellitaires de Sentinel-1 et 2 ont également été utilisées pour déterminer la dynamique de l'humidité du sol à l'aide de données recueillies pendant quatre ans sur cinq vergers, mesurant le stock d'eau en surface (0-5 cm) et à une profondeur de 0-50 cm. Un modèle de forêt aléatoire intégrant la rétrodiffusion Sentinel-1 (VV, VH), les indices spectraux dérivés de Sentinel-2 (FCOVER, indice de rougeur), l'indice d'humidité du sol Copernicus et les précipitations locales a atteint un ajustement global de $R^2 \approx 0,7$ pour les prévisions d'humidité. La performance du modèle indique que la surveillance satellitaire de l'humidité du sol à l'échelle de la parcelle est réalisable pour le présent et le passé. Il convient cependant de la tester avant de l'appliquer à d'autres contextes pédoclimatiques.

La liaison des estimations spectrométriques du carbone organique du sol (SOC), des relevés d'humidité par télédétection et des mesures géophysiques d'interférence électromagnétique (EMI) offre un cadre diachronique pour interpréter l'évolution du SOC ainsi que la disponibilité de l'eau et la gestion de l'irrigation dans les agroécosystèmes méditerranéens.

Mots-clés : Cultures méditerranéennes pérennes; Pratiques d'irrigation; Vergers et vignobles; Indice d'humidité du sol Copernicus; Humidité du sol.

A PHYSICS-ML APPROACH FOR RESOLVING MORPHODYNAMIC INSTABILITIES IN HIGHLY REGULATED RIVER BASINS

UNE APPROCHE ALLIANT PHYSIQUE ET APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE POUR RÉSOUDRE LES INSTABILITÉS MORPHODYNAMIQUES DANS LES BASSINS VERSANTS FORTEMENT RÉGULÉS

Sentani[1], S.I. Wahyudi[2], M. Mukhlisin[3] and F.C Boogaard[4]

ABSTRACT

The Tuntang Watershed in Central Java, Indonesia, faces severe socio-ecological crises driven by rapid morphological transformation and anthropogenic land-use changes. Extreme topographic disparities—from steep, highly erodible volcanic headwaters to ultra-low gradient alluvial plains in Demak—create a polarized hazard landscape characterized by massive upstream sediment flux and devastating downstream floods. Concurrently, the governance of Lake Rawa Pening, the basin's primary regulatory node, is paralyzed by entrenched water-use conflicts among state hydroelectric operators, agriculturalists, and riparian communities. To resolve these multidimensional challenges, this research proposes a real-time digital twin framework deployed via the RIVANA cloud platform. This architecture surpasses traditional empirical models by integrating Physics-Informed Machine Learning (PIML). Specifically, it utilizes a Deep Neural Network (DNN) initialized via the empirical Universal Soil Loss Equation $A = R \times K \times LS \times C \times P$ and enhanced with dynamic hydro-meteorological variables to accurately predict suspended sediment, bedload, and deposition rates. Furthermore, the system employs Physics-Informed Neural Networks (PINNs) to solve the coupled 1D and 2D Saint-Venant and Exner equations, strictly enforcing mass and momentum conservation. The PINN models demonstrate extraordinary computational efficiency, generating sub-grid inundation and sediment transport forecasts in 5 to 10 seconds with high accuracy. By encapsulating this advanced predictive engine within a universally accessible Application Programming Interface, the RIVANA framework democratizes hydrological intelligence. This transparency mathematically mediates stakeholder conflicts by replacing subjective demands with objective impact projections. Ultimately, this scalable digital infrastructure provides the rigorous, verifiable metrics necessary to sustain Payment for Environmental Services (PES) paradigms, fostering equitable watershed governance and long-term socio-ecological resilience.

Keywords: multidimensional challenges traditional empirical models; hydrological intelligence; socio-ecological resilience.

RESUME

Le bassin versant de Tuntang, situé au centre de Java en Indonésie, est confronté à de graves crises socio-écologiques provoquées par une transformation morphologique rapide et des changements anthropiques d'usages des sols. Des disparités topographiques extrêmes — des eaux d'amont volcaniques abruptes et très érosives aux plaines alluviales à très faible

1 Universitas Islam Sultan Agung, Civil Engineering, Semarang, Indonesia Email: arisentani@unissula.ac.id
2 Universitras Islam Sultan Agung, Civil Engineering, Semarang, Indonesia Email: wahyudi@unissula.ac.id
3 Politeknik Negeri Semarang, Civil Engineering, Semarang, Indonesia Email: mmukhlis@polines.ac.id
4 Hanze University of Applied Sciences, Civil Engineering, Groningen, Netherlands Email: f.c.boogaard@pl.hanze.nl

pente de Demak — créent un paysage de risque polarisé caractérisé par d'importants flux de sédiments en amont et des inondations dévastatrices en aval. Parallèlement, la gouvernance du lac Rawa Pening, le principal nœud de régulation du bassin, est paralysée par des conflits enracinés sur l'utilisation de l'eau entre les opérateurs hydroélectriques d'État, les agriculteurs et les communautés riveraines. Pour résoudre ces défis multidimensionnels, cette recherche propose un cadre de jumeau numérique en temps réel déployé via la plateforme cloud RIVANA. Cette architecture surpasse les modèles empiriques traditionnels en intégrant l'apprentissage automatique basé sur la physique (PIML). Plus précisément, il utilise un réseau de neurones profonds (DNN) initialisé via l'équation empirique universelle de perte de sol $A = R \times K \times LS \times C \times P$ et amélioré avec des variables hydrométéorologiques dynamiques pour prédire avec précision les sédiments en suspension, le charriage et les taux de dépôt. De plus, le système utilise des réseaux de neurones informés par la physique (PINN) pour résoudre les équations couplées 1D et 2D de Saint-Venant et d'Exner, en appliquant strictement la conservation de la masse et du moment. Les modèles PINN démontrent une efficacité de calcul remarquable, générant des prévisions d'inondation et de transport de sédiments en 5 à 10 secondes avec une grande précision. En intégrant ce moteur prédictif avancé dans une interface de programmation d'application (API) accessible à tous, le cadre RIVANA démocratise l'intelligence hydrologique. Cette transparence permet de résoudre mathématiquement les conflits entre parties prenantes en remplaçant les exigences subjectives par des projections d'impact objectives. En fin de compte, cette infrastructure numérique évolutive fournit les mesures rigoureuses et vérifiables nécessaires pour soutenir les paradigmes de paiement pour services environnementaux (PSE), favorisant une gouvernance équitable des bassins versants et une résistance socio-écologique à long terme.

Mots-clés : Défis multidimensionnels; Modèles empiriques traditionnels; Intelligence hydrologique; Résistance socio-écologique.

REMOTE SENSING OF DRAINED AGRICULTURAL LANDS

TÉLÉDÉTECTION DES TERRES AGRICOLES DRAINÉES

Yuri. G Yanko[1]

ABSTRACT

Data on remote sensing monitoring of drained agricultural lands technical conditions in Leningrad region are presented. Driving factors affecting water-air regime of drained agricultural lands with expired warranty period of drainage systems are ascertained. Remote sensing methods for monitoring of separate elements of drainage systems on agricultural lands are discussed. Remote sensing methodology is recommended.

Keywords: Remote sensing monitoring; drained agricultural lands.

RESUME

L'article présente des données issues de la surveillance par télédétection de l'état technique des terres agricoles drainées dans la région de Leningrad. Il identifie les facteurs déterminants influençant le régime de l'eau et de l'air de ces terres lorsque la période de garantie des systèmes de drainage a expiré. Les méthodes de télédétection pour la surveillance des éléments séparés des systèmes de drainage sur les terres agricoles sont discutées. La méthodologie de télédétection est recommandée.

Mots-clés : Surveillance par télédétection; terres agricoles drainées.

1 Agrophysical Research Institute 195220, Saint-Petersburg 14, Grazhdanskiy pr., Russia, Email: yanko@agrophys.ru

RESEARCH ON TECHNICAL MEASURES AND STRATEGIES FOR IRRIGATION AND DRAINAGE DEVELOPMENT IN THE YELLOW RIVER BASIN UNDER CLIMATE CHANGE

RECHERCHE SUR LES MESURES TECHNIQUES ET LES STRATÉGIES POUR LE DÉVELOPPEMENT DE L'IRRIGATION ET DU DRAINAGE DANS LE BASSIN VERSANT DE JAUNE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Shaoming Peng[1], Xiaoxu Long[2], Suyan Sun[3], Qiubo Song[4], and Yunling Li[5]

ABSTRACT

The Yellow River Basin serves as a key grain-producing area and an ecological barrier in China. Its irrigation and drainage system has long faced structural weaknesses, including aging and dilapidated facilities and poor connectivity between main and on-farm networks. Under climate change, the basin has experienced abrupt drought–flood alternations and increasingly frequent and intense extreme water-related disasters, exposing the system's significant vulnerability and rendering the traditional approach of engineering expansion and extensive management unsustainable. Based on an analysis of temperature increases, precipitation variability, evapotranspiration changes, and recent drought and flood characteristics in the Yellow River Basin, this paper systematically identifies three major challenges: outdated irrigation and drainage infrastructure, disconnection between main and field-level systems, and insufficient capacity to cope with extreme climate events. To address these issues, technical measures and development strategies are proposed from two perspectives—engineering upgrading and digitalization, and institutional safeguards. The findings can provide systematic technical support for enhancing the climate resilience of the irrigation and drainage system in the Yellow River Basin, promoting efficient water resource utilization, and ensuring national food security.

Keywords: Yellow River Basin; climate change; irrigation and drainage; technical measures; standard system.

RESUME

Le bassin versant de Jaune est une zone important clé de production céréalière et une barrière écologique en Chine. Son système d'irrigation et de drainage souffre depuis longtemps de faiblesses structurelles, notamment le vieillissement et la vétusté des installations, ainsi qu'une mauvaise connectivité entre les réseaux principaux et ceux de l'exploitation. Dans le contexte du changement climatique, le bassin a connu de brusques alternances de sécheresse–inondation et des catastrophes hydriques extrêmes de plus en plus fréquentes et intenses, exposant la vulnérabilité importante du système et rendant insoutenable l'approche traditionnelle de l'expansion technique et de la gestion extensive. Sur la base d'une

1 Professor, General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, P. R. China, E-mail: pengshaoming@giwp.org.cn
2 Associate professor, General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, P. R. China, E-mail: longxiaoxu@giwp.org.cn
3 Professor, General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, P. R. China, E-mail: sunsuyan@giwp.org.cn
4 Professor, General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, P. R. China, E-mail: songqiubo@giwp.org.cn
5 Professor, General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, P. R. China, E-mail: liyunling@giwp.org.cn

analyse de la hausse de température, de la variabilité des précipitations, des changements d'évapotranspiration et des caractéristiques récentes de sécheresse et d'inondation dans le bassin versant de Jaune, cet article identifie systématiquement trois défis majeurs : la vétusté des infrastructures d'irrigation et de drainage, le manque de connexion entre les systèmes principaux et ceux des parcelles, et la capacité insuffisante de faire face aux événements climatiques extrêmes. Pour répondre à ces préoccupations, des mesures techniques et des stratégies de développement sont proposées sous deux angles : la modernisation technique et la numérisation, ainsi que les garanties institutionnelles. Les résultats peuvent fournir un soutien technique systématique pour renforcer la résistance climatique du système d'irrigation et de drainage dans le bassin versant de Jaune, promouvoir une utilisation efficace des ressources en eau et assurer la sécurité alimentaire nationale.

Mots-clés : Bassin versant de Jaune; Changement climatique; Irrigation et drainage; Mesures techniques; Système normal.

ASSESSMENT OF BIAS CORRECTION FOR SATELLITE PRECIPITATION IN A MONSOON-INFLUENCED BASIN: PHETCHABURI RIVER BASIN, THAILAND

ÉVALUATION DE LA CORRECTION DU BIAIS DES PRÉCIPITATIONS SATELLITAIRES DANS UN BASSIN INFLUENCÉ PAR LA MOUSSON : BASSIN VERSANT DE PHETCHABURI, THAÏLANDE

Jutithep Vongphet[1], Thirasak Saion[2], Ketvara Sitichok[3] Songsak Puttrawutichai[4], Chaiyapong Thepprasit[5], Polpech Samanmit[6], Bancha Kwanyuen[7] and Sasiwimol Khawkomol[8,*]

ABSTRACT

Satellite precipitation datasets provide important spatial rainfall information for monsoon-influenced basins, particularly in regions with limited rain gauge coverage and complex terrain-related rainfall variability. However, their applications are often constrained by systematic bias and inconsistencies in seasonal and spatial rainfall representation. This study evaluated the effects of rainfall bias correction on the statistical, seasonal, and spatial characteristics of four satellite precipitation datasets (GSMaP, CMORPH, CHIRPS, and PERSIANN-CCS) in the Phetchaburi River Basin, Thailand. Linear Scaling (LS) and Quantile Mapping (QM) were applied using both long-term and monthly parameterization approaches during calibration (2003–2015) and validation (2016–2022) periods. The results demonstrated that bias correction substantially improved the agreement between satellite precipitation datasets and observed rainfall under monsoon conditions. Monthly parameterization generally provided better representation of temporal rainfall variability, wet-season transitions, and monsoon rainfall peaks compared with long-term parameterization. Among the evaluated approaches, monthly Quantile Mapping (QM_M) showed the strongest capability in preserving seasonal rainfall dynamics across different elevation groups. Spatial analysis further indicated that bias correction improved terrain-related rainfall organization and rainfall gradients across the basin. Overall, the findings demonstrate that rainfall bias correction plays an important role in improving the representation of seasonal and spatial rainfall variability under monsoon conditions. The proposed framework provides useful insights for enhancing the application of satellite precipitation datasets in hydrological modeling, flood and drought assessment, and water resources management in regions with limited rain gauge coverage and complex terrain-related rainfall variability.

1 Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng, Kasetsart University, 2 Moo 6 Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom 73140, Thailand; Email: fengjtv@ku.ac.th
2 Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng, Kasetsart University, 2 Moo 6 Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom 73140, Thailand; Email: therasak.s@ku.th
3 Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng, Kasetsart University, 2 Moo 6 Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom 73140, Thailand; Email: fengkrs@ku.ac.th
4 Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng, Kasetsart University, 2 Moo 6 Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom 73140, Thailand; Email: songsak.pu@ku.th
5 Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng, Kasetsart University, 2 Moo 6 Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom 73140, Thailand; Email: fengcpt@ku.ac.th
6 Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng, Kasetsart University, 2 Moo 6 Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom 73140, Thailand; Email: polpech.sa@ku.th
7 Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng, Kasetsart University, 2 Moo 6 Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom 73140, Thailand; Email: fengbak@ku.ac.th
8 Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng, Kasetsart University, 2 Moo 6 Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom 73140, Thailand; Email: fengsmk@ku.ac.th

Keywords: satellite precipitation; rainfall bias correction; rainfall parameterization; monsoon rainfall variability; spatial rainfall structure.

RESUME

L'ensemble de données de précipitations satellitaires fournissent des informations spatiales importantes sur les précipitations concernant les bassins influencés par la mousson, en particulier dans les régions avec une couverture limitée des pluviomètres et une variabilité complexe des précipitations liée au terrain. Cependant, leurs applications sont souvent limitées par un biais systématique et des incohérences dans la représentation saisonnière et spatiale des précipitations. Cette étude a évalué les effets de la correction du biais pluviométrique sur les caractéristiques statistiques, saisonnières et spatiales de quatre ensembles de données de précipitations satellitaires (GSMaP, CMORPH, CHIRPS et PERSIANN-CCS) recueillies dans le bassin versant de Phetchaburi, en Thaïlande. La mise à l'échelle linéaire (LS) et la cartographie quantile (QM) ont été appliqués en utilisant des approches de paramétrage à long terme et mensuelles pendant les périodes d'étalonnage (2003–2015) et de validation (2016–2022). Les résultats ont démontré que la correction du biais a considérablement amélioré l'accord entre les ensembles de données de précipitations satellitaires et les précipitations observées dans des conditions de mousson. Le paramétrage mensuel a généralement fourni une meilleure représentation de la variabilité temporelle des précipitations, des transitions de la saison des pluies et des précipitations maximum de mousson par rapport au paramétrage à long terme. Parmi les approches évaluées, la cartographie quantile mensuelle (QM_M) a montré la plus grande capacité à préserver la dynamique des précipitations saisonnières dans différents types d'altitudes. L'analyse spatiale a en outre indiqué que la correction du biais améliorait l'organisation des précipitations liées au terrain et les gradients de précipitations à l›échelle du bassin. Dans l'ensemble, les résultats démontrent que la correction du biais pluviométrique joue un rôle important dans l'amélioration de la représentation de la variabilité saisonnière et spatiale des précipitations en période de mousson. Le cadre offre des perspectives utiles pour améliorer l'application des ensembles de données de précipitations satellitaires dans la modélisation hydrologique, l'évaluation des inondations et des sécheresses, ainsi que la gestion des ressources en eau dans les régions ayant une couverture limitée des pluviomètres et une variabilité complexe des précipitations liée au terrain.

Mots-clés : Précipitations satellitaires; Correction du biais des précipitations; Paramétrage des précipitations; Variabilité des précipitations de mousson; Structure spatiale des précipitations.

SPATIO-TEMPORAL IRRIGATION DEMAND FORECASTING USING SATELLITE DATA AND MACHINE LEARNING

PREVISION SPATIO-TEMPORELLE DE LA DEMANDE EN EAU D'IRRIGATION À L'AIDE DE DONNÉES SATELLITAIRES ET D'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE

Mohsin Hafeez[1], Hafsa Aeman[1], Umar Liaquat[1], Sarfraz Munir[1], Habibullah Bodla[1], and Aarish Maqsood[1]

ABSTRACT

Accurate and timely forecasting of crop evapotranspiration (ETa) is essential for demand-responsive irrigation management in water-stressed canal irrigation systems. Existing studies on crop water demand rely on biophysical models that use climate, soil, and irrigation data, often assuming fixed water schedules and focusing on broad trends rather than on stage-specific irrigation. While machine learning has been applied, it primarily focuses on yield estimation. Therefore, this study develops a spatio-temporal ETa estimation and irrigation demand forecasting framework that integrates Landsat 8-derived biophysical variables with machine learning and deep learning approaches at the Water Management Research Farm in Okara, Punjab, Pakistan, which is equipped with an eddy covariance flux tower for observed ETa measurements. Landsat Analysis Ready Data (ARD) at 30 m spatial resolution from 2015 to 2025 were processed to extract the historic information of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), Land Surface Temperature (LST), and Net Radiation (Rn) for the machine learning models training. These variables, along with temporal descriptors, served as input features for model training, using an 80:20 patch-based split. The Convolutional Neural Network (CNN) model used in this study achieved the predictive accuracy (R^2 = 0.90, RMSE = 0.21 mm/day, MAE = 0.34 mm/day), outperforming Random Forest - RF (R^2 = 0.87) and XGBoost (R^2 = 0.84), across Kharif and Rabi cropping seasons. Field-scale validation showed CNN's accuracy in ETa estimates within 0.02-0.09 mm/day of eddy covariance flux tower measurements. Weekly cumulative ETa forecasts demonstrated strong agreement with observations (R^2 = 0.94, NSE = 0.87), showing the framework's suitability for operational irrigation scheduling. These findings demonstrate that integrating remote sensing with machine learning offers a scalable, cost-effective approach for irrigation demand management in data-scarce, water-stressed agricultural systems across South Asia.

Keywords: Evapotranspiration; machine learning; CNN; Remote Sensing; Eddy Covariance; Irrigation Demand; Punjab; Pakistan.

RESUME

Une prévision précise et opportune de l'évapotranspiration des cultures (ETa) est essentielle pour une gestion de l'irrigation adaptée à la demande dans les systèmes d'irrigation par canaux soumis à un stress hydrique. Les études existantes sur la demande en eau des cultures s'appuient sur des modèles biophysiques qui utilisent des données climatiques, pédologiques et d'irrigation, en supposant souvent des programmations fixes d'eau et en se concentrant sur les tendances générales plutôt que sur l'irrigation spécifique à chaque étape. Bien que l'apprentissage automatique ait été appliqué dans ce domaine, il se concentre principalement sur l'estimation du rendement. Par conséquent, cette étude développe un cadre d'estimation

1 International Water Management Institute (Iwmi), Lahore, Pakistan

ETa spatio-temporelle et de prévision de la demande en irrigation qui intègre les variables biophysiques issues de Landsat 8 avec des approches d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond au Ferme de recherche sur la gestion de l'eau à Okara, Pendjab, au Pakistan, qui est équipé d'une tour de flux de Covariance de tourbillon (Eddy Covariance) pour les mesures ETa observées. Les données prêtes pour l'analyse Landsat (ARD) ayant une résolution spatiale de 30 m couvrant la période de 2015 à 2025, ont été traitées afin d'extraire les informations historiques de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), de l'indice de végétation ajusté au sol (SAVI), de la température de surface terrestre (LST) et du rayonnement net (Rn) pour l'entraînement des modèles d'apprentissage automatique. Ces variables, ainsi que les descripteurs temporels, ont servi de caractéristiques d'entrée pour l'entraînement du modèle, en utilisant une division 80:20 basée sur une parcelle. Le modèle de réseau de neurones à convolution (CNN) utilisé dans cette étude a atteint la précision prédictive (R^2 = 0,90, RMSE = 0,21 mm/jour, MAE = 0,34 mm/jour), surpassant les modèles tels que la forêt aléatoire - RF (R^2 = 0,87) et XGBoost (R2 = 0,84), à travers les saisons de culture Kharif et Rabi. La validation à l'échelle de la parcelle a montré que la précision de CNN dans les estimations d'ETa se situe entre 0,02 et 0,09 mm/jour pour les mesures de tour de flux de Covariance de tourbillon (Eddy Covariance). Les prévisions hebdomadaires cumulées d'ETa ont montré une forte concordance avec les observations (R^2 = 0,94, NSE = 0,87), montrant l'adéquation du cadre pour la planification opérationnelle de l'irrigation. Ces résultats démontrent que l'intégration de la télédétection à l'apprentissage automatique offre une approche évolutive et rentable pour la gestion de la demande en irrigation dans les systèmes agricoles d'Asie du Sud soumis à un stress hydrique ayant des données rares.

Mots-clés : Évapotranspiration; Apprentissage automatique; CNN; Télédétection; Covariance de tourbillon (Eddy Covariance); Demande en irrigation; Pendjab; Pakistan.

FROM IMT/ PIM TO WATERSHED DECISIONS: A REFRAMING APPROACH TO IRRIGATION GOVERNANCE

DE L'IMT/PIM AUX DÉCISIONS LIÉES AUX BASSINS VERSANTS : UNE APPROCHE DE RECADRAGE DE LA GOUVERNANCE DE L'IRRIGATION

Zahra Soltani*[1] and Narges Zohrabi[2]

ABSTRACT

Despite the relative success of Irrigation Management Transfer (IMT) and Participatory Irrigation Management (PIM) at the scale of irrigation schemes and projects, these approaches have proven inadequate in addressing systemic crises at the river basin scale. Drawing on the concept of reframing, this paper conceptualizes a transition from network-based governance to integrated basin governance. Within this perspective, distributive justice, sustainable development, and intergenerational justice are framed as overarching normative goals. The paper shows how current PIM/IMT practices may face limitations in achieving inclusive participation, and how phenomena such as the rebound effect, in the absence of multilevel governance, can turn gains in water-use efficiency into outcomes that undermine basin sustainability.

Methodologically, the study adopts a conceptual and critical review approach and develops a two-phase reframing of IMT/PIM. The first phase expands assessment at the irrigation-network level through a learning-oriented use of Social Impact Assessment (SIA), while the second phase repositions IMT/PIM within basin-scale, polycentric, and multilevel water governance supported by water social auditing and basin accounting. By critically reviewing international experience and introducing water social auditing and Social Impact Assessment (SIA) as learning-oriented rather than merely procedural tools, the study proposes a new conceptual framework for improving implementation practices and aligning bottom-up and top-down perspectives. It concludes by offering specific policy recommendations to facilitate this transition.

Keywords: reframing, rebound effect, Social Impact Assessment, water social auditing, polycentric governance, intergenerational justice.

RESUME

Malgré le succès relatif du transfert de la gestion de l'irrigation (IMT) et de la gestion participative de l'irrigation (PIM) à l'échelle des périmètres irrigués et des projets d'irrigation, ces approches se sont révélées inadéquates pour répondre aux crises systémiques à l'échelle du bassin versant. En s'appuyant sur le concept de recadrage, cet article conceptualise une transition d'une gouvernance basée sur les réseaux à une gouvernance intégrée du bassin. Dans cette perspective, la justice distributive**,** le développement durable et la justice intergénérationnelle sont présentés comme des objectifs normatifs primordiaux. Le document montre comment les pratiques actuelles de PIM/IMT peuvent rencontrer des limites dans la réalisation d'une participation inclusive, et comment des phénomènes tels que l'effet de rebond, en l'absence de gouvernance à plusieurs niveaux, peuvent transformer les gains d'efficacité de l'utilisation de l'eau en résultats compromettant la durabilité du bassin.

[1*] Secretary of Social Affairs and Public Participation, Iran Water Resources Management Company, Tehran, Iran, Email: zara.soltani@ut.ac.ir, zrsoltani@gmail.com(Corresponding author)

[2] Associate Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, Email: narges.zohrabi@iau.ac.ir, nargezohrabi@gmail.com

Sur le plan méthodologique, l'étude adopte une approche de revue conceptuelle et critique et développe un recadrage en deux phases des IMT/PIM. La première phase étend l'évaluation au niveau du réseau d'irrigation grâce à une utilisation orientée vers l'apprentissage de l'évaluation de l'impact social (SIA), tandis que la deuxième phase repositionne l'IMT/PIM dans une gouvernance de l'eau à l'échelle du bassin, polycentrique et à plusieurs niveaux, soutenue par l'audit social de l'eau et la comptabilité des bassins. En examinant de manière critique l'expérience internationale et en introduisant l'audit social de l'eau et l'évaluation d'impact social (SIA) comme des outils axés sur l'apprentissage plutôt que simplement procéduraux, l'étude propose un nouveau cadre conceptuel pour améliorer les pratiques de mise en œuvre et aligner les perspectives ascendantes et descendantes. Elle conclut en proposant des recommandations politiques spécifiques pour faciliter cette transition.

Mots-clés : Recadrage; Effet de rebond; Evaluation d'impact social; Audit social de l'eau; Gouvernance polycentrique; Justice intergénérationnelle.

SYNERGISTIC WATER-ENERGY MANAGEMENT: PHOTOVOLTAIC CANAL COVERS FOR CLIMATE RESILIENCE IN ARID REGIONS

GESTION SYNERGIQUE EAU-ÉNERGIE : COUVERTURES PHOTOVOLTAÏQUES DE CANAUX POUR LA RÉSISTANCE CLIMATIQUE DANS LES RÉGIONS ARIDES

Milad Rezaei[1], and Mohammad Javad Monem[2]

ABSTRACT

Arid and semi-arid regions, such as Iran, face serious water resource management challenges exacerbated by climate change, which threaten agricultural resilience. Evaporation loss from open irrigation canals is a primary cause of water depletion. This research evaluates an innovative, dual-purpose technology of covering irrigation canals with photovoltaic (PV) systems, which simultaneously generates renewable energy and reduces evaporation losses. The primary objective is to quantify the synergistic benefits of this system and present a justifiable and scalable economic model for the sustainability of irrigation infrastructure. This case study focuses on a 500-square-meter section of the right bank canal of the Nowruzlu Diversion Dam in Miandoab. The methodology involves utilizing Meteonorm software to extract climate data and verify the temperature increase trend, and PVsyst software to simulate system performance and determine the optimal panel tilt angle, alongside a comprehensive economic analysis based on the tariffs of the year 1404. Findings indicate that the optimal tilt angle of 37 degrees, resulting in 67% coverage of the canal surface, can generate approximately 131 MWh of electricity annually. Concurrently, the shading effect of the panels reduces evaporation by up to 55%, equivalent to an annual water saving of 257.3 cubic meters. Economic analysis reveals that with an initial investment of 25 billion Rials, the combined revenue from electricity sales and water savings yields a net annual profit of 2.346 billion Rials, resulting in a payback period of 10.66 years. Assuming a useful life of 25 years, the annual return on investment (ROI) is estimated at 9.4%. Ultimately, this strategic solution transforms water conveyance canals into dynamic assets and strengthens the Water-Energy Nexus, serving as a replicable model for policymakers to achieve Sustainable Development Goals.

Keywords: Irrigation canal, Photovoltaic systems, Solar energy, Sustainable development, Reducing water evaporation losses, Water-energy nexus.

RESUME

Les régions arides et semi-arides, comme l'Iran, sont confrontées à des défis majeurs en matière de gestion des ressources en eau, exacerbés par le changement climatique, qui menacent la résistance agricole. La perte par évaporation au niveau des canaux d'irrigation à ciel ouvert est une cause principale de l'épuisement de l'eau. Cette recherche évalue une technologie innovante à double usage de couverture des canaux d'irrigation avec des systèmes photovoltaïques (PV), permettant simultanément de produire l'énergie renouvelable et de réduire les pertes par évaporation. L'objectif principal est de quantifier les avantages synergiques de ce système et de présenter un modèle économique justifiable et évolutif pour la durabilité des infrastructures d'irrigation. Cette étude de cas se concentre sur une section de 500 mètres carrés du canal de la rive droite du barrage de dérivation de Nowruzlu

1 Ph.D. Candidate, Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran Email: milad_rezaei@modares.ac.ir

2 Professor, Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Email: monem_mj@modares.ac.ir

à Miandoab. La méthodologie implique l'utilisation du logiciel Meteonorm pour extraire les données climatiques et vérifier la tendance de la hausse des températures, et le logiciel PVsyst pour simuler les performances du système et déterminer l'angle d'inclinaison optimal du panneau. Les résultats indiquent que l'angle d'inclinaison optimal de 37 degrés, qui permet une couverture de 67% de la surface du canal, peut générer environ 131 MWh d'électricité par an. Simultanément, l'effet d'ombrage des panneaux réduit l'évaporation jusqu'à 55%, ce qui équivaut à une économie d'eau annuelle de 257,3 mètres cubes. L'analyse économique révèle qu'avec un investissement initial de 25 milliards de rials, le revenu combiné issus des ventes d'électricité et des économies d'eau produit un bénéfice annuel net de 2,346 milliards de rials, ce qui donne une période de retour de 10,66 ans. En supposant une durée de vie utile étant 25 ans, le retour sur investissement annuel (ROI) est estimé à 9,4%. En fin de compte, cette solution stratégique transforme les canaux de transport d'eau en actifs dynamiques et renforce le lien entre eau-énergie, constituant un modèle qui peut être reproduit pour les décideurs politiques afin d'atteindre les objectifs de développement durable.

Mots-clés : Canal d'irrigation; Systèmes photovoltaïques; Énergie solaire; Développement durable; Réduction des pertes d'eau par évaporation; Liens entre eau-énergie.

LEVERAGING ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND DATA GOVERNANCE FOR RESILIENT AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT: THE SAUDI ARABIAN EXPERIENCE

OPTIMISER L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET LA GOUVERNANCE DES DONNÉES POUR UNE GESTION RÉSISTANTE DE L'EAU AGRICOLE : L'EXPÉRIENCE DE L'ARABIE SAOUDIENNE

Mohammad. Alomair[1]

ABSTRACT

In an era defined by acute water scarcity and the intensifying impacts of climate change, sustainable water management has become a critical pillar for agricultural resilience. Saudi Arabia, facing significant challenges in its semi-arid environment where agriculture accounts for the largest share of water consumption, has embarked on a transformative journey led by the Saudi Irrigation Organization (SIO). This journey aims to redefine irrigation practices through technological innovation and data-driven governance, aligning directly with Saudi Vision 2030 and the national data strategy. This paper explores the strategic integration of Artificial Intelligence (AI), advanced analytics, and robust data management frameworks to optimize water use efficiency and ensure long-term water security. The methodology centres on a comprehensive structural reform that transitioned from project-based management to a unified national entity responsible for irrigation, dams, and treated sewage effluent (TSE). A key milestone was the establishment of a dedicated Data Management Office (DMO) in 2022, mandated to ensure compliance with Saudi Data and AI Authority (SDAIA) standards. Central to this approach is the creation of a National Irrigation Database (NIDB), which serves as a centralised single source of truth for water resource planning. Several flagship initiatives operationalize this data foundation, foremost among them the Irrigation Calculator—a smart platform designed to calculate precise crop water requirements for 896 different crop types across 29 cities. The paper further details a centralised Business Intelligence (BI) platform, AI-driven anomaly detection for TSE reuse and dam safety, satellite-based consumption monitoring, and collaborative predictive modelling with KAUST. Findings demonstrate that this successful transition to smart irrigation is not merely a technological achievement but a governance-driven outcome. The study concludes by proposing a GCC-wide collaboration framework for data interoperability, offering a scalable model for other arid regions seeking to harmonise technological innovation with sustainable agricultural policy.

Keywords: irrigation practices; technological innovation; water resource planning; crop water requirements; sustainable agricultural policy.

RESUME

Dans une époque caractérisée par une grave pénurie d'eau et l'intensification des impacts du changement climatique, la gestion durable de l'eau est devenue essentiel pour la résistance agricole. L'Arabie saoudite, confrontée à des défis importants dans son environnement semi-aride où l'agriculture consomme la grande partie de l'eau, a entrepris une transformation profonde menée par l'Organisation saoudienne de l'irrigation (SIO). Cette transformation vise à redéfinir les pratiques d'irrigation grâce à l'innovation technologique et à la gouvernance axée sur les données, en s'alignant directement sur la Vision saoudienne 2030 et la stratégie nationale des données. Ce document explore l'intégration stratégique de l'intelligence artificielle (IA), des analyses avancées et des cadres robustes de gestion des données afin

1 Saudi Irrigation Organization KSA. Email: maomair@hotmail.com , ma.alomair@sio.gov.sa

d'optimiser l'efficacité de l'utilisation de l'eau et d'assurer la sécurité hydrique à long terme. La méthodologie repose sur une réforme structurelle globale permettant de passer d'une gestion par projet à une entité nationale unifiée responsable de l'irrigation, des barrages et des eaux usées traités (TSE). Une étape clé était la mise en place d'un bureau dédié à la gestion des données (DMO), en 2022, chargé d'assurer la conformité aux normes de l'Autorité saoudienne des données et de l'intelligence artificielle (SDAIA). Au cœur de cette approche se trouve la création d'une base de données nationale sur l'irrigation (NIDB), qui sert de source unique et centralisée de vérité pour la planification des ressources en eau. Plusieurs initiatives phares concrétisent cette base de données, au premier rang desquelles se trouve la calculatrice d'irrigation — une plateforme intelligente conçue pour calculer avec précision les besoins en eau des cultures pour 896 types de culture différents répartis dans 29 villes. Le document détaille davantage la plateforme d'intelligence d'affaires (BI) centralisée, le système de la détection des anomalies pilotée par l'IA pour la réutilisation des eaux usées traités (TSE) et la sécurité des barrages, la surveillance de la consommation par satellite et la modélisation prédictive collaborative avec KAUST. Les résultats démontrent que cette transition réussie vers l'irrigation intelligente ne constitue pas seulement une réussite technologique, mais un résultat axé sur la gouvernance. L'étude conclut en proposant un cadre de collaboration à l'échelle du Conseil de coopération du Golfe (CCG) pour l'interopérabilité des données, offrant un modèle évolutif pour d'autres régions arides cherchant à harmoniser l'innovation technologique avec une politique agricole durable.

Mots-clés : Pratiques d'irrigation; Innovation technologique; Planification des ressources en eau; Besoins en eau des cultures; Politique agricole durable.

AGRICULTURE AS A SOCIAL SECURITY MODEL: IMPLICATIONS FOR FOOD SECURITY AND LIVELIHOODS IN ZIMBABWE'S CHIVI DISTRICT OF MASVINGO PROVINCE

L'AGRICULTURE IRRIGUÉE COMME MODÈLE DE SÉCURITÉ SOCIALE : IMPLICATIONS POUR LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE ET LES MOYENS DE SUBSISTANCE DANS LE PERIMETRE DE CHIVI (PROVINCE DE MASVINGO), AU ZIMBABWE

Bezzel Chitsungo[1]

ABSTRACT

Food insecurity is still a serious development challenge across semi-arid rural Zimbabwe, compounded by repeated droughts, precarious livelihoods, and weak formal social protection. This study investigates if smallholder irrigated agriculture is an informal social security mechanism in Chivi District, Masvingo Province. Applying a convergent parallel mixed-methods case study design, this paper takes the shape of questionnaires of 230 purposively selected households (150 irrigator and 80 non-irrigator households) along with the interviews of 19 key informants. The data are descriptive rather than statistically generalisable. Within these constraints, irrigation access was linked with enhanced results for the 4 pillars of food security, availability, access, utilisation, and stability. Irrigating households presented safer year-round food provisioning, varied diets, and reported income received from produce sales, which were used towards food purchases, healthcare, and education, as well as lower reliance on food aid. The study argues that smallholder irrigation functioned as a type of "agriculturally embedded social security" in this context in terms of smoothing income and buffering climatic risk. It therefore aims to promote better inclusion of irrigation as part of Zimbabwe's social protection framework with specific policy, credit, and institutional support. The results are topical to Zimbabwe's aspirations for SDG 2 and Agenda 2063. Keywords: Irrigated agriculture; Social Security; Food Security; Livelihoods; Chivi District; Zimbabwe; Smallholder Irrigation; Dryland Agriculture; Adaptation to Climate.

Keywords: Irrigated agriculture; Social Security; Food Security; Livelihoods; Chivi District; Zimbabwe; Smallholder Irrigation; Dryland Agriculture; Adaptation to Climate.

RESUME

L'insécurité alimentaire reste un sérieux problème en ce qui concerne le développement des zones rurales semi-arides au Zimbabwe, aggravé par des sécheresses répétées, des moyens de subsistance précaires et une protection sociale formelle faible. Cette étude examine si la petite exploitation agricole irriguée est un mécanisme informel de sécurité sociale dans le périmètre de Chivi, province de Masvingo. En appliquant une conception du plan d'étude de cas parallèle et convergent à méthodes mixtes, cet article prend la forme de questionnaires auprès de 230 ménages sélectionnés à dessein (150 ménages irrigants et 80 ménages non irrigants) ainsi que d'entretiens avec 19 informateurs clés. Les données sont descriptives plutôt que statistiquement généralisables. Dans le cadre de ces contraintes, l'accès à l'irrigation a été associé à des résultats améliorés des quatre piliers notamment, la sécurité alimentaire, la disponibilité, l'accès, l'utilisation et la stabilité. Les ménages irrigués ont bénéficié d'un approvisionnement alimentaire plus sûr tout au long de l'année, des régimes alimentaires

1 [Department of Soil Conservation, Ministry of Lands, Agriculture, Fisheries, Water and Rural Development, Zimbabwe Email: bchitsungo@agric.gov.zw]

variés et des revenus déclarés provenant de la vente de produits agricoles, qui ont été utilisés pour l'achat de nourriture, les soins de santé et l'éducation, ainsi qu'une dépendance limitée sur l'aide alimentaire. L'étude constate que l'irrigation pratiquée par les petits exploitants fonctionnait comme un type de «sécurité sociale intégrée à l'agriculture» dans ce contexte en termes de lissage des revenus et d'atténuation du risque climatique. Elle vise donc à promouvoir une meilleure intégration de l'irrigation dans le cadre de la protection sociale du Zimbabwe grâce à un soutien politique, financier et institutionnel spécifique. Les résultats concernent les aspirations du Zimbabwe pour l'ODD 2 et l'Agenda 2063.

Mots-clés : Agriculture irriguée; Sécurité sociale; Sécurité alimentaire; Moyens de subsistance; Périmètre de Chivi; Zimbabwe; Irrigation par les petits exploitants; Agriculture en zone aride; Adaptation au climat.

ENHANCING MULTI-DURATION EXTREME RAINFALL CHARACTERIZATION THROUGH BIVARIATE REGIONAL FREQUENCY ANALYSIS: INTEGRATING R-LARGEST AND ANNUAL MAXIMA

AMÉLIORER LA CARACTÉRISATION DES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES À DURÉES MULTIPLES GRÂCE À UNE ANALYSE BIDIMENSIONNELLE DE LA FRÉQUENCE RÉGIONALE BIVARIÉE: INTÉGRATION DES MAXIMA R-LES PLUS GRANDS ET ANNUELS

Adisa Hammed Akinsoji[1] and Kyung Sook Choi[2]

ABSTRACT

Intensifying extreme rainfall events under a changing climate necessitate improved frequency analysis methods for flood risk assessment and hydrological design. This study develops a comprehensive bivariate regional frequency analysis (BRFA) framework jointly modeling rainfall volume and mean intensity for 6-hour and 12-hour durations across South Korea. Independent storm events were extracted from 41 years (1984–2024) of hourly precipitation data at 61 Korea Meteorological Administration ASOS stations using the Inter-Event Time Definition (IETD) methodology, incorporating both annual maxima and r-largest peak-over-threshold events to enhance sample size and capture extreme event characteristics. K-means clustering applied to multivariate summary statistics delineated six homogeneous regions, validated through bivariate L-comoment heterogeneity measures and refined by simulated annealing optimization. Combined descriptive–predictive ranking selected the optimal marginal distributions among Gumbel, Generalized Normal, Generalized Extreme Value, Pearson Type III, Weibull, Exponential, and Generalized Pareto candidates, while copula selection evaluated eight families using maximum likelihood estimation and information criteria. Design quantiles were estimated via Monte Carlo simulation for return periods T = 2–200 years and validated against empirical Cunnane plotting positions; 1,000 bootstrap iterations provided 90 % confidence intervals quantifying parametric uncertainty. Regional spatial patterns reveal distinct hydroclimatic characteristics: orographic enhancement on the Taebaek east coast, intensification effects in the Seoul metropolitan corridor, and maritime moderation along the southern coast. Comparison with current Korean Design Standard (KDS) values indicates substantial regional heterogeneity at the 100-year return period, with several regions exceeding the published KDS midpoint by 18–66 % and others falling within or slightly below the KDS band, depending on duration. The framework is directly applicable to the design of agricultural drainage and irrigation infrastructure, providing region-specific bivariate design rainfall pairs (volume and intensity) that univariate intensity–duration–frequency curves cannot provide.

Keywords: bivariate regional frequency analysis; copula; L-moments; r-largest; design rainfall; agricultural drainage; South Korea.

RESUME

L'intensification des événements de précipitations extrêmes dans le contexte du changement climatique exige une amélioration des méthodes d'analyse de fréquence pour l'évaluation des risques d'inondation et la conception hydrologique. Cette étude développe un cadre complet

1 Department of Agricultural Civil Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, South Korea, adisaakinsoji@gmail.com

2 Institute of Agricultural Science & Technology, Kyungpook National University, Daegu 41566, South Korea, *Corresponding author: Kyung Sook Choi Email addresses: ks.choi@knu.ac.kr

d'analyse de fréquence régionale bivariée (BRFA) modélisant conjointement le volume et l'intensité moyenne des précipitations pour des durées de 6 heures et 12 heures à travers la Corée du Sud. Les événements de tempête indépendants ont été extraits à partir de 41 années (1984–2024) de données horaires de précipitations dans 61 stations ASOS de l'Administration météorologique de la Corée, en utilisant la méthodologie Inter-Event Time Definition (IETD), intégrant à la fois les maxima annuels et r-les événements de pointe au-dessus du seuil les plus importants afin d'améliorer la taille de l'échantillon et de capturer les caractéristiques des événements extrêmes. Le clustering K-moyens appliqué à des statistiques récapitulatives multivariées a délimité six régions homogènes, validé par des mesures d'hétérogénéité L-comoments bivariées et affiné par une optimisation de recuit simulée. Le classement combiné descriptif–prédictif a sélectionné les distributions marginales optimales parmi les candidats Gumbel, Normal généralisé, Valeur extrême généralisée, Pearson Type III, Weibull, Exponentielle et Pareto généralisé. Alors que la sélection de copules a évalué huit familles en utilisant l'estimation du maximum de vraisemblance et des critères d'information. Les quantiles de conception ont été estimés via la simulation Monte Carlo pour des périodes de retour T = 2–200 ans et validés par rapport aux positions empiriques de tracé de Cunnane ; 1 000 itérations bootstrap ont fourni des intervalles de confiance à 90% quantifiant l'incertitude paramétrique. Les modèles spatiaux régionaux révèlent des caractéristiques hydroclimatiques distinctes : amélioration orographique sur la côte orientale du Taebaek, effets d'intensification dans le corridor métropolitain de Séoul et modération maritime tout au long de la côte sud. La comparaison avec les valeurs actuelles de la norme coréenne de conception (KDS) indique une hétérogénéité régionale substantielle sur la période de retour à 100 ans, plusieurs régions dépassant le point médian publié par KDS de 18-66% et d'autres se situant dans ou légèrement en dessous de la bande KDS, selon la durée. Le cadre est directement applicable à la conception d'infrastructures de drainage et d'irrigation agricoles, fournissant des paires de précipitations théoriques bivariées spécifiques à une région (volume et intensité) que les courbes de fréquence-durée-d'intensité univariées (KDS) ne peuvent pas fournir.

Mots clés : Analyse de fréquence régionale bivariée; Copule; L- moments; r-plus grand; précipitation théorique; Drainage agricole; Corée du Sud.

ESTIMATING IRRIGATION DEMAND AT TERRITORIAL SCALE: AN OPEN-DATA BASED APPROACH

ESTIMATION DE LA DEMANDE EN EAU IRRIGATION A L'ECHELLE TERRITORIALE: UNE APPROCHE BASEE SUR DES DONNEES OUVERTES

P. Rouault[1], D. Dorchies[1], C. Richert[2], and G. Belaud[1]

ABSTRACT

Against the backdrop of climate change, the agricultural sector is facing a significant squeeze between dwindling resources and increasing crop requirements. To make the best possible use of increasingly scarce water resources, changes in agricultural practices must be implemented. However, to have a significant impact, these practices must be considered at a regional level. However, in order to make these decisions and assess in advance the impact of a change in practice on consumption, it is necessary to rely on quantitative simulations. These simulations require taking into account numerous factors specific to the region, such as soil characteristics, crop types and climatic conditions. This study illustrates the method on a territory with lavender cultivation in the south of France. This crop is increasingly irrigated. This study uses CAWET (Calculation of Agricultural Water needs and Evapotranspiration) to model a territory with and without irrigation water to meet the needs of lavender. This tool enables the collection of agro-pedo-climatic data and the simulation of crops' irrigation water requirements. This comparison, with the generation of graphs and maps, makes it easy to visualise the significance of the decision to irrigate this crop.

Keywords: climate change; soil characteristics; crop types; climatic conditions; agricultural Water needs; Evapotranspiration.

RESUME

Dans le contexte du changement climatique, le secteur agricole fait face à une pression importante qui existe entre la diminution des ressources et l'augmentation des besoins en cultures. Pour optimiser l'usage s ressources en eau de plus en plus rares, il est constaté de modifier les pratiques agricoles. Cependant, pour avoir un impact significatif, ces pratiques doivent être considérées au niveau régional. Cependant, afin de prendre ces décisions et d'évaluer à l'avance l'impact d'un changement de pratique sur la consommation, il est nécessaire de s'appuyer sur des simulations quantitatives. Ces simulations nécessitent de prendre en compte de nombreux facteurs spécifiques à la région, tels que les caractéristiques des sols, les types de cultures et les conditions climatiques. Cette étude illustre la méthode appliquée sur un territoire consacrée à la culture de lavande au sud de la France, une culture de plus en plus irriguée. Cette étude utilise le CAWET (Calculation of Agricultural Water needs and Evapotranspiration) pour modéliser le territoire dans le cadre de deux scénarios : avec et sans eau d'irrigation afin de répondre aux besoins en lavande. Cet outil permet de recueillir des données agro-pédoclimatiques et de simuler les besoins en eau d'irrigation des cultures. Cette comparaison, avec la génération de graphiques et de cartes, permet de visualiser facilement l'importance de prise de décision d'irriguer cette culture.

Mots-clés: Changement climatique; Caractéristiques des sols; Types de cultures; Conditions climatiques; Besoins en eau agricole; Evapotranspiration.

1 UMR G-Eau, Univ. Montpellier, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France

2 UMR MIA Paris-Saclay, Université Paris-Saclay, AgroParisTech, Palaiseau, France

WATER METERING INSTITUTIONS, SCARCITY SIGNALS, AND IRRIGATION EFFICIENCY: ECONOMIC IMPLICATIONS FOR WATER PRODUCTIVITY IN SOUTH AFRICA

INSTITUTIONS DE COMPTAGE D'EAU, SIGNAUX DE RARETÉ ET EFFICACITÉ DE L'IRRIGATION : IMPLICATIONS ÉCONOMIQUES POUR LA PRODUCTIVITÉ DE L'EAU EN AFRIQUE DU SUD

Grové B.[1], Strydom J.D.[2] and Matthews N.[3]

ABSTRACT

Water scarcity in South Africa requires irrigation water to be used productively and economically efficiently. Recent legislation requires irrigation water abstractions to be measured and reported, but water user associations can transmit this measurement requirement through different metering institutions. This paper investigates how direct volumetric metering and indirect area-based metering affect irrigation behaviour, water productivity and the economic value of improved irrigation application uniformity. A nonlinear mathematical programming model is developed to optimise irrigation scheduling and crop allocation under water quota constraints for a 30.1 ha centre pivot. Crop responses to water stress are represented using FAO 56 soil water balance calculations, FAO 66 normalised water productivity principles and an AquaCrop-consistent biomass and harvest-index framework. Application efficiency is represented with different Christiansen uniformity levels by using multiple water budgets to capture distributional losses. The results show that metering institutions change how scarcity signals enter the farm objective function. Under indirect area-based metering, water charges are linked to crop area and estimated crop water requirements rather than measured abstraction. The marginal cost of an additional millimetre of water is therefore weak, and irrigators mainly respond to quota reductions by reducing irrigated area. Under direct volumetric metering, the water constraint is enforceable at the level of actual abstraction and the shadow value of water becomes explicit. Irrigators then use deficit irrigation and retain more irrigated area, improving water productivity and reducing income losses. The findings show that improved irrigation technology alone is insufficient to improve water productivity unless institutions effectively transmit water scarcity to irrigators.

Keywords: Water scarcity; mathematical programming; crop water requirements; income losses; water productivity.

RESUME

En raison de la rareté de l'eau en Afrique du Sud, il devient nécessaire d'utiliser l'eau d'irrigation de manière productive et économique. La législation récente exige que les prélèvements d'eau d'irrigation soient mesurés et déclarés, mais les associations d'usagers de l'eau peuvent transmettre cette exigence de mesure par le biais de différentes institutions de comptage. Cet article examine la manière dont le comptage volumétrique direct et le comptage indirect basé sur la surface affectent le comportement d'irrigation, la productivité de l'eau et la valeur économique de l'amélioration de l'uniformité des applications d'irrigation. Un modèle de programmation mathématique non linéaire est développé pour optimiser la programmation de

1 Department of Agricultural Economics, University of the Free State, Bloemfontein, South Africa Email: groveb@ufs.ac.za
2 Dept. of Agrl. Economics, University of the Free State, Bloemfontein, South Africa, Email: jandanielstrydom11@gmail.com
3 Department of Agricultural Economics, University of the Free State, Bloemfontein, South Africa, Email: matthewsn@ufs.ac.za

l'irrigation et l'allocation des cultures sous contraintes de quotas d'eau pour un pivot central de 30,1 ha. Les réponses des cultures au stress hydrique sont représentées à l'aide des calculs de bilan hydrique du sol FAO 56, des principes de productivité hydrique normalisée FAO 66 et d'un cadre d'indice de biomasse et de récolte cohérent avec AquaCrop. L'efficacité de l'application est représentée avec différents niveaux d'uniformité de Christiansen en utilisant plusieurs bilans hydriques pour prendre en compte les pertes de distribution. Les résultats montrent que les institutions de comptage modifient la façon dont les signaux de rareté entrent dans la fonction d'objectif de la ferme. Dans le cadre du comptage indirect basé sur la surface, les taxes d'eau sont liées à la superficie cultivée et aux besoins en eau estimés des cultures plutôt qu'au prélèvement mesuré. Le coût marginal d'un millimètre supplémentaire d'eau est donc faible, et les irrigants répondent principalement aux réductions de quotas en réduisant la superficie irriguée. Dans le cadre du comptage volumétrique direct, la contrainte de l'eau est applicable au niveau de prélèvement réel et la valeur d'ombre de l'eau devient explicite. Les irrigants utilisent alors l'irrigation déficitaire et conservent davantage de superficie irriguée, ce qui améliore la productivité de l'eau et réduit les pertes de revenus. Les résultats montrent que l'amélioration de la technologie d'irrigation ne suffit pas à elle seule pour améliorer la productivité de l'eau, à moins que les institutions ne transmettent efficacement la rareté de l'eau aux irrigants.

Mots-clés : Rareté de l'eau; Programmation mathématique; Besoins en eau des cultures; Pertes de revenus; Productivité de l'eau.

SMART IRRIGATION AND DRAINAGE SYSTEM TO ENHANCE THE NORDIC AGRICULTURE RESILIENCE UNDER CLIMATE CHANGE

SYSTÈME INTELLIGENT D'IRRIGATION ET DE DRAINAGE P OUR AMÉLIORER LA RÉSISTANCE DE L'AGRICULTURE NORDIQUE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Alireza Gohari[1], Mojtaba Saboori[2], Minna Mäkelä[3], Olle Häggblom[4], and Ali Torabi Haghighi[5]

ABSTRACT

Climate change is intensifying summer droughts in traditionally rainfed boreal agricultural regions, creating water management challenges that existing frameworks. In such landscapes, extensive subsurface drainage infrastructure designed to remove excess water during wet periods can be strategically repurposed by integrating rainwater harvesting reservoirs, creating dual-purpose irrigation-drainage systems that enhance agricultural resilience without requiring new water source development. This study develops a spatially explicit optimization framework for sizing integrated reservoir systems across the Temmesjoki River Basin in Northern Finland, using 43 years of daily gridded climate data (1981–2023) and crop-specific water requirements for potato cultivation. A daily water balance model was applied to determine minimum reservoir capacities satisfying three agronomically grounded reliability thresholds: zero, ≤5, and ≤7 consecutive deficit days. Results show that basin-mean optimized capacities range from 757 to 863 $m^3\ ha^{-1}$ across the three scenarios, with the ≤5 to ≤7 consecutive deficit day window offering the most cost-effective design standard given potato crop physiology. A consistent north–south gradient in required storage reflects underlying climatic heterogeneity, reinforcing the need for spatially differentiated rather than uniform infrastructure standards. Temporal analysis reveals a pronounced upward trend in required capacity over the most recent decade, indicating that water balance conditions are actively shifting rather than fluctuating around a stable mean. These findings provide agricultural planners and policymakers with a quantitative framework for transforming existing drainage networks into climate-resilient irrigation infrastructure across boreal agricultural regions.

Keywords: Smart irrigation and drainage system; rainwater harvesting reservoirs; infrastructure standards; Temporal analysis; water balance.

RESUME

Le changement climatique accentue de plus les sécheresses estivales des régions agricoles boréales traditionnellement pluviales, créant des défis de gestion de l'eau qui dépassent les cadres existants. Dans de tels paysages, de vastes infrastructures de drainage souterrain conçues pour éliminer l'eau excédentaire pendant les périodes humides peuvent être stratégiquement réutilisées grâce à l'intégration des réservoirs de collecte des eaux de pluie, en créant ainsi un système mixte irrigation-drainage qui améliorent la résistance agricole sans l'exigence du développement de nouvelles sources d'eau. Cette étude développe un

1 Institute, Water, Energy, and Environmental Engineering (WE3) research unit, University of Oulu, Finland, Email: Alireza.Gohari@oulu.fi
2 Institute, Water, Energy, and Environmental Engineering (WE3) research unit, University of Oulu, Finland. Email: Mojtaba.Saboori@oulu.fi
3 Institute, Finnish Field Drainage Association, Helsinki, Finland. minna.makela@salaojayhdistys.fi
4 Institute, Finnish Field Drainage Association, Helsinki, Finland, Email: second.author@example.com
5 Institute, Water, Energy, and Environmental Engineering (WE3) Research Unit, University of Oulu, Finland. Email: Ali.TorabiHaghighi@oulu.fi

cadre d'optimisation spatialement explicite pour juger des systèmes de réservoirs intégrés à travers le bassin versant de Temmesjoki en Finlande du Nord, en utilisant 43 années de données climatiques quotidiennes maillées (1981–2023) et les besoins en eau spécifiques aux cultures pour la culture de pommes de terre. Un modèle de bilan hydrique quotidien a été appliqué pour déterminer les capacités minimales des réservoirs tout en satisfaisant trois seuils de fiabilité basés sur les critères agronomiques : zéro, ≤5 et ≤7 jours de déficit consécutifs. Les résultats montrent que les capacités optimisées moyennes du bassin vont de 757 à 863 m^3 ha^{-1} selon les trois scénarios, avec une possibilité de ≤5 à ≤7 jours consécutifs de déficit offrant la norme de conception la plus rentable compte tenu de la physiologie des cultures de pommes de terre. Un gradient nord–sud cohérent dans le stockage requis reflète l'hétérogénéité climatique sous-jacente, ce qui renforce la nécessité de normes d'infrastructure spatialement différenciées plutôt qu'uniformes. L'analyse temporelle constate une tendance à la hausse plus prononcée de la capacité requise au cours de la dernière décennie, ce qui indique que les conditions du bilan hydrique évoluent de manière active plutôt que de fluctuer autour d›une moyenne stable. Ces résultats fournissent aux planificateurs et décideurs agricoles un cadre quantitatif pour transformer les réseaux de drainage existants en infrastructures d'irrigation résistantes au climat dans les régions agricoles boréales.

Mots-clés : Système intelligent d'irrigation et de drainage; Réservoirs de collecte des eaux de pluie; Normes d'infrastructure; Analyse temporelle; Bilan hydrique.

IRRIGATION WATER USE EFFICIENCY OF AGROCENOSES AT LEFT BANK OF LOWER VOLGA RIVER

EFFICACITÉ DE L'UTILISATION DE L'EAU D'IRRIGATION DES AGROCÉNOSES SUR LA RIVE GAUCHE DE LA BASSE VOLGA

Anatoly Zeyliger[1,2] and Olga Ermolaeva[3]

ABSTRACT

In this study, MOD16A2 geodata sets were used to estimate actual evapotranspiration (ETav) during the 2003–2017 growing seasons for irrigated and non-irrigated agrocenoses in the Pryvolgskaya and Komsomolskaya irrigation systems (Marksovsky District, Saratov Region, Russian Federation). For the spatial and temporal analysis of annual ETav layers and the assessment of irrigation water use efficiency by agrocenoses, a geodatabase was created. It included land-use layers, arable land boundaries, irrigation infrastructure, and volumes of irrigation water supplied to agricultural enterprises for irrigating agrocenoses. For the annual division of the territory occupied by arable land into those occupied by irrigated and non-irrigated agrocenoses, Landsat 7-9 data were used. The analysis of ETav flows corresponding to irrigated and non-irrigated agrocenoses allowed us to identify periods associated with fluctuations in weather conditions, as well as a number of external drivers. Comparison of irrigation water volumes with ETav estimates of irrigated and non-irrigated agrocenoses yielded regional average water-use efficiency coefficients ranging from 0.35 to 0.72.

Keywords: irrigation water; irrigation infrastructure; geodatabase; water-use efficiency coefficients.

RESUME

Dans cette étude, des ensembles de données géographiques MOD16A2 ont été utilisés pour estimer l'évapotranspiration réelle (ETav) au cours des saisons de croissance 2003-2017 pour les agrocénoses irrigués et non irrigués dans les périmètres irrigués de Pryvolgskaya et Komsomolskaya (périmètre de Marksovsky, région de Saratov, Fédération de Russie). Pour l'analyse spatiale et temporelle des couches annuelles d'ETav et l'évaluation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation par les agrocénoses, une base de données géographique a été créée. Cette base de données intégrait les couches d'usages du sol, les limites des terres arables, les infrastructures d'irrigation et les volumes d'eau d'irrigation fournis aux exploitations agricoles pour irriguer les agrocénoses. Des données issues des satellites Landsat 7 à 9 ont été utilisées pour distinguer, chaque année, le territoire occupé par les terres arables en ceux occupés par les agrocénoses irriguées et non irriguées. L'analyse des flux d'ETav correspondant aux agrocénoses irrigués et non irrigués nous a permis d'identifier les périodes associées aux fluctuations des conditions météorologiques, ainsi qu'un certain nombre de facteurs externes. La comparaison entre les volumes d'eau d'irrigation et les estimations ETav des agrocénoses irriguées et non irriguées a établi des coefficients moyens régionaux d'efficacité de l'utilisation de l'eau allant de 0,35 à 0,72.

Mots clés : Eau d'irrigation; Infrastructure d'irrigation; Base de données géographique; Coefficients d'efficacité de l'utilisation de l'eau.

1 Hydroinformatics Laboratory, Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, ul. Gubkina 3, Moscow, 119333, Russia
2 Southern Federal Univ. 105/42 Bolshaya Sadovaya Str., Rostov-on-Don, Russia, azeyliger@mail.ru
3 Russian State Agrarian University-Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49, Timiryazevskay St., Moscow, 127434, Russia, Email: ol_ermolaeva@rgau-msha.ru

RECHARGE BASIN DESIGN, SOUTHERN SANJOAQUIN MUNICIPAL UTILITY DISTRICT

CONCEPTION DU BASSIN DE REALIMENTATION, DISTRICT MUNICIPAL DE SERVICES PUBLICS DE SAN JOAQUIN DU SUD

Sam Schaefer P.E.[1], Luis Flores[2], Fabian Acuna and Ethan Hunter[3], Grace Martin[4], and Roland Gross[5]

ABSTRACT

The Southern San Joaquin Municipal Utility District (District) is adding recharge facilities to increase its capacity to deliver available surface water supplies to recharge groundwater. In the 1940s and 50s, the District recognized the need to bring in surface water to offset declining groundwater levels. The District supported the Bureau of Reclamation's development of the Central Valley Project (CVP) and constructed a water distribution system to help stabilize groundwater supplies using the delivery of Friant-Kern Canal (FKC) water for irrigation to agriculture. However, reductions in CVP water reliability and changes in timing of deliveries have occurred due to the San Joaquin River settlement and subsidence on the FKC that prevent full surface water deliveries when needed for crop irrigation.

Recently, the Sustainable Groundwater Management Act of 2014 (SGMA) has brought new concerns to the District regarding groundwater balance. To fully use the District's surface water supplies and balance groundwater pumping, recharge basins are needed to recharge groundwater with surface water delivered at times it cannot be used for irrigation. The District has identified a target need to develop roughly 607 hectares (1,500 acres) of recharge facilities over multiple years. In 2024 and 2026, the District purchased hundreds of acres of vineyard crop land, cleared the crop, and is now in the process of being converted into recharge basins. This presents the progress to date on the District's multi-year approach to planning, designing, funding, constructing, and operating as it converts the purchased land into recharge facilities with an emphasis on basin design factors.

Keywords: Available surface water; groundwater levels; groundwater pumping; water deliveries; recharge basins.

RESUME

Le district municipal de services publics de San Joaquin du sud (District) met en place des installations de réalimentation afin d'augmenter sa capacité à fournir les réserves d'eau de surface disponibles pour réalimenter la nappe phréatique. Dans les années 1940 et 1950, le District a reconnu la nécessité d'apporter de l'eau de surface pour compenser la baisse des niveaux d'eau souterraine. Le district a soutenu le développement du projet de la vallée centrale (CVP) par le «Bureau of Reclamation» et a développé un système de distribution d'eau pour aider à stabiliser les approvisionnements en eaux souterraines en distribuant l'eau du canal Friant-Kern (FKC) pour l'irrigation de l'agriculture. Cependant, des réductions de la

1 GEI Consultants, Inc., Agriculture Services Practice Leader, Santa Barbara, CA sschaefer@geiconsultants.com; 805.729.4677

2 Southern San Joaquin Municipal Utility District, 11281 Garzoli Ave., Delano, CA 93215, USA

3 GEI Consultants, Inc., Bakersfield, CA, USA

4 GEI Consultants, Inc., Bakersfield, CA, USA

5 Southern San Joaquin Municipal Utility District, 11281 Garzoli Ave., Delano, CA 93215

fiabilité de l'eau du projet de la vallée centrale (CVP) et des changements dans le calendrier de distributions se sont produits en raison du peuplement de la rivière San Joaquin et de l'affaissement tout au long du canal Friant-Kern FKC qui empêchent les distributions de l'eau de surface complètes lorsque cela est nécessaire pour l'irrigation des cultures.

Récemment, la loi de 2014 sur la gestion durable des eaux souterraines (SGMA) a suscité de nouvelles préoccupations au sein du district concernant l'équilibre des eaux souterraines. Afin d'exploiter pleinement les ressources en eau de surface du district et d'équilibrer les prélèvements d'eau souterraine, il est nécessaire de créer des bassins de réalimentation permettant d'injecter dans les nappes phréatiques l'eau de surface disponible en dehors des périodes d'irrigation.

Le district a identifié un besoin cible de développer une superficie d'environ 607 hectares de terre (1 500 acres) d'installations de réalimentation sur plusieurs années. En 2024 et 2026, le District a acheté des centaines d'hectares de terres viticoles, après avoir retiré les cultures, il procède actuellement à la transformation de ces terrains en bassins de réalimentation. Ce rapport présente les progrès réalisés à ce jour dans l'approche pluriannuelle du District en matière de planification, de conception, de financement, de construction et d'exploitation, car il transforme les terrains achetés en installations de réalimentation, en mettant l'accent sur les facteurs liés à la conception des bassins.

Mots clés : Eau de surface disponible; Niveaux des eaux souterraines; Pompage des eaux souterraines; Distribution de l'eau; Bassins de réalimentation.

INTEGRATED TERRITORIAL IRRIGATION REFORM UNDER LOW EFFICIENCY AND CLIMATE-CONSTRAINED RIVER FLOWS: IADA SEBERANG PERAK, MALAYSIA

RÉFORME INTÉGRÉE DE L'IRRIGATION TERRITORIALE DANS LE CONTEXTE D'UNE FAIBLE EFFICACITÉ ET DES DÉBITS FLUVIAUX CONTRAINTS PAR LE CLIMAT : IADA SEBERANG PERAK, MALAISIE

S.H. Husain[1] and S.P. Lim[2]

ABSTRACT

IADA Seberang Perak is one of Malaysia's twelve designated rice granary areas, supporting 8,568 ha of double-crop irrigated paddy under a gravity-fed system commissioned in the 1960s. The scheme depends on run-of-the-river abstraction from Sungai Perak at Teluk Sena Intake and contributes to national rice self-sufficiency targets under the National Agrofood Policy 2.0. However, irrigation efficiency is currently estimated at approximately 17%, well below national benchmarks. Combined with climate variability and increasing cross-sector abstraction, this low efficiency creates territorial-scale vulnerability in water allocation. This paper presents findings from the ongoing Irrigation Water Management Plan (IWMP), integrating crop water demand diagnostics, hydrological modelling and irrigation performance assessment to evaluate how agronomic water-use optimisation can strengthen territorial irrigation decision-making under flow-constrained conditions. Hydrological analysis used long-term discharge records (1960-2022) from Sungai Perak at Jambatan Iskandar to construct flow duration curves and derive low-flow thresholds. The 7Q50 discharge is 114.62 m3/s, while the net 7Q5 available at Teluk Sena Intake reduces to approximately 87.3 m3/s after upstream abstraction. Peak irrigation demand reaches about 30 m3/s, with an additional 27 m3/s abstracted upstream. Crop water demand analysis using FAO-based methods indicates that gross irrigation supply exceeds agronomic field requirement, mainly due to conveyance loss, distribution inefficiency and rigid scheduling. The study identifies three reforms: hydrologically triggered allocation, demand-responsive rotational supply and integrated basin-scale water balance modelling. The case demonstrates that climate resilience depends not only on water availability, but on allocation governance, operational flexibility and crop-responsive irrigation scheduling.

Keywords: Irrigation efficiency; crop water demand; flow duration curve; low-flow threshold; territorial governance; climate resilience; IADA Seberang Perak.

RESUME

IADA Seberang Perak est l'une des douze zones consacrées à grenier à riz en Malaisie, qui soutient 8 568 ha de récolte de riz irrigué à double culture, grâce à un système gravitaire mis en service dans les années 1960. Le périmètre dépend du prélèvement au fil de l'eau de Sungai Perak à prise d'eau de Teluk Sena et contribue aux objectifs nationaux d'autosuffisance en riz dans le cadre de la politique agroalimentaire nationale 2.0. Cependant, l'efficacité de l'irrigation est actuellement estimée à environ 17%, bien en dessous des références nationales. Combinée à la variabilité climatique et à l'augmentation des prélèvements intersectoriels, cette faible efficacité crée une vulnérabilité à l'échelle territoriale en matière de l'allocation de l'eau. Cet article présente les résultats du Plan de gestion de l'eau d'irrigation (PGEI) en cours, intégrant le diagnostic de la demande en eau des cultures, la modélisation hydrologique et l'évaluation

1 PRESICA Sdn Bhd (Agronomy & Soil Health Consultancy), Agronomy Division, Gombak, Malaysia; Email: drsuzieharyanti@presica-my.com
2 Global Water Consultants Sdn Bhd (fka G&P Water & Maritime Sdn Bhd), Kuala Lumpur, Malaysia

des performances d'irrigation afin d'évaluer la manière dont l'optimisation agronomique de l'utilisation de l'eau peut renforcer la prise de décision territoriale en matière dans des conditions de contraints de débits. L'analyse hydrologique a utilisé des relevés de débit à long terme (1960-2022) provenant de Sungai Perak à Jambatan Iskandar pour construire des courbes de durée d'écoulement et dériver les seuils de faible débit. Le débit du 7Q50 est de 114,62 m3/s, tandis que le débit net du 7Q5 disponible à la prise d'eau de Teluk Sena se réduit à environ 87,3 m3/s après prélèvement en amont. La demande maximum d'irrigation arrive à environ 30 m3/s, à laquelle s'ajoutent 27 m3/s prélevés en amont. L'analyse de la demande en eau des cultures à l'aide de méthodes basées sur la FAO indique que l'approvisionnement brut d'irrigation dépasse les besoins agronomiques de la parcelle, principalement en raison de la perte de transport, de l'inefficacité de la distribution et de la programmation rigide. L'étude identifie trois réformes : une allocation provoquée par des facteurs hydrologiques, une distribution par rotation adaptée à la demande et une modélisation intégrée du bilan hydrique à l'échelle du bassin. Le cas démontre que la résistance climatique ne dépend pas seulement de la disponibilité de l'eau, mais aussi de la gouvernance des allocations, de la flexibilité opérationnelle et d'une programmation de l'irrigation adaptée aux besoins des cultures.

Mots clés : Efficacité de l'irrigation; Demande en eau des cultures; Courbe de durée des débits; Seuil de faible débit; Gouvernance territoriale; Résistance climatique; IADA Seberang Perak.

MOSIS - SATELLITE-MANAGED IRRIGATION WATER FEES - APPLICATION TO RICE PERIMETER IN SENEGAL

MOSIS - TARIFICATION DE L'EAU D'IRRIGATION GEREES PAR SATELLITE - APPLICATION SUR LE PERIMETRE RIZICOLE DU SENEGAL

Jean-Philippe Luc[1]. Marie Lefranc[2]

ABSTRACT

The Senegal River Valley is a major agricultural region where traditional agro-pastoral systems coexist with large-scale irrigated farming. Under increasing pressure from climate change, accurate assessment of irrigated areas and associated water consumption remains a critical challenge for sustainable water resource management and sustainable economic development. Rice cultivation alone accounts for approximately 85% of billed irrigation water, making its monitoring a strategic priority.

However, the situation is critical. In this vast rice-growing region, of strategic importance to both Senegal and Mauritania, estimating irrigated areas and associated water consumption is complex and fluctuates annually depending on hydro-climatic conditions. This implies technical challenges such as the ability to monitor water use, particularly irrigated rice cultivation. In this context, satellite imagery represents a relevant data source with global coverage and constantly improving spatio-temporal resolution, far less restrictive than field surveys for observing changes in the territory and thus able to support medium- and long-term water resource management decisions. In this context, MOSIS project (Sharing Satellite Observations for Service Innovation) was launched in 2018. MOSIS (Monitoring System for Irrigated Surfaces) project is an operational decision-support system based on Sentinel-2 satellite imagery. Developed through a collaboration between SOGED SOGED (as a subsidiary of the OMVS (Organization for the Development of the Senegal River)) and Rives & Eaux du Sud-Ouest (formerly CACG - Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne), the platform integrates remote sensing indicators—namely the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)—to identify and quantify irrigated rice fields. MOSIS has been supported since the project's inception through decentralized cooperation by the French Adour-Garonne Water Agency (AEAG).

Thereby, MOSIS provides spatially explicit information through a WebGIS interface, enabling improved identification of users, better estimation of irrigated areas, and enhanced efficiency in water fee collection. Results demonstrate the potential of satellite-based solutions to strengthen water governance and support sustainable irrigation management in data-scarce environments.

Keywords: water consumption; satellite imagery; irrigated rice fields; satellite-based solutions; sustainable irrigation management.

RESUME

La vallée du fleuve Sénégal est une région agricole majeure où coexistent des systèmes agro-pastoraux traditionnels et une agriculture irriguée à grande échelle. Sous la pression croissante du changement climatique, l'évaluation précise des zones irriguées et de la consommation d'eau associée reste un défi crucial à relever pour une gestion durable des ressources en eau et un développement économique durable. La riziculture représente à elle seule environ 85% de l'eau d'irrigation facturée, ce qui fait de sa surveillance une priorité stratégique.

1 Rives & Eaux du Sud-Ouest, Chemin de Lalette, BP 449, 65000 Tarbes cedex, France

Cependant, la situation est critique. Dans cette vaste région de riziculture, d'importance stratégique tant pour le Sénégal que pour la Mauritanie, l'estimation des superficies irriguées et de la consommation d'eau associée est complexe et varie d'une année à l'autre en fonction des conditions hydro-climatiques. Cela implique des défis techniques tels que la capacité à surveiller l'utilisation de l'eau, en particulier la riziculture irriguée. Dans ce contexte, l'imagerie satellitaire constitue une source de données pertinente, offrant une couverture mondiale et une résolution spatio-temporelle en constante amélioration, bien moins restrictive que les enquêtes menées sur le terrain pour observer les évolutions du territoire et donc capable de soutenir les décisions de gestion des ressources en eau à moyen et long terme.

Dans ce contexte, le projet MOSIS (Sharing Satellite Observations for Service Innovation) a été lancé en 2018. Le projet MOSIS (Monitoring System for Irrigated Surfaces) est un système opérationnel d'aide à la décision basé sur l'imagerie satellitaire Sentinel-2. Développé grâce à une collaboration entre SOGED SOGED (filiale de l'OMVS- Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal) et Rives & Eaux du Sud-Ouest (anciennement CACG - Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne), la plateforme intègre des indicateurs de télédétection — à savoir l'indice d'eau par différence normalisée modifiée (MNDWI) et l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) — afin d'identifier et de quantifier les rizières irriguées. Depuis sa création, le projet MOSIS est soutenu par la coopération décentralisée de l'Agence de l'eau Adour-Garonne (AEAG).

Ainsi, le MOSIS fournit des informations spatialement explicites via une interface WebGIS, permettant une meilleure identification des usagers, une meilleure estimation des zones irriguées et une efficacité accrue dans la collecte des redevances d'eau. Les résultats démontrent le potentiel des solutions satellitaires pour renforcer la gouvernance de l'eau et soutenir une gestion durable de l'irrigation dans des environnements où les données sont rares.

Mots-clés : Consommation d'eau; Imagerie satellitaire; Rizières irriguées; Solutions satellitaires; Gestion durable de l'irrigation.

ASSESSMENT OF HYDRAULIC PERFORMANCE OF CANAL USING AERIAL SURVEY AND HEC-RAS MODEL: CASE STUDY OF GUJARAT, INDIA

ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE HYDRAULIQUE DU CANAL À L'AIDE D'UNE ÉTUDE AÉRIENNE ET D'UN MODÈLE HEC-RAS : ÉTUDE DE CAS DE L'ETAT DE GUJARAT, INDE

Arbaaz Shaikh[1], Azazkhan Pathan[2], Harsh Shah[3], and Vivek Kapadia[4]

ABSTRACT

Irrigation canals are critical for sustaining agricultural productivity, and lined canals are expected to maintain their hydraulic efficiency and design discharge throughout their operational life. However, over time, canals experience reduction in conveyance capacity due to siltation, vegetation growth, bank erosion, and unrecorded field alterations. These changes modify the channel geometry, increase hydraulic roughness and head losses, and may create overtopping risks and undesirable hydraulic variations. Since siltation is often distributed gradually along the canal section and length, its impact on canal performance may remain unnoticed until severe hydraulic problems arise. Conventional approaches for assessing siltation, such as bathymetric surveys during flowing conditions or level surveys during canal closure, are generally time-consuming and expensive. The present study demonstrates an alternative and practical approach for rapid hydraulic assessment of irrigation canals using UAV-based aerial survey integrated with DGPS observations and HEC-RAS hydraulic modelling. A 26 km stretch of the Panam Left Bank Main Canal of the Panam High Level Canal System in Gujarat, India, including 13 syphon structures, was assessed using high-resolution UAV-DGPS survey data collected during canal closure. The survey achieved sub-meter-level horizontal accuracy and 5 cm vertical accuracy, enabling development of a detailed hydraulic model in HEC-RAS. The hydraulic assessment revealed severe and continuous bed aggradation between Chainage 1290 m and 9600 m, creating major hydraulic bottlenecks and reducing conveyance efficiency. Simulations carried out under the design discharge of 600 cusecs indicated localized overtopping risks, increased backwater effects, and significant hydraulic variations across several canal reaches and structures. The results also indicated reduction in downstream conveyance performance due to altered channel geometry and flow conditions. The study demonstrates that integration of UAV-based surveys with hydraulic modelling can provide a faster, reliable, and practical framework for canal performance assessment compared with conventional methods. The approach can support better planning of desiltation, maintenance prioritization, and operational management for sustainable canal system performance.

Keywords: Canal, Hydraulic performance, Siltation, DGPS, UAV survey, HEC-RAS.

1 Junior Water Resource Engineer, AgroCast Analytics Pvt Ltd, Ahmedabad, India. Email: arbaaz.shaikh@agrocastanalytics.com

2 Vice President - Technical Strategy & Business Development, AgroCast Analytics Pvt Ltd, Ahmedabad, India. Email: azaz.pathan@agrocastanalytics.com

3 Founder & CEO, AgroCast Analytics Pvt Ltd, Ahmedabad, India; Chief Technology Officer, Jalkruti Water Solutions Pvt Ltd, Ahmedabad, India. Email: harsh.shah@agrocastanalytics.com

4 Professor of Practice, Indian Institute of Technology Gandhinagar, Gandhinagar, India. Email: vivekpkapadia@gmail.com

RESUME

Les canaux d'irrigation sont essentiels pour maintenir la productivité agricole et on s'attend à ce que les canaux revêtus maintiennent leur efficacité hydraulique et leur débit de calcule tout au long de leur durée de vie opérationnelle. Cependant, au fil du temps, les canaux connaissent une réduction de leur capacité de transport en raison de l'ensablement, de la croissance de la végétation, de l'érosion des berges et des modifications non enregistrées sur le terrain. Ces changements modifient la géométrie du canal, augmentent la rugosité hydraulique et les pertes de charge, et peuvent créer des risques de débordement et des variations hydrauliques indésirables. Etant donné que l'ensablement est souvent distribué de manière progressive le long de la section et de la longueur du canal, son impact sur la performance du canal peut rester inaperçu jusqu'à ce que de graves problèmes hydrauliques surviennent. Les méthodes conventionnelles d'évaluation de l'ensablement, telles que les enquête bathymétriques en conditions d'écoulement ou les enquêtes de niveau lors de la clôture du canal, sont généralement longues et coûteuses. La présente étude démontre une approche alternative et pratique pour l'évaluation hydraulique rapide des canaux d'irrigation à l'aide des enquêtes aériennes menées par véhicule aérien sans pilote (UAV) intégrée aux observations DGPS et à la modélisation hydraulique HEC-RAS. Un tronçon de 26 km du canal principal de la rive gauche de Panam, dans le système de canaux à haut niveau de Panam, au Gujarat, en Inde, comprenant 13 structures de siphons, a été évalué à l'aide de données d'enquête UAV-DGPS haute résolution recueillies lors de la clôture du canal. L'étude a atteint une précision horizontale inférieure au mètre et une précision verticale de 5 cm, rendant possible le développement d'un modèle hydraulique détaillé dans le cadre de HEC-RAS. L'évaluation hydraulique a révélé un exhaussement sévère et continu du lit à Chainage entre 1290 m et 9600 m, créant d'importants goulets d'étranglement hydrauliques et réduisant l'efficacité du transport. Les simulations effectuées sous le débit de calcule de 600 cusecs ont indiqué des risques localisés de débordement, une augmentation des effets de bras mort et d'importantes variations hydrauliques dans plusieurs tronçons et structures du canal. Les résultats ont également indiqué une réduction des performances de transport en aval due à la géométrie modifiée du canal et aux conditions d'écoulement. L'étude démontre que l'intégration des enquêtes menées par véhicule aérien sans pilote (UAV) avec la modélisation hydraulique peut fournir un cadre plus rapide, fiable et pratique pour l'évaluation de la performance du canal par rapport aux méthodes conventionnelles. L'approche peut soutenir une meilleure planification en ce qui concerne le dessablement, la priorisation de la maintenance et la gestion opérationnelle pour une performance durable du système de canaux.

Mots-clés : Canal; Performance hydraulique; Ensablement; DGPS; Enquêtes menées par véhicule aérien sans pilote (UAV)**;** HEC-RAS.

EVOLUTION OF REMOTE SENSING APPLICATIONS IN THAILAND: FROM ENVIRONMENTAL MONITORING TO NATIONAL WATER ACCOUNTING AND WATER RESOURCES MANAGEMENT

ÉVOLUTION DES APPLICATIONS DE TÉLÉDÉTECTION EN THAÏLANDE : DU SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTAL À LA COMPTABILITÉ NATIONALE DE L›EAU ET À LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Nutchanart Sriwongsitanon[1,2,3], James A. Williams[1], Chanphit Kaprom[1,2], Sansarith Thianpopirug[1], Ekkarin Maekan[1], Chainarong Ophaphaibun[1], Nattakorn Prasertthonggorn[1], Chaiwat Prechawit[2], Satit Maneephai[2], Watchara Suiadee[2], Noppadon Kowsuvon[2], Rasu Suepsahakarn[2], Hubert H.G. Savenije[4], and Wim Bastiaanssen[5]

ABSTRACT

Remote sensing has transformed water resources research by providing spatially continuous observations of environmental and hydrological processes across multiple spatial and temporal scales. This review synthesizes more than two decades of remote sensing research in Thailand and demonstrates how Earth observation technologies have progressively evolved from environmental monitoring tools into integral components of hydrological understanding, national water accounting, hydrological modelling, irrigation performance assessment, and operational water resources management.

The evolution began with environmental monitoring applications, including satellite-based assessment of water quality and watershed land-use dynamics. Early studies demonstrated the importance of atmospheric correction, field calibration, and optimized sampling strategies for improving the accuracy of water quality retrieval from satellite imagery. At the watershed scale, multi-temporal land-cover analyses revealed the influence of landscape change on runoff generation and flood response, establishing the methodological foundation for quantitative remote sensing applications in water resources management.

Subsequent research advanced toward hydrological process understanding through the development of the Normalized Difference Infrared Index (NDII) as a proxy for root-zone moisture storage. Strong relationships between NDII and model-simulated soil moisture enabled the integration of remotely sensed information into hydrological model structures, improving process representation and predictive capability. This transition marked an important shift from using remote sensing solely as an external source of information to employing it as a constraint on hydrological processes.

A major milestone was the implementation of a nationwide Water Accounting Plus (WA+) framework covering all 25 river basins and 254 sub-basins of Thailand. Satellite-derived precipitation, evapotranspiration, land-use information, and hydrological modelling were integrated to support water security assessment, resource allocation, and strategic water resources planning. Complementary evaluations of satellite evapotranspiration and precipitation products established reliable datasets for operational applications and highlighted

1 Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management, Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management (SENSWAT), Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand
2 Thai National Committee on Irrigation and Drainage (THAICID), Bangkok, Thailand
3 Asian Regional Working Group (ASRWG), International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), Bangkok, Thailand
4 Department of Water Resources Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands
5 IHE-Delft, Institute for Water Education, Delft, The Netherlands

the benefits of bias correction and ensemble approaches. More recently, the integration of NDVI, NDII, actual evapotranspiration, and gross primary productivity has enabled irrigation performance assessment and agricultural water management at regional and national scales.

Collectively, these developments demonstrate a clear progression from environmental observation to operational decision support, providing a transferable framework for strengthening water security and sustainable water resources management in tropical and data-scarce regions.

Keywords: Remote Sensing; Water Accounting; Hydrological Modeling; Satellite Precipitation; Evapotranspiration; NDII; Irrigation Performance; Water Resources Management.

RESUME

La télédétection a transformé la recherche menée sur les ressources en eau en fournissant des observations spatialement continues des processus environnementaux et hydrologiques à plusieurs échelles spatiales et temporelles. Cette revue synthétise une recherche menée sur la télédétection pour plus de deux décennies en Thaïlande et démontre comment les technologies d'observation de la Terre ont progressivement évolué des outils de surveillance environnementale vers des composantes intégrales de la compréhension hydrologique, de la comptabilité nationale de l'eau, de la modélisation hydrologique, de l'évaluation des performances d'irrigation et de la gestion opérationnelle des ressources en eau.

L'évolution a commencé avec les applications de surveillance environnementale, y compris l'évaluation par satellite de la qualité de l'eau et de la dynamique d'utilisation des terres dans les bassins versants. Les premières études ont démontré l'importance de la correction atmosphérique, de l'étalonnage sur le terrain et des stratégies d'échantillonnage optimisées pour améliorer la précision de l'extraction de la qualité de l'eau à partir d'images satellites. À l'échelle des bassins versants, les analyses multi-temporelles de la couverture terrestre ont révélé l'influence du changement de paysage sur la génération de ruissellement et la réponse aux inondations, établissant ainsi la base méthodologique des applications quantitatives de la télédétection dans la gestion des ressources en eau.

Les recherches ultérieures ont progressé vers la compréhension des processus hydrologiques grâce au développement de l'indice infrarouge à différence normalisée (NDII) comme indicateur indirect du stockage de l'humidité dans la zone racinaire. Les relations étroites entre le NDII et l'humidité du sol simulée par modèle ont permis l'intégration d'informations de télédétection dans des structures de modèles hydrologiques, améliorant ainsi la représentation des processus et la capacité prédictive. Cette transition a marqué un changement important, passant de l'utilisation de la télédétection uniquement comme source d'information externe à son emploi comme contrainte appliquée aux processus hydrologiques.

Un fait saillant était la mise en œuvre d'un cadre national de comptabilité de l'eau plus (WA+) couvrant les 25 bassins fluviaux et 254 sous-bassins de la Thaïlande. Les précipitations issues de satellites, l'évapotranspiration, les informations sur l'utilisation des terres et la modélisation hydrologique ont été intégrées pour soutenir l'évaluation de la sécurité de l'eau, l'allocation des ressources et la planification stratégique des ressources en eau. Des évaluations complémentaires de l'évapotranspiration satellite et des produits de précipitations ont établi des ensembles de données fiables pour des applications opérationnelles et ont mis en évidence les avantages de la correction du biais et des approches d'ensemble. Plus récemment, l'intégration du NDVI, de la NDII, de l'évapotranspiration réelle et de la productivité primaire brute a permis une évaluation des performances d'irrigation et une gestion de l'eau agricole aux échelles régionale et nationale.

Collectivement, ces développements démontrent une progression claire allant de l'observation environnementale vers l'aide à la décision opérationnelle, fournissant un cadre transmissible pour le renforcement de la sécurité de l'eau et la gestion durable des ressources en eau dans les régions tropicales et les régions où les données sont rares.

Mots-clés : Télédétection; Comptabilité de l›eau; Modélisation hydrologique; Précipitations par satellite; Évapotranspiration; NDII; Performance de l›irrigation; Gestion des ressources en eau.

ASSESSMENT OF GROUNDWATER AND SURFACE WATER USE EFFICIENCY (WUE) AND ECONOMIC WATER PRODUCTIVITY ACROSS THAILAND AGRICULTURAL SECTOR THROUGH THE LENS OF SUSTAINABILITY

ÉVALUATION DE L'EFFICACITE DE L'UTILISATION DES EAUX SOUTERRAINES ET DE SURFACE (WUE) ET DE LA PRODUCTIVITE ECONOMIQUE DE L'EAU DANS LE SECTEUR AGRICOLE THAÏLANDAIS A TRAVERS LE PRISME DE LA DURABILITE

Aksara Putthividhya[1], Sasin Jirasirirak, and Somkiat Prajamwong

ABSTRACT

Thailand's water and climate adaptation are complex and under challenges from a low-lying delta capital city, combination of intensifying floods and droughts, increasing land subsidence, river and coastal erosion, biodiversity loss and sea-level rise. Thailand's approach to water development and management has always been relying on multiple sector basis without substantial consideration of any interactions between them and institutions and policies are typically flawed, in the long-term leading to inefficient water use and undesirable consequences from development, all are creating an urgent need for sustainable solutions, actions, and practices. As climate change intensifies, growing water scarcity, unpredictability, and vulnerability drive the need for sound baseline economic analyses related to current water use efficiency and water productivity, providing the basis for innovative approaches to allocate water to various sectors and increase the efficient use of existing water supplies with minimal adverse effects to the resource for our next generations, and setting the stage for more sustainable water management. In this study, we assess the water use efficiency (WUE) and economic water productivity across Thailand agricultural sector to focus on the efficient use of limited water resources under water scarcity threat at the basin-scale nation-wide (total of 22 river basins) based on standardized terminologies and formulas from modified version of the FAO's monitoring framework. Meteorological, physical geospatial, Gross Provincial Products (GPP), and historical allocated surface water and groundwater to agricultural sectors in irrigated area data (based on the System of Environmental Economic Accounting for Water approach) are collected and the economic efficiency in agricultural sector expressed as a quantitative ratio between the amount of monetary production (i.e., value added in agricultural sector) per area as resources or efforts made for its realization are investigated. With increasing in water allocated to irrigate crop area in the dry period, slow rising in the economic efficiency of agricultural sector is observed. Change in the economic water productivity defined as a ratio between the amount of monetary production (i.e., value added in agricultural sector) per unit irrigated water resource made to obtain them, is further evaluated. Declining in the economic water productivity (THB/m^3) is observed with increasing of dry-season allocated water, suggesting that the economic water activity is complex, requiring specific level of resource consumption to achieve the efficiency, not entirely corresponding to the allocated expenditure. Dry-season water allocation escalates consistently with increase in annual rainfall nation-wide and growing irrigated crop area, but fails to enhance both water economic productivity and sustainability. Greater attention needs to be focused on managing surface water and groundwater for conjunctive use. We need a better understanding of biophysical and socio-economic changes in basins over time and improved measures of basin-level efficiencies before we can determine in a given situation

1 Chulalongkorn University, Water Resources Engineering, Bangkok, Thailand

the potential for increasing water productivity through responsive interventions and policies. Decisions on basin-level allocations among sectors cannot be based strictly on economic efficiency but they must involve value judgements as to how best to benefit society inclusively as a whole. This will include setting priorities in the management of water resources to meet objectives such as ensuring sustainability, meeting food-security needs and providing the more vulnerable segments of society with access to water.

Keywords: agricultural sector; efficiency of agricultural sector; economic water productivity; socio-economic changes; basin-level allocations.

RESUME

La gestion de l'eau et l'adaptation au changement climatique en Thaïlande sont complexes et confrontées à de multiples défis : une capitale située dans un delta de basse altitude, une intensification conjuguée des inondations et des sécheresses, l'affaissement croissants des sols, l'érosion fluviale et côtière, la perte de biodiversité et l'élévation du niveau de la mer. L'approche thaïlandaise en matière de développement et de gestion des ressources en eau a toujours reposé sur une logique multisectorielle, sans prise en compte des interactions tenues entre les secteurs; par ailleurs, les institutions et les politiques présentent souvent des lacunes. À long terme, cela conduit à une utilisation inefficace de l'eau et à des conséquences indésirables liées au développement, créant ainsi un besoin urgent de rechercher des solutions, des actions et des pratiques durables. Comme le changement climatique s'intensifie, la pénurie croissante de l'eau, l'imprévisibilité et la vulnérabilité rendent nécessaire des analyses économiques de base solides liées à l'efficacité actuelle de l'utilisation de l'eau et à la productivité de l'eau. Ces analyses fournissent une base aux approches innovantes pour l'allocation de l'eau à divers secteurs et l'augmentation de l'efficacité de l'utilisation des approvisionnements en eau existants tout en minimisant les effets négatifs sur la ressource pour nos prochaines générations, et ouvrent la voie à une gestion de l'eau plus durable. Dans cette étude, nous évaluons l'efficacité de l'utilisation de l'eau (WUE) et la productivité économique de l'eau dans le secteur agricole thaïlandais afin de nous concentrer sur l'utilisation efficace des ressources en eau limitées face à la menace de la pénurie de l'eau à l'échelle du bassin national (En tout 22 bassins versants) basé sur des terminologies et des formules normalisées issues de la version modifiée du cadre de suivi de la FAO. Les données recueillies comprennent des informations météorologiques, des données géospatiales physiques, le produit intérieur brut provincial (PIB provincial) ainsi que les volumes historiques d'eau de surface et d'eau souterraine alloués au secteur agricole dans les zones irriguées (sur la base de l'approche du Système de comptabilité économique et environnementale pour l'eau). L'efficacité économique du secteur agricole exprimée sous forme d'un rapport quantitatif entre la quantité de production monétaire (c'est-à-dire la valeur ajoutée dans le secteur agricole) par zone, à mesure que les ressources ou les efforts déployés pour sa réalisation sont étudiés. Avec l'augmentation de la quantité d'eau allouée à l'irrigation dans les zones cultivées pendant la période sèche, on observe une lente augmentation de l'efficacité économique du secteur agricole. L'évolution de la productivité économique de l'eau définie comme un rapport entre le montant de la production monétaire (c'est-à-dire la valeur ajoutée dans le secteur agricole) par unité de ressource en eau irriguée réalisée pour l'obtenir, est évaluée plus en détail. Une baisse de la productivité économique de l'eau (THB/m^3) est observée avec l'augmentation de l'eau allouée en saison sèche, ce qui suggère que l'activité économique de l'eau est complexe, nécessitant un niveau spécifique de consommation de ressources pour atteindre l'efficacité, ne correspondant pas entièrement aux dépenses allouées. L'allocation de l'eau pendant la saison sèche s'intensifie constamment avec l'augmentation des précipitations annuelles à l'échelle nationale et la croissance des surfaces cultivées irriguées, mais ne parvient pas à améliorer à la fois la productivité économique de l'eau et sa durabilité. Une plus grande attention doit être accordée à la gestion des eaux de

surface et souterraines pour une utilisation conjointe. Il est nécessaire de mieux comprendre l'évolution biophysique et socio-économique des bassins au fil du temps et de prendre des mesures améliorées de l'efficacité au niveau du bassin avant de pouvoir déterminer, dans une situation donnée, le potentiel d'augmentation de la productivité de l'eau grâce à des interventions et des politiques réceptives. Les décisions sur les allocations de l'eau entre les secteurs au niveau du bassin ne peuvent pas être basées strictement sur l'efficacité économique, mais elles doivent impliquer des jugements de valeur visant à maximiser les bénéficies pour l'ensemble de la société, dans une perspective inclusive. Il s'agira notamment de mettre en place des priorités dans la gestion des ressources en eau afin d'atteindre des objectifs tels que la durabilité, la sécurité alimentaire et l'accès à l'eau aux segments les plus vulnérables de la société.

Mots-clés : Secteur agricole; Efficacité du secteur agricole; Productivité économique de l'eau; Evolutions socio-économiques; Allocations au niveau du bassin.

WATER SOBRIETY AS A LEVER FOR IMPROVED TERRITORIAL WATER ALLOCATION

LA SOBRIÉTÉ COMME LEVIER POUR AMÉLIORER L'ALLOCATION DES EAUX TERRITORIALES

Sandrine Pignard [1], and Pascal Auzier[2]

ABSTRACT

The Luberon Sorgue Ventoux Canal Union abstracts and transports water from the Durance river to supply four landowners' associations irrigating nearly 20,000 ha in the Vaucluse department, France. Among these canals, the Carpentras Canal, the largest landowners' association in France, implemented a proactive water-saving policy in the early 1980s, which has contributed to a massive reduction in water abstraction. These water savings have enabled changes in the distribution and uses of water both within the Durance region and within the area irrigated by the Carpentras Canal. This paper offers a brief review of the impact that these water-saving measures have had on the concerned areas, as well as the new forms of governance that have emerged to manage the new water allocations made possible by these savings. It also highlights the limitations of this proactive water-saving policy and the fragility of the system in the face of climate change.

Keywords: Canals; water abstraction; water-saving policy; climate change.

RESUME

L'Union du canal du Luberon, de la Sorgue et du Ventoux prélève et transporte des eaux de la Durance pour alimenter quatre associations de propriétaires qui irriguent près d'une superficie de 20 000 ha de terre dans le département du Vaucluse. Parmi ces canaux, le canal de Carpentras, la plus grande association de propriétaires fonciers en France, a mis en œuvre une politique proactive d'économie d'eau au début des années 1980, qui a contribué à une réduction massive du prélèvement d'eau. Ces économies d'eau ont permis des changements dans la distribution et les usages de l'eau tant au niveau du bassin de la Durance que sur le périmètre irrigué par le canal de Carpentras. Cet article propose une brève revue de l'impact que ces mesures d'économie d'eau ont exercé sur les zones concernées, ainsi que des nouvelles formes de gouvernance qui ont émergé pour gérer les nouvelles allocations d'eau rendues possibles par ces économies. Il met également l'accent sur les limites de cette politique proactive d'économie d'eau et la fragilité du système face au changement climatique.

Mots-clés: Canaux; Prélèvement d'eau; Politique d'économie d'eau; Changement climatique.

1 Director of the Union Luberon Sorgue Ventoux Canal – 894 RD 901, Route du Four à Chaux towards L'Isle 84800 LAGNES – pascal.auzier@canal-isle.fr

2 Director of the Carpentras Canal – 232 Avenue Frédéric Mistral – 84200 CARPENTRAS – sandrine.pignard@canaldecarpentras.com

EARTH OBSERVATION–ENABLED DECISION SUPPORT FOR TERRITORIAL-SCALE IRRIGATION WATER MANAGEMENT

AIDE À LA DÉCISION ACTIVÉE PAR L'OBSERVATION DE LA TERRE POUR LA GESTION DE L'EAU D'IRRIGATION À L'ÉCHELLE TERRITORIALE

Guido D'urso[1], Carlo De Michele[2], Oscar Rosario Belfiore[3], and Salvatore Falanga Bolognesi[4]

ABSTRACT

Free availability of high spatial and temporal resolution multispectral data from Sentinel-2 satellites of European Copernicus Program has opened new opportunities for supporting irrigation water management, by providing Earth Observation (EO) products for routine estimation of irrigation water requirements and construction of multi-level information portfolios - from irrigated area inventories to basic and advanced water use products - explicitly designed for multi scale decision making (plot, irrigation unit, district, aquifer and basin). Near real time delivery through web-GIS and Information and Communication Technologies (ICTs) of data, i.e. crop maps, growth time series and recommended irrigation depths, closes the gap between information production and actionable decisions by farmers, irrigation consortia and public authorities, embracing concerted approaches for scaling up from the farm to district/ basin scale.

This multi-level approach to irrigation management improves decisions by: a) supporting agronomic scheduling that accounts for actual canopy development and within field heterogeneity, reducing yield losses associated with under and over irrigation; b) enabling more equitable and efficient allocation rules and cost recovery, including a shift from area based water fees (which can incentivize over irrigation) toward needs or performance based management linked to EO informed crop water requirements; c) strengthening environmental stewardship via spatial water use accounting, identification of inefficiencies and "critical zones", and performance evaluation even where metering is incomplete; d) providing objective, repeatable monitoring of irrigated areas and irrigation volumes that supports compliance with water governance frameworks where lack of consistent observations is often the limiting factor.

This paper evidence the application of above concepts in different operational contexts, to show the relevance and usefulness of Earth Observation data in support for irrigation water management.

Keywords: spatial and temporal resolution; spatial and temporal resolution; performance evaluation; multi-level approach; irrigation water management.

RESUME

La disponibilité gratuite de données multispectrales à haute résolution spatiale et temporelle provenant des satellites Sentinel-2 du programme européen Copernicus a ouvert de nouvelles possibilités pour soutenir la gestion de l'eau d'irrigation, en fournissant des

1 University of Naples Federico II, Dept. Agricultural Sci., Italy, durso@unina.it

2 Ariespace srl, Naples, Italy, carlo.demichele@ariespace.com

3 University of Naples Federico II, Dept. Agricultural Sci., Italy, oscarrosario.belfiore@unina.it

4 Ariespace srl, Naples, Italy, salvatore.falanga@ariespace.com

produits d'observation de la Terre (EO) destinés à l'estimation de routine des besoins en eau d'irrigation et la construction de portefeuilles d'informations à niveaux multiples - des inventaires des superficies irriguées aux produits de base et avancés d'utilisation de l'eau – explicitement conçus pour la prise de décision à échelles multiples (parcelle, unité d'irrigation, périmètre, aquifère et bassin). La fourniture de données en temps quasi réel par le biais du Web-SIG et des technologies de l'information et de la communication (TIC), c'est-à-dire les cartes des cultures, les séries chronologiques de croissance et les profondeurs d'irrigation recommandées, comble l'écart entre la production d'informations et les décisions pratiques prises par les agriculteurs, les associations d'irrigants et les autorités publiques, en adoptant des approches concertées pour passer de l'échelle de l'exploitation à celle du périmètre ou du bassin.

Cette approche à niveaux multiples de la gestion de l'irrigation améliore les décisions en : a) soutenant une programmation agronomique qui tient compte du développement réel du couvert végétal et de l'hétérogénéité au sein du champ, réduisant ainsi les pertes de rendement associées à une irrigation insuffisante et excédentaire; b) permettant des règles d'allocation et de recouvrement des coûts plus équitables et efficaces, notamment en passant d'une tarification d'eau basée sur la superficie (ce qui peut inciter à l'irrigation excédentaire) vers la gestion basée sur les besoins ou la performance liée aux exigences en eau des cultures informées par l'observation de la Terre l(EO); c) renforçant la gestion responsable de l'environnement grâce à une comptabilité spatiale de l'utilisation de l'eau, à l'identification des inefficacités et des «zones critiques», et à l'évaluation des performances, même dans l'absence de systèmes de comptage complets; d) fournissant une surveillance objective et reproductible des zones irriguées et des volumes d'irrigation qui favorise la conformité avec les cadres de gouvernance de l'eau où l'absence d'observations cohérentes est souvent le facteur limitant.

Cet article met en évidence l'application des concepts ci-dessus dans différents contextes opérationnels, afin de montrer la pertinence et l'utilité des données d'observation de la Terre pour soutenir la gestion de l'eau d'irrigation.

Mots-clés : Résolution spatiale et temporelle; Evaluation des performances; Approche à niveau multiple; Gestion de l›eau d›irrigation.

QUESTION 68

NON-CONVENTIONAL WATER (REUSE, DESALINATION): CAN WE REALLY LOOSEN THE GRIP ON THE RESOURCE, AND FOR WHAT USES?

FACE AU DÉFI CLIMATIQUE, COMMENT L'IRRIGATION ET LE DRAINAGE PEUVENT CONTRIBUER À LA TRANSITION AGROÉCOLOGIQUE?

GENERAL REPORTER / RAPPORTEUR GÉNÉRAL

Prof. Juan Antonio Rodríguez Díaz (Spain)

CO-REPORTER / CO-RAPPORTEUR

Prof. Nicolas Roche (France)

PANEL OF EXPERTS / GROUPE D'EXPERTS

Prof. Victoriano Martínez Álvarez (Spain)

Eng. Ignacio Gómez Lucena (Spain)

Prof. Pilar Montesinos Barrios (Spain)

Eng. Feras AlMansour (Saudi Arabia)

Prof. Emilio Camacho Poyato (Spain)

Prof. Javier J. Cancela (Spain)

1. **Introduction**

2. **Water REUSE**

   (a) Current use of treated wastewater resources for irrigation at world, European and other key countries levels

   (b) Implications for the hydrological cycle. Direct and indirect use of treated wastewater3

   (c) Comparative analysis of regulations for treated wastewater for irrigation at international level.

   (e) Water-Energy nexus and water costs.

   (e) Agronomic benefits. Positive fertilisation effects. Spatial and temporal variability of water quality.

   (f) Main Challenges for implementation

   (g) How can integrated, interdisciplinary, and territorial approaches contribute to overcoming sociological, economic, and regulatory obstacles?

3. **Desalinated water**

   (a) Current use of treated desalinated water for irrigation at world, European and other key countries levels

   (b) Water-Energy nexus

   (c) Definition of a strategy to specifically meet agricultural needs, both in quantitative and qualitative terms

   (d) Economic model. Desalinated water costs.

   (e) Main challenges for the implementation

4. **SWOT analysis for the implementation of non-conventional water resources for irrigation.**

   (a) Water Reuse

   (b) Desalination

   (c) Conclusions

   (d) References

QUESTION 68:

NON-CONVENTIONAL WATER (REUSE, DESALINATION): CAN WE REALLY LOOSEN THE GRIP ON THE RESOURCE, AND FOR WHAT USES?

GENERAL REPORT

Prof. Juan Antonio Rodríguez Díaz*
General Reporter

1. INTRODUCTION

Global freshwater resources are under unprecedented pressure due to the combined effects of climate change and escalating food demand (United Nations, 2023).

According to FAO AQUASTAT, approximately 307 million hectares are equipped for irrigation worldwide. Total irrigation requirements are estimated at 1,500 km³, which are met by about 2,673 km³ of water withdrawn from primary and secondary renewable resources, fossil groundwater, and non-conventional water sources. Agriculture is by far the dominant freshwater consumer globally, accounting for approximately 70% of all freshwater withdrawals and more than 80% of consumptive water use from surface and groundwater bodies. Irrigated agriculture, covering roughly a quarter of the world's cropland, produces about 40% of global food on approximately one-third of harvested land.

The global water balance is further complicated by climate change, which is shifting precipitation patterns, rising evapotranspiration rates, reducing glacier-fed river flows, and increasing the frequency and severity of droughts and floods. Regions already experiencing water stress — including the Mediterranean basin, the Middle East and North Africa (MENA), parts of sub-Saharan Africa, South Asia, and western North America — face the most acute pressures. In semi-arid and arid zones, agriculture critically depends on irrigation, and groundwater overdraft has become the norm. In many basins, extraction systematically exceeds natural recharge rates, depleting aquifers that took millennia to fill. Projections indicate that global food production must increase by 60% by 2050 to sustain the growing population (FAO, 2017), a challenge that countries are already facing in regions like the Mediterranean Basin and North Africa. Per capita water availability has declined from 12,050 m³/year in 1950 to approximately 7,310 m³/year in 2000 and is expected to reach just 4,580 m³/year by 2050, a 62% reduction in a single century, while at the same time total global water consumption is projected to increase by 50% (Ragab, 2023; Shemer et al., 2023).

In response, many nations are integrating non-conventional water sources into their water management schemes, with the reuse of reclaimed wastewater (RWW) and desalinated water (DSW) emerging as central pillars.

However, it is unclear to what extent non-conventional water resources (NCWRs) can help reduce the global water deficit in this uncertain situation. But the key challenge is not purely volumetric but also one of governance, economics, technology deployment, regulatory alignment, and social acceptance, all which shape whether NCWRs can be mobilized at the

* Catedrático de Ingeniería Hidráulica, Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba, Ed. Leonardo da Vinci, Campus de Rabanales, 14071 Córdoba. Spain. Tel. +34 957 212 242 / +34 676 660 277 (5853), E-mail: jarodriguez@uco.es

scale needed to contribute meaningfully to closing the water gap by 2030 and beyond. The following sections analyse the state of knowledge, practice, and emerging strategies for water reuse and desalination in agricultural contexts.

2. WATER REUSE

(a) Current use of treated wastewater resources for irrigation at world, European and other key countries levels

Currently, an estimated 36 million hectares, roughly 12% of all irrigated land worldwide, use some form of urban wastewater for irrigation. However, only 15% of this reuse occurs within formal, planned schemes where quality and volume are controlled (Ait-Mouheb et al., 2020). Formalizing these practices is essential not only to capture the agronomic benefits of RWW, such as stable supply and nutrient recycling, but also to mitigate the health and environmental risks associated with waterborne pathogens and soil salinization.

Globally, Jones et al. (2021) estimated total global wastewater production at 380 billion m³/year, of which 63% is collected, and 52% is treated. The formally reused fraction — approximately 40.7 billion m³/year — is distributed unevenly, with the highest absolute and relative volumes concentrated in a small number of countries. This value represents approximately 22% of all treated wastewater produced.

One of the biggest challenges is the availability of data on water reuse from official sources. It is truly difficult to find reliable data on water reuse and the percentage of that reuse allocated to agriculture for different countries. Globally, China and the United States are the leading producers of reclaimed water. However, when it comes to the percentage of these resources reused, Israel leads the way at approximately 90%. Of this amount, the majority is used for agricultural irrigation. The Middle East and North Africa region, despite its small total wastewater volume, achieves relatively high reuse rates driven by acute water scarcity. Southern European countries (particularly Cyprus, Malta, Spain, Italy, France, and Greece) lead within the EU context. Saudi Arabia considers treated wastewater a strategic resource because renewable freshwater availability is extremely limited. In 2025, Saudi Arabia produced 2.18 billion m^3 of TWW, yet over 27% is being reused in agriculture, industry, and landscaping, with 92% allocated to agriculture, representing 4.7% of total agricultural water use.

Spain is the leading EU country in water reuse by volume, accounting for over half of Europe's reclaimed water production, estimated at around 532 hm³/year, or 11% of all treated wastewater. The main destination of reclaimed water in Spain is agriculture (72.4%), followed by parks and gardens (17.2%), industrial processes (2.5%), sewer/street cleaning (2.4%), and others (5%) (INE, 2023). The Spanish Mediterranean regions of Murcia (91.4%) and Valencia (42,5%) (INE, 2023; MITECO, 2021) have the most developed reclaimed water use for irrigation under the stricter European regulation 2020/741/EU. The governance structure involves a complex interaction between the national and basin water plans, river basin authorities, urban wastewater utilities (often private operators), and irrigators' associations as end users.

Overall, treated wastewater reuse is increasingly recognised as a reliable alternative water source that supports agricultural sustainability and reduces dependence on freshwater resources.

(b) Implications for the hydrological cycle. Direct and indirect use of treated wastewater

The adoption of treated wastewater for agricultural irrigation has important implications for

the natural hydrological cycle that are not always adequately considered in project planning or regulatory frameworks. Treated wastewater reuse can occur through both direct and indirect pathways, so it requires a holistic approach that considers interactions among water abstraction, use, return flows, and ecosystem water requirements. A distinction must be made between the following uses:

Direct reuse (DR) of treated wastewater occurs when it is intentionally supplied from treatment plants to users through dedicated transport and distribution networks. This water is intended for end uses such as irrigation, industry, or groundwater recharge via controlled infrastructure. It involves applying reclaimed water directly to crops via surface, sprinkler, or drip irrigation systems. The water that infiltrates the soil and is not consumed by evapotranspiration eventually recharges local and regional aquifers, contributing to baseflow in rivers and streams. When reclaimed water replaces a freshwater source that was previously discharged to a river or aquifer, the net hydrological effect depends on whether the original freshwater abstraction is reduced.

Indirect Reuse (IR) occurs when treated wastewater is discharged into natural systems such as rivers or aquifers and later reused downstream or extracted from wells, where water quality varies due to mixing and environmental conditions. It is the dominant mode of water reuse globally. When urban or agricultural wastewater is treated to secondary level and then discharged into rivers, lakes, or coastal waters, downstream irrigation districts and ecosystems draw on what is essentially highly diluted reclaimed water. In many river basins, a substantial fraction of natural river flow during low-flow periods is in fact treated wastewater effluent. This indirect reuse is sometimes unplanned and unregulated, raising questions about cumulative pharmaceutical loading, nutrient enrichment, microplastics, and antibiotic resistance genes in receiving water bodies (Macedo et al., 2022).

Managed aquifer recharge (MAR) using reclaimed water represents a planned form of indirect reuse that offers multiple benefits: it improves reclaimed water quality through soil-aquifer treatment (SAT), provides a buffer against seasonal variability, and contributes to groundwater replenishment. MAR with reclaimed water for surface and groundwater recharge can enable indirect potable reuse while generating quantifiable economic benefits. However, SAT may not fully remove all contaminants of emerging concern (CECs), including N-nitrosodimethylamine (NDMA) precursors, pharmaceuticals, and some antibiotic resistance genes (Yuan et al., 2017; Declerq et al., 2017). Moreover, monitoring pesticide and herbicide residues is essential to ensure the safe direct or indirect reuse of reclaimed wastewater.

The direct and indirect reuse of treated wastewater has important implications for the hydrological cycle, especially in arid and semi-arid regions where freshwater resources are limited. This reduces withdrawals from rivers, reservoirs, and groundwater aquifers, thereby helping conserve natural freshwater resources and improving long-term water security. Wastewater reuse also augments river flows, replenishes groundwater, and supports ecosystems during dry periods. In many regions, treated wastewater has become an important component of the overall water balance and a reliable non-conventional water source. Wastewater reuse can also influence the hydrological cycle in several ways. Continuous reuse may alter natural flow regimes and reduce the volume of freshwater reaching downstream ecosystems. A critical but often neglected dimension is the reduction of ecological flows when wastewater effluent, which was previously the dominant flow during dry seasons, is diverted for reuse. In semi-arid Mediterranean rivers, treated effluent discharges can constitute the only perennial flow, supporting riparian ecosystems and downstream wetlands. Redirecting this water for irrigation without compensatory measures can have severe ecological consequences, a trade-off that integrated water management frameworks must explicitly resolve.

In agricultural areas, excessive irrigation with treated wastewater may lead to soil salinity, nutrient accumulation, or deterioration of groundwater quality if not properly managed. There is also concern regarding the persistence of emerging contaminants, pathogens, and trace chemicals that may not be fully removed during treatment.

(c) Comparative analysis of regulations for treated wastewater for irrigation at international level

The following section compares different regulatory approaches to the use of reclaimed water and their resulting economic implications, which vary depending on the country in which they are applied.

Risk Management Approaches: Hazards Vs. Risks

The underlying risk management approach fundamentally shapes the design of water reuse policies. At this point, a clear distinction between the terms “hazard” and “risk” should be made. A hazard is any physical, chemical, or biological agent with the potential to cause harm. In contrast, risk refers to the likelihood that a hazard will cause harm within a specified timeframe, including the severity of the consequences (International Organization for Standardization [ISO], 2018; European Food Safety Authority, 2016). When aiming to minimize health risks in agricultural water reuse schemes, policies may focus either on improving water quality by reducing pathogen concentrations through treatment (hazard-based approach), or on limiting human exposure to pathogens present in RWW by assessing and managing exposure pathways (risk-based approach).

The Hazard-Based Approach

The hazard-based approach, exemplified by the California Water Recycling Criteria (California State Water Resources Control Board, 2000), prioritizes eliminating harmful agents at the source. These policies are characterized by “end-of-pipe” compliance, where safety is verified through prescriptive treatment requirements—such as mandatory filtration and disinfection—and rigid quality thresholds.

The primary advantages of this approach are its simplicity of enforcement and its ability to build public trust. By adhering to a binary “pass/fail” logic, these regulations offer clear benchmarks for water utilities. However, this rigidity often leads to “one-size-fits-all” standards that do not account for the specific exposure levels of different agricultural practices, which may be unnecessarily conservative and drive-up treatment costs without a proportional increase in safety (Barlow et al., 2015).

The Risk-Based Approach

In contrast, the risk-based approach, advocated by the World Health Organization Guidelines (WHO, 2006), focuses on managing human exposure rather than strictly improving water quality. This paradigm is based on the “fit-for-purpose” and “multi-barrier” strategies, where safety is achieved through a combination of treatment and field-level interventions. Barriers may include specific irrigation methods (e.g., subsurface drip), buffer zones, or mandatory harvest intervals that allow for the natural die-off of pathogens.

While risk-based models are technically flexible and economically attractive for regions with limited infrastructure, they impose a heavy administrative and governance burden, which makes them difficult to enforce via regulations. Verifying compliance in these schemes is decentralized; it requires monitoring the behaviour of numerous individual farmers rather than the outlet of a single treatment plant. Furthermore, these models can face social hurdles such

as the “yuck factor”, as consumers may perceive the water as less safe if it does not undergo intensive, centralized treatment (Savchenko et al., 2019).

The Hybrid Model

Recognizing the trade-offs of the previous models, recent international milestones such as the Regulation (EU) 2020/741 (European Parliament & Council of the European Union, 2020) and ISO 16075 (ISO, 2020) have adopted a hybrid approach. This model bridges the gap by combining mandatory hazard-based quality benchmarks—to ensure public confidence—with site-specific risk management strategies (e.g., implementing multiple barriers and adapting the quality requirements of RWW to its intended use) that incorporate risk-based flexibility (Maffettone & Gawlik, 2022). Under the EU framework, for instance, RWW must meet minimum quality requirements, but its use is further governed by a Risk Management Plan that identifies additional site-specific hazards and required barriers. In fact, the implementation of effective barriers enables the use of less intensively treated RWW. The hybrid approach aims to reconcile the stringent safety requirements needed for public trust with the operational pragmatism required for farmer adoption.

Economic Implications

Ultimately, the economic sustainability of agricultural water reuse is linked to the chosen regulatory framework. While hazard-based policies provide a clear, treatment-driven safety margin that simplifies compliance through centralized monitoring, their high capital and energy requirements can create a prohibitive financial barrier for small-scale projects lacking economies of scale. Conversely, the operational flexibility of risk-based models often comes at the cost of significantly higher governance and field inspection expenses to ensure distributed barriers remain effective.

As highlighted by Expósito et al. (2024), the disproportionate cost burden on small reuse schemes—nearly double that of large projects—demonstrates that rigid, “one-size-fits-all” standards may inadvertently hamper the use of RWW in decentralized contexts. Therefore, achieving the goals of a circular water economy requires a sophisticated regulatory balance: implementing standards that are stringent enough to safeguard public health and the environment while remaining flexible enough to be economically viable across diverse project scales. In this context, the emergence of hybrid models represents a critical evolution, offering a pathway to reconcile the treatment-driven safety required for public trust with the pragmatic, site-specific management needed for widespread agricultural adoption.

(d) Water-Energy nexus and water costs

The relationship between water and energy is particularly complex in the context of wastewater treatment and reuse. Wastewater treatment plants (WWTPs) are major energy consumers: in Europe, WWTPs account for approximately 1% of total national electricity consumption in most developed countries, with energy intensity varying widely from approximately 0.3 to 1.5 kWh/m³ depending on treatment level, plant size, and technology. For reclaimed water to meet Class A quality under EU 2020/741, the tertiary treatment steps (typically including sand filtration, membrane ultrafiltration, UV disinfection, and sometimes advanced oxidation processes) add additional energy loads. The energy balance of water reuse must also account for conveyance energy, that is, the energy needed to pump and distribute reclaimed water from treatment plants to irrigated fields. On the other hand, larger plants tend to be more energy-intensive but achieve lower energy consumption per m3 due to economies of scale, while smaller rural plants may be less energy-intensive but face higher unit costs (Rodríguez et al., 2019).

The water-energy relationship in WWTPs is not purely one-directional: some plants can recover energy through anaerobic digestion of sewage sludge to produce biogas, which can be used to generate heat and electricity, meeting a significant percentage of the plant's internal energy demand. Membrane bioreactor technology, as evaluated in Granada (Spain) for agricultural reuse of reclaimed water, can simultaneously meet Class A water quality requirements and produce biogas and biostabilised sludge as additional resources within a circular economy framework (Antiñolo et al., 2022).

The economics of water reuse are complex and highly context-dependent, influenced by the required treatment level, the distance and elevation difference between the plant and the irrigated area, the nature of the receiving infrastructure, and the opportunity cost of the displaced freshwater source. A robust economic assessment must consider both direct costs (capital investment in treatment upgrades, storage, and distribution infrastructure) and indirect costs and benefits (health risk management, fertiliser substitution, reduced pressure on conventional sources, environmental services).

A French cost-benefit analysis of two case studies, Clermont-Ferrand (agricultural irrigation reuse) and Cannes (indirect potable reuse via MAR), found that when full social and environmental benefits are monetised, including reduced environmental discharge, avoided freshwater abstraction, and fertiliser substitution, treated wastewater reuse projects can be economically profitable from a societal perspective even when they appear marginally or non-profitable from a narrow utility perspective. The challenge lies in the appropriate allocation of costs and benefits among the multiple actors involved: municipalities, utilities, farmers, downstream water users, and society at large (Declerq et al., 2020).

For Spain, Table 1 presents an estimation of the unit cost of reclaimed water, depending on the water treatment process used.

Table 1. Unit costs of reclaimed water regarding the treatment process

Reclaiming treatment	Costs	
	Set-up €/m³	Operating €/m³
Physical-Chemical + Filtration + Membrane filtration + Residual Chlorine	0.82	0.20
Physical-Chemical + Filtration + Ultraviolet + Residual Chlorine	0.12	0.09
Filtration + Ultraviolet + Residual Chlorine	0.05	0.06
Filtration	0.03	0.06
Physical-Chemical + Filtration + Membrane filtration + Reverse Osmosis+ Residual Chlorine	1.14	0.46
Physical-Chemical + Filtration + Reversible Electrodialysis Residual + Ultraviolet+Residual Chlorine	1.04	0.46

Source: MAPA (2010)

Both reclaiming treatments and the transport and distribution of reclaimed waters involve capital and operating costs. Table 2 shows the figures obtained from the study by Villar-García (2016) where they estimate the capital and operating costs of the production and distribution of reclaimed water in Spain. This study is based on an analysis of projects representing more than 20 % of the total volume of reused water in Spain. It uses the concept of 'annual

equivalent cost' (AEC) as a comparative measure between different systems and treatment processes, which allows for the standardisation of both capital costs and annual operating costs. The average cost of production and distribution is around 1.10 €/m3.

Table 2. Range of unit costs for the production and distribution of reclaimed water in Spain.

	Set-up €/m³	Operation €/m³	AEC €/m³
Reclaimed water production	0.20 – 4.50	0.06 – 0.48	0.08 – 0.84
Reclaimed water distribution	4.00 – 8.00	0.15 – 0.40	0.47 – 1.04
			0.55 – 1.88

Source (Villar-García, 2016)

A study of southeastern Spain found that in greenhouse agriculture, the margin available to absorb increased water costs is substantial, making the premium for reclaimed water (versus conventional groundwater) economically viable (López Serrano et al., 2021). In contrast, for low value rainfed crops, even a modest cost of reclaimed water can be prohibitive without subsidy mechanisms. Policy frameworks should therefore design differentiated tariff structures that reflect value-added by crop type while remaining affordable for small and medium farmers.

(e) Agronomic benefits. Positive fertilisation effects. Spatial and temporal variability of water quality

One of the most frequently cited agronomic advantages of treated wastewater for irrigation is its nutrient content. Reclaimed water from secondary and tertiary treatment typically contains substantial concentrations of nitrogen (as ammonium, nitrate, and organic nitrogen), phosphorus, and potassium, as well as micronutrients and organic matter. In many water reuse systems, these nutrients can offset 20–100% of the synthetic fertiliser requirements of irrigated crops, generating both economic savings for farmers and environmental benefits through reduced synthetic fertiliser production (which is energy-intensive) and reduced risk of nutrient runoff from fields over-fertilised with synthetic products (Alcaide et al., 2019; Poustie et al., 2020).

The relationship between reclaimed water nutrient content and agronomic performance must be nuanced. Nitrogen in treated effluent is primarily in ammoniacal (NH_4) and organic forms, which are mineralized to nitrate in soil over days to weeks, providing a slow-release fertilization effect well-suited to perennial crops such as olives, citrus, and vineyards. Gómez Lucena et al. (2024) demonstrated that nitrification processes also occur inside the pipes in collective irrigation water distribution networks and developed a model to predict the water quality that each farmer receives at their hydrant. Studies of olive groves and vineyards irrigated with reclaimed water in southeastern Spain found that soil organic matter increased significantly, bulk density decreased, and the need for supplemental nitrogen fertilisation was substantially reduced compared to plots irrigated with freshwater (De las Heras & Mañas, 2020). Fish farm effluent water, another non-conventional water source, similarly demonstrated a 25% reduction in mineral nitrogen fertiliser requirements for tomato production in Egypt (Abdelraouf et al., 2024).

However, agronomic benefits must be set against the risk of phytotoxic or accumulation effects associated with specific constituents of reclaimed water. Salinity, expressed as electrical conductivity (EC) and, in the context of soil sodicity, as sodium adsorption ratio (SAR), is a major concern. Secondary- and tertiary-treated municipal effluent typically has an EC of 0.8–2.5 dS/m, which is generally acceptable for most crops under well-managed leaching but

may lead to salinity buildup in poorly drained soils over time. Xenobiotics (pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors, microplastics) are present in reclaimed water at concentrations far below acute phytotoxicity thresholds in most monitored systems. Still, their long-term sub-lethal effects on soil microbiota, crop quality, and human health via food consumption remain areas of active research and regulatory concern (Poustie et al., 2020).

Spatial and temporal variability of reclaimed water quality is a critical management consideration that is often underappreciated in regulatory frameworks and irrigation planning. WWTP effluent quality varies diurnally (reflecting urban activity patterns), seasonally (responding to weather, tourist load, and agricultural chemical discharge), and in response to treatment process disturbances.

Alcaide et al. (2022) proved that changes in N were evident both over time and across an irrigation water distribution network in Southern Spain. Seasonally, N content was reduced during the summer period. Spatially, a clear nitrification occurred from the pumping station to the farms. These variations demonstrate the importance of continuous water quality control to adjust the fertilization plan based on the N content in the water. Also, a comprehensive study of antibiotics, antibiotic-resistant bacteria, and antibiotic resistance genes in a fully reclaimed water distribution system in Spain found significant variations across sampling points and seasons, with bacterial regrowth hotspots identified at storage reservoirs and irrigation emitters. This spatial and temporal variability argues strongly for risk-based management plans that treat the entire water reuse chain as a system, rather than relying solely on effluent quality at the point of WWTP discharge (Cadena-Aponte et al., 2025).

(f) Main Challenges for the implementation

The implementation of treated wastewater (TWW) reuse for irrigation faces several major challenges across technical, environmental, economic, social, and institutional dimensions. The principal challenges for expanding safe agricultural water reuse to its potential level are:

High cost of wastewater treatment, infrastructure development, operation, and maintenance: Advanced treatment technologies are often necessary to achieve water quality standards suitable for agricultural irrigation, particularly for food crops, which can place significant financial pressure on governments and water utilities. In many developing regions, limited funding, aging infrastructure, and insufficient technical expertise further constrain the expansion of wastewater reuse systems. Additionally, Energy-intensive treatment and distribution systems may increase operational costs and environmental impacts.

Bridging the treatment-distribution investment gap: Most existing WWTPs in water-scarce regions require significant upgrading to reliably produce high quality water, and the distribution infrastructure to connect them with farms is largely absent.

Environmental and public health concerns also remain significant challenges: Inadequately treated wastewater may contain pathogens, salts, heavy metals, nutrients, pharmaceuticals, microplastics, and other emerging contaminants that can accumulate in soils, groundwater, and crops. Long-term irrigation with reclaimed water may contribute to soil salinity and degradation if monitoring and management practices are insufficient. Ensuring reliable treatment performance, continuous monitoring, and compliance with water quality standards is therefore essential to minimize environmental and health risks.

Institutional and regulatory barriers such as fragmented governance: inconsistent standards, unclear policies, and weak coordination among water, agriculture, and environmental agencies can delay implementation and reduce operational efficiency.

Developing proportionate and evidence-based CEC regulation: The lack of binding limits for pharmaceuticals, microplastics, and antibiotic resistance genes creates both regulatory uncertainty and genuine risks that need to be managed.

Aligning food safety and water reuse regulation: The interaction between water reuse standards and food safety regulations (particularly for exported fresh produce) creates compliance complexity that deters farmers.

Scaling governance and institutional capacity: Many national and sub-national institutions lack the expertise, resources, and mandate to develop and implement the comprehensive risk management frameworks required under regulations such as EU 2020/741.

Building social acceptance: In many countries, farmers and consumers remain hesitant to use reclaimed water because of concerns about food safety, hygiene, and cultural acceptance. Lack of public awareness and limited trust in treatment systems often create resistance to wastewater reuse projects. The “yuck factor” and food market concerns require sustained, evidence-based communication, transparent monitoring, and participatory governance.

Accounting for hydrological feedback: Planning frameworks must explicitly consider the effects of reclaimed water diversion on environmental flows, downstream water users, and aquifer recharge.

Climatic and operational issues also affect the reliability of treated wastewater reuse: Seasonal variations in wastewater generation and agricultural water demand can create mismatches between supply and irrigation requirements.

Addressing climate change impacts on wastewater quality and quantity: Increasing temperatures, droughts, and extreme rainfall events affect both the volume and quality of wastewater generated, requiring adaptive management strategies.

Therefore, successful implementation requires integrated planning, strong regulatory frameworks, public engagement, reliable monitoring systems, and sustainable financing mechanisms to ensure safe and efficient wastewater reuse for irrigation. Developing holistic strategies to facilitate the adoption of reclaimed water in agriculture is key to its successful implementation, a need highlighted by the SUDOE projects I-ReWater (Huerta et al., 2025) and SOLLAGUA, among others.

(g) How can integrated, interdisciplinary, and territorial approaches contribute to overcoming sociological, economic, and regulatory obstacles?

Integrated water resource management (IWRM) frameworks help coordinate urban, agriculture, health, and environmental sectors to ensure that reclaimed water policies, infrastructure, and monitoring systems are aligned with regional water management objectives and sustainability goals. Such coordination improves decision-making, reduces institutional fragmentation, and supports the development of clear regulatory frameworks and water quality standards.

Interdisciplinary approaches are equally important because wastewater reuse challenges extend beyond engineering and water treatment technologies. Collaboration among hydrologists, agronomists, chemists, economists, public health specialists, sociologists, and policy experts allows for a comprehensive assessment of environmental risks, economic feasibility, public health protection, and social acceptance. For example, social scientists can help identify public concerns and cultural barriers related to reclaimed water use, while economists can evaluate cost-benefit scenarios and financing mechanisms that improve project affordability for farmers and governments. Public awareness campaigns and stakeholder

engagement programs developed through interdisciplinary cooperation have proven effective in improving trust and acceptance of reclaimed water for agricultural irrigation.

Territorial or place-based approaches further enhance wastewater reuse implementation by adapting solutions to local environmental, economic, and social conditions. Water scarcity levels, agricultural practices, infrastructure capacity, and public perceptions vary significantly between regions; therefore, reuse strategies must be tailored to local contexts rather than applying uniform national models. Territorial planning can support the development of decentralized reuse systems, optimize reclaimed water distribution networks, and identify suitable crops and irrigation methods based on local climatic and soil conditions. In addition, involving local communities, farmers, municipalities, and water users in planning and governance processes increases stakeholder ownership and facilitates regulatory compliance.

The multi-dimensional nature of the barriers to water reuse (spanning hydrology, agronomy, economics, public health, governance, and social psychology) makes integrated, interdisciplinary, and territorial approaches necessary. No single sector or discipline can resolve the challenges in isolation. A successful strategic plan for the widespread adoption of TWW should consider the following aspects:

Territorial approaches recognise that water reuse viability is fundamentally a function of spatial relationships: between WWTPs and irrigated land, between water quality produced and water quality needed, and between the governance jurisdictions (municipalities, river basin authorities, irrigators' associations) whose cooperation is required to deploy systems at scale. A territorial planning approach that maps WWTP output spatially against irrigation demand, soil types, crop patterns, and groundwater recharge needs can identify priority zones for investment and governance coordination. In Spain, the concurrence of high wastewater production (tourist areas, urban agglomerations) with adjacent intensive horticulture in the Mediterranean fringe (Murcia, Almería, Alicante) creates ideal territorial conditions for integrated reuse systems, but this requires formal coordination mechanisms between urban water utilities and irrigators' associations (Rodríguez Villanueva & Sauri, 2021; Ventura et al., 2019).

Interdisciplinary research and innovation are required to develop the technical, economic, and social knowledge base for safe reuse expansion. This includes: (i) advancing sensor technologies and real-time monitoring for pathogen and CEC detection; (ii) developing cost-effective tertiary treatment technologies suitable for small and medium WWTPs; (iii) creating quantitative economic models that capture the full suite of social and environmental costs and benefits; (iv) advancing QMRA for site-specific risk management; and (v) applying social science methods to understand risk perception, information gaps, and effective communication strategies (Radini et al., 2021; Carter et al., 2024).

Governance innovation: The EU 2020/741 Regulation's requirement for Water Reuse Risk Management Plans (WRRMPs) that span the entire chain from WWTP to irrigated field creates an institutional mechanism for multi-actor coordination. However, the Regulation's implementation requires active facilitation at the national and regional levels, including the designation of a competent authority, support for small utilities to develop required risk assessments, and the creation of market mechanisms (e.g., tradable reuse certificates, risk insurance) that can reduce financial barriers (Berbel et al., 2023).

Stakeholder engagement and co-design: Building farmer and consumer trust in reclaimed water requires proactive communication grounded in genuine participation, not just information provision. Successful reuse programs — in Israel, California, Spain — share a common feature: farmers and irrigation communities were involved in the design and governance of

reuse systems from an early stage, giving them ownership of safety protocols and economic benefits. Serious games, citizen science monitoring, and digital platforms that make water quality data transparent and accessible to all stakeholders have demonstrated positive effects on social acceptance (Radini et al., 2021).

Circular economy policy frameworks: The transition from a linear to a circular model of water management — in which wastewater is conceptualised as a resource carrying water, nutrients, and energy, rather than a waste to be disposed of — provides the conceptual foundation for policy and investment alignment. Circular economy strategies at international, national, and regional level must explicitly include water reuse as a co-delivery mechanism for achieving SDG 6 (clean water), SDG 12 (responsible consumption and production), and SDG 2 (zero hunger) (Fernandes & Cunha Marques, 2023; Berbel et al., 2023).

Financial and economic instruments: Several policy instruments have demonstrated effectiveness in overcoming economic barriers: (i) capital subsidies for treatment and distribution infrastructure (as in Israel and Spain); (ii) differentiated water pricing that cross-subsidises reclaimed water production from urban water tariffs; (iii) nitrogen and phosphorus credits that monetise the fertiliser substitution value of reclaimed water; and (iv) green bonds and public-private partnership structures that mobilise private capital for reuse infrastructure (Declerq et al., 2020).

3. DESALINATED WATER

(a) Current use of treated desalinated water for irrigation at world, European and other key countries levels

At the outset, desalinated seawater (DSW) was primarily used to meet domestic and industrial water demands worldwide. However, continuous technological improvements and declining production costs have progressively expanded its application to other sectors, particularly agriculture. Over the last two decades, large-scale DSW supply has emerged as a promising alternative for sustaining irrigated agriculture in water-scarce Mediterranean regions characterized by efficient irrigation systems and high-value crops, such as south-eastern Spain, Israel, and Morocco, as well as in insular contexts lacking freshwater resources, including the Canary Islands (Maki et al., 2025; Martínez-Alvarez and Maestre-Valero, 2025). Other countries where agricultural DSW use remains more limited include Italy, Cyprus, Kuwait, Saudi Arabia, Bahrain, Qatar, Oman, and the United States. At the same time, its potential adoption is being actively explored in regions such as Egypt, Tunisia, Chile, Mexico, and Australia, a trend expected to intensify in the near future (Martínez-Alvarez et al., 2018; Suwaileh et al., 2020). The main experiences of irrigation with DSW are outlined below.

In south-eastern Spain, agriculture has historically faced persistent water scarcity, which has intensified over time. During the mid-1990s, farmers responded to a prolonged drought by installing more than 200 brackish-water desalination plants at the farm scale. Continued water deficits, together with the need to sustain high-value agriculture and reduce groundwater overexploitation, led the Spanish government to launch the AGUA Program in 2004. This initiative focused on constructing or upgrading 29 seawater desalination plants along the Mediterranean coast to support agricultural, urban, and tourist demands, with an overall production target of 693 Mm^3/year, of which 200 Mm^3/year were allocated to irrigation (Martínez-Alvarez et al., 2017). Most facilities were based on reverse osmosis technology, in some cases incorporating double-pass systems to reduce boron concentrations for agricultural supplies. Currently, approximately 25% of total DSW production in Spain is used for irrigation, a proportion that rises to about 70% in the south-eastern region, where nine desalination plants supply water fully or partially for agricultural purposes (Figure 1).

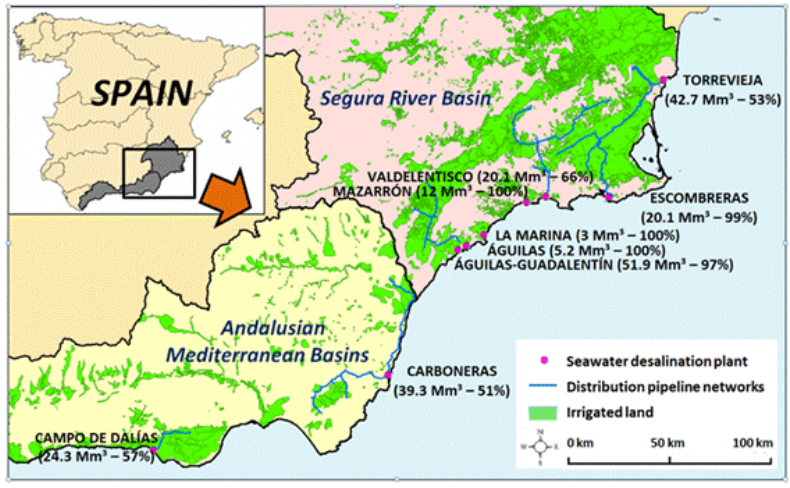


Figure 1. DSW production for irrigation in south-eastern Spain. The figures show the total production and the percentage of agricultural supply at each SWDP. Source: Gallego-Elvira et al. (2021).

In Israel, chronic water scarcity has long encouraged the use of brackish groundwater and reclaimed water for irrigation. Since 2006, DSW has become an increasingly viable alternative. The Israeli Desalination Master Plan, conceived in 1997, aimed to meet domestic water demand by expanding existing facilities and constructing new large-scale desalination plants, ultimately reaching a production capacity of 750 Mm³/year, with around 200 Mm³/year intended for agriculture (Spiritos and Lipchin, 2013). At present, five large-scale reverse osmosis plants are in operation, with agricultural use concentrated mainly in southern regions where lower population density allows greater allocation of desalinated water to farming, particularly from the Ashkelon and Palmachim plants (Fig. 2). Their early experimental applications of DSW in irrigation highlighted several agronomic and environmental challenges that must be addressed when integrating this resource into agricultural systems (Ben-Gal et al., 2009; Yermiyahu et al., 2007).

In Morocco, seawater desalination is already supporting agriculture, especially in arid coastal regions such as Souss-Massa, where export-oriented, high-value crops dominate. A representative case is the Agadir desalination plant, which supplies approximately 40 Mm³/year for irrigation and currently serves between 10,000 and 15,000 hectares of farmland devoted to greenhouse vegetables, citrus, and other horticultural products. Nationwide, around 16 desalination plants produce roughly 350 Mm³/year, with an increasing share allocated to agriculture, contributing to the stabilization of production in drought-prone areas and alleviating pressure on overexploited aquifers (Boutagayout et al., 2025). Looking ahead, Morocco aims to expand its desalination capacity to about 1,700 Mm³/year by 2030, with approximately 30% directed—either directly or indirectly through reuse—toward agriculture, alongside plans to develop up to 100,000 hectares of new irrigated land associated with desalination (Jones et al., 2019).

(b) Water-Energy nexus

From the water–energy nexus perspective, DSW is characterised by the high energy demand associated with both its production and its subsequent transport to irrigated areas



Figure 2. Location and capacity of desalination plants in Israel. The agricultural supply concentrates on southern plants. Source: Martínez Alvarez et al. (2018).

(Zolghadr-Asli et al., 2023). Although reverse osmosis currently represents the most energy-efficient desalination technology in operation, it still requires substantially more energy than conventional water sources, thereby intensifying the water–energy nexus. In south-eastern Spain, total energy consumption for DSW supply is typically between four and ten times higher than that of alternative resources (Martin-Gorriz et al., 2014). Specifically, energy requirements in seawater desalination plants range from 2.77 to 4.10 kWh/m³ for production, with an additional 0.50 to 1.13 kWh/m³ needed for conveyance to irrigation areas (Martínez-Alvarez et al., 2019). Figure 3 shows characteristic values of the specific energy consumption for the different stages of DSW production and supply for irrigation in south-eastern Spain.

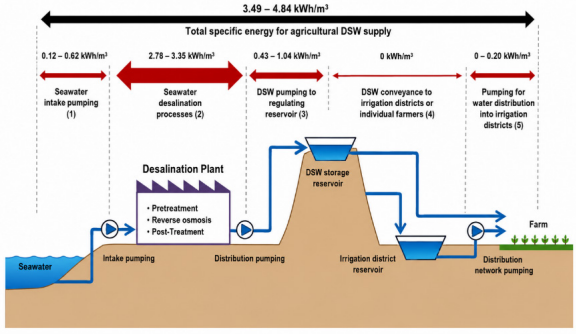


Figure 3. Specific energy for the different stages of DSW production and supply for irrigation in south-eastern Spain. Source: Martínez-Alvarez *et al.* (2019).

Recent desalination plants can achieve specific energy consumption values as low as 1.8–2.2 kWh/m³ for the reverse osmosis stage; however, operational facilities generally exhibit higher values due to the need for extensive pre- and post-treatment processes (Wang et

al., 2025). Energy demands may be further increased in agricultural applications, where additional treatment—such as a second reverse osmosis pass—is often required to reduce boron concentrations to levels suitable for sensitive crops, adding approximately 0.50–0.77 kWh/m³ (Shaffer et al., 2012). In Israel, large-scale desalination plants supplying irrigation report values between 2.9 and 3.85 kWh/m³ (Spiritos and Lipchin, 2013), comparable to those observed in south-eastern Spain when considering intake and desalination stages (Fig. 3). These relatively moderate figures reflect the large capacity and recent commissioning of such facilities, which incorporate advanced membrane technologies and energy recovery systems. Technical factors, including feedwater salinity, target water quality, brine disposal systems, plant capacity, energy recovery efficiency, and membrane type mainly drive variability among plants. Additionally, water distribution at irrigation district and farm scales entails further energy inputs, averaging 0.16 and 0.17 kWh/m³, respectively, in south-eastern Spain (Soto-García et al, 2013).

The substitution of conventional water sources with DSW in irrigated agriculture would therefore significantly increase overall energy consumption, raising important environmental concerns due to associated greenhouse gas (GHG) emissions. The magnitude of these emissions largely depends on each country's electricity mix, but in all cases, higher energy use may shift irrigated agriculture from a net carbon sink to a net emitter, thereby conflicting with climate change mitigation objectives (Martínez Alvarez et al., 2023). Consequently, assessing GHG emissions associated with desalination is essential to evaluating the sustainability of DSW-based irrigated agriculture.

The apparent maladaptation to climate change is closely linked to the carbon intensity of current electricity systems. A progressive transition toward renewable energy sources would substantially alleviate the water–energy nexus and mitigate the carbon footprint associated with the use of desalinated water in agriculture. In this context, recent studies indicate that desalination plants powered by renewable energy could reduce GHG emissions by up to 90%, significantly improving the environmental performance of DSW-dependent irrigation (Shahabi et al., 2014).

(c) Definition of a strategy to specifically meet agricultural needs, both in quantitative and qualitative terms

Irrigation with DSW can be framed within two overarching supply scenarios that determine both its agronomic behaviour and its economic feasibility. The first corresponds to situations in which DSW constitutes the sole or principal water source for irrigation. The second refers to mixed-supply systems, in which DSW is combined with other conventional or non-conventional resources. In the first case, if agricultural requirements are not adequately considered at the design stage of seawater desalination plants, farmers may be exposed to a continuous supply of low-mineral water, which can induce agronomic imbalances, including nutrient depletion and soil chemistry imbalances. In the second case, water quality is inherently variable with seasonal availability and blending ratios among sources, leading to fluctuating physicochemical conditions that require adaptive irrigation and fertigation management. In both scenarios, technical measures can mitigate adverse effects, but they generally transfer part of the responsibility—and additional costs for fertilisation and soil management—to the farmer.

From a strategic perspective, blending water resources is consistently recommended for both agronomic stability and economic optimization. This includes the mixing of conventional and non-conventional sources, such as surface water, groundwater, reclaimed water (REUSE), or even drainage flows, under controlled conditions. Blending helps buffer water quality variability, reduce phytotoxicity risks, and improve nutrient balance, while simultaneously

lowering the effective cost of irrigation water. At present, full reliance on seawater desalination remains largely limited to high-value crops with sufficient economic returns; consequently, blending emerges as the most practical on-farm strategy to broaden its applicability across a broader range of agricultural systems.

Within this framework, a key distinction must be made between new irrigation developments and existing irrigated areas. In new irrigated systems designed around DSW, a detailed pre-assessment of local soil characteristics, crop requirements, and long-term impacts is essential before implementation. This includes evaluating soil salinity dynamics, nutrient management strategies, and the potential need for soil amendments, rootstock selection, or even the introduction of new crop varieties. In such cases, crop selection becomes central, with high-value horticultural species—typically those generating revenues above 2 €/m³ and with relatively low water requirements—being the most viable option. Nevertheless, further research is still required to assess the feasibility of extending DSW irrigation to strategic staple crops such as cereals and fodder. In contrast, in existing irrigated areas DSW plays a fundamentally complementary role, enhancing resilience against increasing water scarcity driven by rising demand and climate change. Here, desalination acts as a stabilising resource that supports established farming systems.

A further distinction concerns the mode of delivery, which can be either direct or indirect. Direct supply refers to the distribution of DSW from plants directly to irrigation networks. In contrast, indirect supply involves its initial allocation to urban uses, followed by regeneration and subsequent reuse in agriculture. In both cases, water quality management remains critical, particularly when integrating sources with contrasting physicochemical characteristics, as farmers must adapt fertigation strategies to maintain crop productivity and soil fertility.

Finally, environmental and system-level considerations reinforce the need for integrated planning. Proper siting, dimensioning, monitoring, and regulation of desalination infrastructure, together with robust intake and discharge design, are essential to minimise ecological impacts. At the same time, a transition towards circular-economy approaches—such as brine valorisation and membrane recycling—may transform part of the environmental burden into local economic opportunities.

(d) Economic model. Desalinated water costs

Because of its high energy requirements, agricultural DSW supply is considerably more expensive than conventional water sources and is therefore priced significantly higher, which often limits its acceptance among farmers (Aznar-Sánchez et al., 2021). These elevated prices can substantially increase crop production costs and, in some cases, jeopardize the economic viability of farms where DSW is the primary or sole water source (Martínez-Alvarez et al., 2023).

The total cost of DSW is highly site-specific and depends on multiple factors, including plant capacity, labour costs, energy sources, land availability, feedwater salinity, and technological development. Overall costs are commonly divided into capital expenditure—associated with the initial investment in seawater desalination plants—and operational and maintenance costs incurred throughout their lifetime. In general terms, these components represent approximately 40% and 60% of total costs, respectively (Lapuente, 2012). However, operational costs are particularly dynamic, as they are largely driven by energy prices, which are inherently volatile, leading to significant fluctuations in the final cost of DSW. Moreover, total costs increase disproportionately when desalination plants operate below full capacity (Ghaffour et al., 2015).

Martinez Alvarez et al. (2019) reported that, at the time of analysis, total reported costs for desalination plants supplying agriculture ranged between 0.50 and 0.66 €/m³ in Israel and

between 0.55 and 0.69 €/m³ in south-eastern Spain. The final cost borne by farmers is even higher due to additional conveyance and distribution expenses, particularly when irrigation areas are located inland or at higher elevations. In south-eastern Spain, these supplementary costs include water transfer from the plants to the irrigation districts (0.04–0.06 €/m³), collective management and allocation within irrigation communities (0.03–0.06 €/m³), and on-farm application costs under localised irrigation systems (approximately 0.02 €/ m³) (Soto-García et al., 2013). At the time of analysis, the prices paid by farmers closely reflected this full cost structure, including applicable fees and taxes, in line with the cost-recovery principle established in the EU Water Framework Directive.

Nevertheless, tensions in global energy markets during 2022–2023 led to a marked increase in the cost of DSW for irrigation, reaching nearly 1 €/m³ in Spain, thereby highlighting the strong sensitivity of desalination economics to energy price volatility. This sudden rise generated significant opposition from farmers and prompted the Spanish government to introduce temporary subsidies, partially relaxing the cost-recovery principle. As a result, recent subsidised DSW prices for irrigation have been maintained in the range of 0.35 to 0.50 €/m³ (Orden Ministerial TED/157/2023).

Figure 4 illustrates the evolution of supply prices for large-scale desalination plants worldwide over the past two decades, showing a clear downward trend from values exceeding 1 $/m³ around the year 2000 to approximately 0.5–0.6 $/m³ in recent years. These values are broadly consistent with those observed in Spain and Israel for agricultural DSW production under stable energy market conditions.

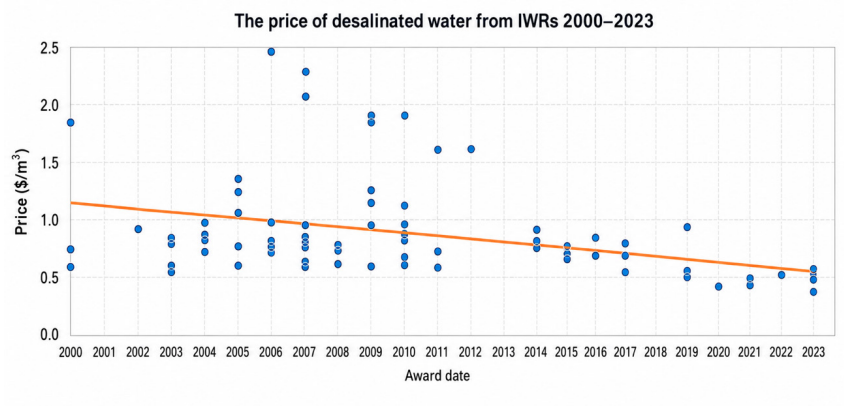


Figure 4. Evolution of DSW price from 2000 to 2023. Source GWI (2023).

(e) Main challenges for the implementation

Technical aspects

Early global experiences with DSW for agriculture consistently highlight its high energy demand, which translates into elevated crop production costs and increased GHG emissions. Reverse osmosis has become the dominant mature technology for seawater desalination, supported by two decades of cost reductions in equipment and operational processes driven by large-scale deployment and energy recovery strategies. Efficiency improvements have reduced specific energy consumption to approximately 3–4 kWh/m³, including intake, pre-treatment, and post-treatment stages, although the potential for further reductions is now relatively limited. Energy planning is therefore central to agricultural DSW deployment, not

only in terms of plant design but also regarding the upstream electricity generation mix and transmission infrastructure (Spiritos and Lipchin, 2013).

Economies of scale play a significant role in DSW supply, as larger plants generally achieve lower unit production costs. However, these facilities are not always compatible with dispersed or small-scale agricultural systems, where extensive distribution networks—pumping stations, pipelines, and associated energy use—become necessary. Consequently, increasing distance and elevation between production sites and irrigated areas significantly raise costs and can compromise project viability (Daghari et al., 2022).

Finally, a key technical aspect of agricultural DSW supply is the reduction of boron concentration. In addition to conventional reverse osmosis, additional treatments such as a second reverse osmosis pass or ion-exchange resins selective for boron are often required to meet crop sensitivity thresholds. These solutions improve water quality but increase both capital and operational costs.

Economic aspects

Cost remains the principal barrier to the widespread adoption of DSW in agriculture, particularly for open-field crops such as Mediterranean horticulture and fruit orchards, as well as for inland irrigated systems where delivery costs further increase already high production prices. As a result, current agricultural DSW use is largely restricted to high-value crops, which can absorb the significantly higher water costs associated with DSW (Maki et al., 2025).

The substitution of traditional water supplies with DSW generally reduces farm profitability and, in some cases, may render production economically unviable, exceeding the financial capacity of many agricultural systems (Martínez-Alvarez et al., 2023). Even with recent cost reductions and optimistic future projections, prices around 0.4-0.5 €/m³ remain challenging for most farmers globally. Although blending desalinated water with other sources can reduce costs, the resulting price typically remains above conventional irrigation water tariffs.

Agronomic aspects

From an agronomic perspective, the chemical composition of DSW introduces several constraints that must be carefully managed to avoid adverse effects on soil and crop productivity (Yermiyahu et al., 2007). Key concerns include the effects of salinity on yield, increased leaching requirements and associated irrigation demand, altered fertilizer requirements due to nutrient composition, boron toxicity risks, and soil alkalinization driven by imbalances between monovalent and divalent cations (Martínez Alvarez et al., 2023).

Post-treatment quality adjustments are therefore often necessary. Increasing calcium and magnesium concentrations helps balance the sodium content of desalinated water, reducing risks of soil sodicity and nutrient deficiencies. Boron removal is particularly critical, as concentrations of 0.7–1.2 mg L^{-1}—common in single-pass reverse osmosis systems—can cause phytotoxicity in sensitive crops such as citrus. In addition, maintaining adequate buffering capacity is essential for stabilizing pH and preventing scaling processes in distribution and fertigation systems (Lahav and Brinhack, 2007).

These agronomic risks can also be partially mitigated through blending DSW with other water sources before irrigation. Nevertheless, establishing formal water quality standards is essential to ensure the physicochemical suitability of the DSW supplied. Such regulation is critical to long-term agricultural sustainability and should be explicitly incorporated into supply contracts for irrigation use.

Environmental aspects

The environmental assessment of desalination for agriculture requires a holistic perspective, as impacts can be both negative and positive (Elimelech and Phillip, 2011). On the negative side, the high energy intensity of desalination contributes to increased GHG emissions, particularly in electricity systems still dominated by fossil fuels. This reinforces the environmental footprint of water supply compared with conventional sources.

Brine disposal is another key concern, particularly in semi-enclosed or shallow marine environments such as the Persian Gulf, where cumulative discharges from multiple plants may lead to ecological degradation. Although engineering solutions such as diffusers and controlled outfalls can mitigate local impacts, the concentration of multiple desalination facilities in restricted coastal areas increases long-term environmental risks (Maki et al., 2025).

On the positive side, desalination can reduce pressure on overexploited freshwater systems, including preventing degradation of aquifers. Overall, environmental impacts depend strongly on-site selection, plant design, regulatory frameworks, and monitoring practices. When properly managed, combining careful environmental assessment with sound engineering design can significantly reduce adverse effects on marine and terrestrial ecosystems.

4. SWOT ANALYSIS FOR THE IMPLEMENTATION OF NON-CONVENTIONAL WATER RESOURCES FOR IRRIGATION

(a) Water Reuse

Strengths

Nutrient-rich resource: Reclaimed water provides nitrogen, phosphorus, potassium, and organic matter that partially replace synthetic fertilisers, reducing production costs and environmental loading from excess fertiliser application (Pustie et al., 2020; Alcaide et al., 2019).

Proximity to demand: In most urban and peri-urban contexts, WWTPs are sited near human settlements, which are also often close to agricultural areas, reducing distribution distances and costs compared to long-distance freshwater transfers.

Year-round availability: Unlike surface water (highly seasonal) or rainfall (episodic), treated wastewater flows are relatively constant throughout the year, providing reliability of supply that is essential for perennial crops and intensive horticulture.

Climate resilience: The availability of reclaimed water is largely decoupled from precipitation variability, making it a climate-resilient water source for agriculture in drought-prone regions.

Progressive regulatory framework: In the case of the European Union, EU 2020/741 provides a clear, harmonised minimum regulatory standard across the EU, providing market certainty and positive investment signals for the water sector.

Circular economy contribution: Water reuse exemplifies the circular economy principle by keeping water (and its embedded nutrients and energy) in productive use rather than discharging it as waste (Fernandes & Cunha Marques, 2023; Johannes et al., 2024).

Proven technology: Treatment technologies (MBR, UV disinfection, ozonation, advanced oxidation) capable of meeting the most stringent reuse standards are commercially available and technically mature (Antiñolo Bermúdez et al, 2022; Ho et al., 2024).

Lower energy than desalination: For most applications and source-to-farm distances, the energy cost of reclaimed water production and delivery is lower than seawater desalination (Crutchik & Campos, 2021)

Weaknesses

Inconsistent quality and temporal variability: WWTP effluent quality fluctuates with treatment process performance, influent variability, seasonal loads (tourism, agriculture, weather), and distribution system conditions, creating management challenges (Alcaide et al., 2022).

Salinity and sodicity risks: Long-term irrigation with reclaimed water can lead to salinity accumulation and sodicity development in soils, especially in low-rainfall regions with limited leaching (Poustie et al., 2020).

Presence of CECs: Pharmaceuticals, microplastics, antibiotic resistance genes, and endocrine disruptors in reclaimed water are not fully regulated or routinely monitored, creating residual risks and market acceptance concerns (Berbel et al., 2023).

Infrastructure investment requirements: Upgrading/building WWTPs and building water distribution networks from WWTPs to farms requires substantial capital that may not be recoverable from water tariffs in the short to medium term (Marcantonio et al., 2025).

Lack of social acceptance: Consumer and farmer resistance to products irrigated with treated wastewater is a major non-technical barrier that is difficult to overcome through information alone (Michetti et al., 2019).

Volume limitations: The total volume of reclaimed water available is capped by urban wastewater production. In many rural or peri-urban areas, wastewater volumes may be insufficient to meet large-scale irrigation demand.

Governance complexity: Multi-actor governance involving water utilities, municipalities, river basin authorities, farmers, food safety agencies, and public health bodies creates coordination challenges and transaction costs (Rodríguez Villanueva & Sauri, 2021).

Inland uses: Water authorities often impose restrictions on water reuse in inland areas located far from the coast, where downstream users rely on the same water resources.

Opportunities

Climate **change-driven demand for alternatives water resources**: Accelerating water scarcity driven by climate change is increasing the economic and policy attractiveness of reclaimed water as a reliable supplement (Ragab, 2023).

Digital technology: Real-time sensor networks, IoT, digital twins, and AI-based process control offer opportunities to improve treatment reliability, reduce costs, and enhance traceability of water quality throughout the reuse chain (Radini et al., 2021).

Nutrient recovery synergies: The co-production of reclaimed water, biogas, and nutrient-rich biosolids from integrated WWTP systems creates multiple revenue streams that can improve the economics of water reuse projects (Antoñolo Bermúdez et al., 2022).

EU Green Deal and Circular Economy Action Plan: EU policy frameworks explicitly support investment in water reuse as part of the circular economy transition, with potential for financing through structural funds, Horizon Europe, and the European Fund for Strategic Investments.

Agricultural policy integration (CAP reform): The Common Agricultural Policy's shift toward conditionality on environmental and resource efficiency performance could incentivise adoption of reclaimed water in water-scarce EU Member States.

Emerging markets: Rapid urbanisation in the MENA, South and Southeast Asia, and sub-Saharan Africa creates new markets for low-cost water reuse technology adapted to local conditions and regulatory environments.

Threats

Regulatory uncertainty around CECs: The absence of clear regulatory limits for CECs at EU and international level creates market uncertainty and potential future liability for farmers and utilities using reclaimed water (Berbel et al., 2023).

Food safety market exclusion: Retailers' refusal to accept products from farms irrigated with reclaimed water, export markets, or food safety certification bodies could undermine the agricultural business case for reuse, even where water quality technically meets standards.

Competition with conventional sources: In seasons or years of high natural water availability, the marginal value of reclaimed waterfalls, undermining the economics of dedicated treatment and distribution infrastructure that requires baseload use to be cost-effective.

Climate change impacts on wastewater quality: Higher temperatures, altered flow patterns, and increased chemical loading from agricultural runoff during extreme events can degrade WWTP effluent quality in ways that challenge treatment systems.

Public opposition: High-profile contamination incidents — even if attributable to lapses in a single system — can undermine public trust in reclaimed water across the sector, triggering regulatory tightening or market rejection.

(b) Desalination

Strengths

Unlimited source water: Seawater is in principle inexhaustible as a freshwater source for coastal regions, providing complete independence from precipitation and hydrological variability (Shemer et al, 2023).

High and consistent water quality: Sea Water Reverse Osmosis (SWRO) produces water with very low TDS (< 500 mg/L), free of pathogens, and of consistent quality regardless of season or upstream conditions, providing a reliable, high-quality agricultural input for sensitive crops.

Proven and scalable technology: SWRO is commercially mature, bankable, and available at scales from a few hundred m^3/day to millions of m^3/day, with a global supply chain for membranes, pumps, and energy recovery devices.

Falling costs and energy consumption: The cost trajectory of SWRO, in the largest modern plants, continues downward as renewable energy, membrane technology, and economies of scale improve (Kurihara, 2021).

Renewable energy integration: Solar and wind-powered desalination can produce freshwater with minimal carbon footprint (0.14–0.19 kg CO_2/m^3), aligning with climate neutrality objectives (Shemer et al., 2023).

Weaknesses

High energy consumption and cost: Despite improvements, SWRO remains more energy-intensive (3.5–4.5 kWh/m³) and costly than most conventional water supply or wastewater reuse options (Politano et al., 2024).

Economic constraints are also critical, as desalinated water remains significantly more expensive than conventional sources. This limits its use mainly to high-value crops (mainly fruit and vegetables) and often requires subsidies to ensure viability.

Brine disposal challenges: The production of a concentrated brine stream poses environmental risks to marine ecosystems (in coastal discharge) or severe management challenges (for inland Brine Water Reverse Osmosis, BWRO, plants).

Coastal location dependency: SWRO is only economically viable near coastlines or near saline water bodies; serving inland agricultural areas requires long-distance conveyance at significant energy and infrastructure cost.

Carbon footprint under conventional energy: When powered by fossil fuels, SWRO desalination has a significant carbon footprint that creates tension with climate objectives (Shelmer et al., 2023).

Land and permitting requirements: Large desalination plants require significant coastal land area and face complex environmental permitting requirements that can delay or prevent construction.

Lack of specific regulations of desalinated seawater supply for agricultural use in most countries.

Opportunities

Offshore desalination: Floating desalination plants and offshore systems can reduce competition for coastal land and simplify brine management in open-water environments.

Hybrid systems: Integration of SWRO with wastewater reuse (brine dilution with reclaimed water, combined brine-wastewater effluent discharge) and with renewable energy creates synergies that reduce both costs and environmental impacts (Crutchik & Campos, 2021).

Brine valorisation: Emerging technologies for recovery of minerals (lithium, magnesium, potassium, uranium) from desalination brine could provide valuable co-products that improve project economics (Politano el at., 2024).

Fit-for-purpose desalination for agriculture: Designing desalination systems specifically for agricultural quality standards (rather than potable standards) reduces agronomic risks and could reduce energy and post-treatment costs if other blending water sources are available, making desalination more economically competitive for irrigation.

Climate change-driven demand increase: As freshwater scarcity worsens in coastal regions due to climate change, desalination's competitive advantage over increasingly unreliable conventional sources will grow.

Threats

Energy price and availability risks: Large-scale desalination creates a structural dependency on affordable and reliable energy; energy price shocks or grid instability can dramatically increase production costs.

Chemical composition of DSW, particularly boron content, which can cause phytotoxicity in sensitive crops if not properly controlled. Additionally, low mineral content and sodium dominance may also lead to soil degradation, nutrient imbalances, or corrosion of infrastructure. These effects can be mitigated through blending or post-treatment, but require careful management (Martínez Álvarez et al., 2023).

Marine ecosystem impacts: Cumulative brine discharge from multiple plants concentrated in semi-enclosed seas (Persian Gulf, Mediterranean) poses long-term risks to marine biodiversity that may trigger regulatory restrictions.

Climate change effects on seawater temperature and quality: Increasing sea surface temperatures accelerate biofouling of membranes and may alter seawater composition in ways that affect treatment efficiency.

Public opposition and social licence: Local communities near planned desalination sites often oppose development due to concerns about coastal impacts, noise, and visual intrusion.

Dependency and lock-in: Societies that become heavily dependent on desalination for water security are exposed to technology lock-in, price risk, and infrastructure vulnerability risks.

Table 3. SWOT for Non-Conventional Water Resources in Agriculture

	STRENGTHS	**WEAKNESSES**
REUSE	Nutrient supply; proximity; year-round availability; circular economy; proven technology; climate resilience	Quality variability; CECs; salinity risk; infrastructure cost; social acceptance; volume cap; inland uses
DESALINATION	Unlimited source; consistent quality; scalability; falling costs; renewable integration; strategic security	Energy intensity; brine management; agricultural quality adaptation; coastal dependency; cost
	OPPORTUNITIES	THREATS
REUSE	EU/Green Deal policy support; digital technology; nutrient recovery; growing water scarcity	CEC regulation uncertainty; market rejection; competition from conventional sources
DESALINATION	Offshore systems; hybrid approaches; brine valorisation; climate-driven demand	Energy price risks; marine ecosystem impacts; public opposition; dependency lock-in

5. CONCLUSIONS

Non-conventional water resources (NCWRs), reclaimed wastewater and desalinated water, represent essential instruments in the transition towards sustainable, climate-resilient water management for food production. Neither source can serve as a wholesale replacement for conventional freshwater, but in strategically defined contexts, particularly in water-scarce coastal and Mediterranean regions, they offer the prospect of substantially closing the growing gap between agricultural water demand and available supply, including NCWRs in the water mix available to agriculture.

On a purely volumetric basis, the potential is enormous but remains largely unrealised. If the approximately 188 billion m³/year of treated wastewater currently generated globally could be fully reused (rather than only the 40.7 billion m³ currently reused), this alone would significantly augment available water supplies, particularly at the basin and regional levels.

Similarly, scaling up desalination to meet agricultural demands (where approximately 2,700 km³/year is withdrawn for irrigation globally according to FAO) would require technological and economic advances of considerable magnitude. NCWRs cannot replace conventional freshwater systems at global scale with current technology and cost structures, but they can play a decisive role in specific geographic and sectoral contexts, particularly in water-scarce coastal regions, Mediterranean-type climates, and arid or semi-arid agricultural zones. The key challenge, therefore, is not purely volumetric but also one of governance, economics, technology deployment, regulatory alignment, and social acceptance.

Water reuse has the greater immediate potential for expansion at the global scale, given the existing infrastructure for wastewater collection and treatment in most developed countries, the proximity of WWTPs to irrigated agricultural areas, and the multiple co-benefits of nutrient supply and the circular economy. The key barriers are economic (infrastructure investment), regulatory (governance alignment, CEC frameworks), and social (public and market acceptance). Integrated, interdisciplinary, and territorial approaches are indispensable for resolving these barriers.

Desalinated seawater (DSW) emerges as a strategic and reliable resource that can decouple agricultural production from hydrological variability and provide a drought-resilient supply. Its application is especially suited to high-value, technologically advanced agricultural systems, where water costs represent a relatively small share of total production and where alternative resources are limited or unavailable.

From a technical and agronomic standpoint, desalination has reached a high level of maturity, with reverse osmosis enabling large-scale production of irrigation-quality water. However, its integration into agriculture requires careful management due to its specific physicochemical characteristics, including low nutrient content and the presence of phytotoxic elements such as boron. These constraints necessitate post-treatment processes, blending strategies, and adapted fertigation practices to ensure soil health and crop productivity. While such measures can effectively mitigate potential risks, they also increase system complexity and operational requirements.

Economic and environmental considerations remain central to the long-term viability of DSW in agriculture. High energy consumption continues to drive production costs and associated GHG emissions, limiting the widespread adoption of this technology beyond high-return crops and regions with supportive policy frameworks. At the same time, the sustainability of desalination depends on factors such as proximity to irrigated areas, energy sources, and the management of environmental impacts, particularly brine disposal.

Overall, desalinated seawater represents a promising but context-dependent solution for agricultural water supply. Its successful implementation requires integrated strategies that combine technological innovation, economic feasibility, agronomic adaptation, and environmental safeguards. In this sense, DSW should not be viewed as a universal substitute for conventional resources, but rather as a complementary component within diversified and resilient water management systems to ensure long-term agricultural sustainability.

6. REFERENCES

Abdelraouf, R.E., Abdou, M.A.A., Bakr, A., Hamza, A.E., Rashad, Y.M., Abd-ElGawad, A.M., Hafez, M.; Ragab, R. 2024. Enhancing Tomato Production by Using Non-Conventional Water Resources within Integrated Sprinkler Irrigation Systems in Arid Regions. Atmosphere, 15, 722.

Ait-Mouheb, N., Mayaux, P.-L., Mateo-Sagasta, J., Hartani, T., & Molle, B. 2020. Water reuse: A resource for Mediterranean agriculture. In Water Resources in the Mediterranean Region (pp. 107–136). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818086-0.00005-4

Alcaide, C., Fernández García, I., González Perea, R., Camacho Poyato, E., Rodríguez Díaz, J.A. 2019. REUTIVAR: Model for Precision Fertigation Scheduling for Olive Orchards Using Reclaimed Water. Water. 11, 2632

Alcaide, C., Fernández García, I., Martín, I. Camacho Poyato, E., Rodríguez Díaz, J.A. 2022. Spatio-temporal analysis of nitrogen variations in an irrigation distribution network using reclaimed water for irrigating olive trees. Agricultural Water Management, 262, 107353

Antiñolo Bermúdez, L., Leyva Díaz, J.C., Martín Pascual, J., Muñío Martínez, M.d.M., Poyatos. 2022 Study of the Potential for Agricultural Reuse of Urban Wastewater with Membrane Bioreactor Technology in the Circular Economy Framework. Agronomy, 12, 1877.

Aznar-Sánchez, J.A, Belmonte-Ureña, L.J, Velasco-Muñoz J.F., Valera, D.L. 2021. Farmers' profiles and behaviours toward desalinated seawater for irrigation: Insights from South-east Spain. Journal of Cleaner Production 296, 126568.

Barlow, S. M., Boobis, A. R., Bridges, J., Cockburn, A., Dekant, W., Hepburn, P., Houben, G. F., König, J., Nauta, M. J., Schuermans, J., & Bánáti, D. 2015. The role of hazard- and risk-based approaches in ensuring food safety. Trends in Food Science & Technology, 46(2), 176–188. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.10.007

Ben-Gal, A., Yermiyahu, U., Cohen, S. 2009. Fertilization and blending alternatives for irrigation with desalinated water. J Environ Qual 2009, 38, 529–36.

Berbel, J., Mesa Pérez, E., Simón, P. 2023. Challenges for Circular Economy under the EU 2020/741 Wastewater Reuse Regulation. Global Challenges, 7, 7: 1-12

Boutagayout, A., Hamdani, A., Boutgayout, I., Adiba, A. 2025. Towards sustainable water management in Morocco: assessing resources, challenges, and adaptation strategies. Frontiers in Sustainable Food Systems, 10, 3389.

Cadena Aponte, F., Plaza Bolaños, P., Agüera, A., Nahim Granados, S., Berruti, I., Abeledo-Lameiro, M.J., Polo López, M.I. 2025. From the Reclaimed Water Treatment Plant to Irrigation in Intensive Agriculture Farms: Assessment of the Fate of Antibiotics, Antibiotic Resistance Bacteria and Genes, and Microbial Pathogens at Real Scale. Environ. Sci. Technol., 59, 19953−19965

California State Water Resources Control Board. 2000. California Water Recycling Criteria (Title 22, Division 4, Chapter 3).

Capilla, J.M. 2022 Study of the Potential for Agricultural Reuse of Urban Wastewater with Membrane Bioreactor Technology in the Circular Economy Framework. Agronomy, 12, 1877.

Carter, L., Dennis, S., Allen, K. et al. 2024. Mitigating Contaminant-Driven Risks for the Safe Expansion of the Agricultural Sanitation Circular Economy in an Urbanizing World. ACS EST Water, 4, 1166−1176

Crutchik, D., Campos, J.L. 2021. Municipal Wastewater Reuse: Is it a Competitive Alternative to Seawater Desalination? Sustainability, 13, 6815.

Daghari, H., Janson, A., & Bouzidi, Y. 2022. Assessment of desalination as an alternative water supply for agriculture in arid regions. Water, 14(6), 1712.

De las Heras, J., Mañas, P. 2020. Reclaimed Wastewater to Irrigate Olive Groves and Vineyards: Effects on Soil Properties. Agronomy 2020, 10, 649

Declercq, R., Loubier, S., Condom, N., Molle, B. 2020. Socio-Economic Interest of Treated Wastewater Reuse in Agricultural Irrigation and Indirect Potable Water Reuse: Clermont-Ferrand and Cannes Case Studies' Cost–Benefit Analysis. Irrig. and Drain., 69 (Suppl. 1): 194–208

Elimelech, M., Phillip, W.A. 2011.The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment. Science, 333, 712–7.

European Food Safety Authority. 2016. Hazard vs. Risk. https://www.efsa.europa.eu/en/discover/infographics/hazard-vs-risk.

European Parliament, & Council of the European Union. 2020. Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the Council on minimum requirements for water reuse. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32020R0741

Expósito, A., Lorenzo Lopez, A. M., & Berbel, J. 2024. How much does reclaimed wastewater cost? A comprehensive analysis for irrigation uses in the European Mediterranean context. Water Reuse, 14(3), 434–447. https://doi.org/10.2166/wrd.2024.040

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2017. Water for Sustainable Food and Agriculture. ISBN 978-92-5-109977-3

Fernandes, E., Cunha Marques, R. 2023. Review of Water Reuse from a Circular Economy Perspective. Water. 15, 848.

Gallego-Elvira, B., Reca, J., Martin-Gorriz, B., Maestre-Valero, J.F. and Martinez-Alvarez, V. 2021. Irriblend-DSW: A decision support tool for the optimal blending of desalinated and conventional irrigation waters in dry regions. Agricultural Water Management, 255, 107012.

Ghaffour, N., Bundschuh, J., Mahmoudi, H., Goosen, M.F.A. 2015. Renewable energy-driven desalination technologies: a comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems. Desalination, 356, 94–114.

Gómez Lucena, I., Camacho Poyato, E., Martín, I. Draissi, K.F., Rodríguez Díaz, J.A. 2024. NITRINET: A predictive model for nitrification in reclaimed water distribution in pressurised irrigation networks. Agricultural Water Management, 302,108982

GWI. 2023. Desalination Markets. Global Water Intelligence (GWI)

Hafez, M.; Ragab, R. 2024. Enhancing Tomato Production by Using Non-Conventional Water Resources within Integrated Sprinkler Irrigation Systems in Arid Regions. Atmosphere, 15, 722.

Ho, J., Ahmadi, J., Hübner, U., Tiehm, A., Drewes, J. 2024. Assuring reclaimed water quality using a multi-barrier treatment train according to the new EU non-potable water reuse regulation. Water Research, 267, 122429

Huerta M, Teijeiro MT, Kurek M, Campos M, Brito da Luz P, Cancela JJ (2025). Analysis of Strategies/ Policies for the Use of Reclaimed Water-SUDOE. I-ReWater project (S1/2.5/E0136). 50 p.. URL: https://hdl.handle.net/10347/40809

INE, 2023.Spanish National Institute of Statistics [WWW Document]. URL https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?tpx=53450

International Organization for Standardization. 2018. ISO 20426: Guidelines for health risk assessment and management for non-potable water reuse.

International Organization for Standardization. 2020. ISO 16075: Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects.

Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T. H., Smakhtin, V., Kang, S. M. 2019. The state of desalination and brine production: A global outlook. Science of The Total Environment, 657, 1343-1356.

Jones, E.R., van Vliet, M.T.H., Qadir, M., Bierkens, M.F.P. 2021. Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse. Earth Syst. Sci. Data, 13, 237–254

Kurihara, M. 2021. Current Status and Future Trend of Dominant Commercial Reverse Osmosis Membranes. Membranes, 11, 906

Lahav, O., Birnhack, L. 2007. Quality criteria for desalinated water following post treatment. Desalination 207, 286–303.

Lapuente, E. 2012. Full cost in desalination. A case study of the Segura River Basin. Desalination, 300, 40–5.

López-Serrano, M.J., Velasco-Muñoz, J.F., Aznar-Sánchez, J.A., Román-Sánchez, I.M. 2021. Economic Analysis of the Use of Reclaimed Water in Agriculture in Southeastern Spain, A Mediterranean Region. Agronomy, 11, 2218.

Macedo, H.E., Lehner, L., Nicell, J., et al. 2022. Distribution and characteristics of wastewater treatment plants within the global river network. Earth Syst. Sci. Data, 14, 559–577

Maffettone, R., & Gawlik, B. M. 2022. Technical Guidance Water Reuse Risk Management for Agricultural Irrigation Schemes in Europe. https://dx.doi.org/10.2760/590804

Maki, A., Pedrero, F., Hafsi, M., Guerber, F. 2025. Desalination for agriculture development: Addressing opportunities and challenges in the context of changing climate and the global agricultural commodity market – Expert consultation workshop report. Tunis, FAO. https://doi.org/10.4060/cd4781en

Marcantonio, C., Mangiagli, G., Boni, M.R., et al. 2025. Are we ready for the application of the EU Regulation on wastewater reuse in agriculture? A techno-economic preliminary evaluation based on a case-study. Journal of Environmental Management. 373, 123973

Martin-Gorriz, B., Soto-García, M., Martínez-Alvarez, V. 2014. Energy and greenhouse-gas emissions in irrigated agriculture of SE (southeast) Spain. Effects of alternative water supply scenarios. Energy, 77, 478–88.

Martínez-Alvarez V., Maestre-Valero J.F., González-Ortega M.J., Gallego-Elvira, V., Martin-Gorriz B. 2019. Characterization of the Agricultural Supply of Desalinated Seawater in Southeastern Spain. Water, 11, 1233.

Martínez-Alvarez, V., González-Ortega, M.J., Martin-Gorriz, B., Soto-García, M., Maestre-Valero, J.F. 2018. Seawater desalination for crop irrigation—Current status and perspectives. Editor(s): Veera Gnaneswar Gude. In: Emerging Technologies for Sustainable Desalination Handbook, Butterworth-Heinemann, 2018, 461-492.

Martínez-Alvarez, V., Imbernón-Mulero, A., Gallego-Elvira, B., Soto-García, M., Maestre Valero, J.F. 2023. Multidisciplinary assessment of the agricultural supply of desalinated seawater in south-eastern Spain. Desalination, 548, 116252.

Martínez-Álvarez, V., Imbernón-Mulero, A., Maestre-Valero, J.F.; Ben Abdallah, S., Gallego-Elvira, B. 2023. Agronomic Analysis of the Replacement of Conventional Agricultural Water Supply by Desalinated Seawater as an Adaptive Strategy to Water Scarcity in South-Eastern Spain. Agronomy,13, 2878.

Martínez-Alvarez, V., M., Maestre-Valero, J.F. 2025. Irrigation with non-conventional water. In Engineering, Water and Food Nexus. Eds. Silva, A., Gonçalves, J.M. World Federation of Engineering Organizations (WFEO), 2025, 117-133.

Martínez-Alvarez, V.; González-Ortega, M.J.; Martin-Gorriz, B.; Soto-García, M.; Maestre-Valero, J. F. 2017. The use of desalinated seawater for crop irrigation in the Segura River basin (South-eastern Spain). Desalination, 422, 153–164.

Michetti, M., Raggi, M., Guerra, E., Viaggi, D. 2019. Interpreting Farmers' Perceptions of Risks and Benefits Concerning Wastewater Reuse for Irrigation: A Case Study in Emilia-Romagna (Italy). Water, 11, 108

MITECO, 2021. National Plan for Water Treatment, Sanitation, Efficiency, Water Conservation and Reuse.

Politano, A., Al-Juboori, R.A., Alnajdi, S. et al. 2024. 2024 roadmap on membrane desalination technology at the water-energy nexus. Journal of Physics Energy, 6, 2

Poustie, A., Yang, Y., Velburg, P., Pagilla, K., Hanigan, D. 2020. Reclaimed wastewater as a viable water source for agricultural irrigation: A review of food crop growth inhibition and promotion in the context of environmental change. Science of the Total Environment. 739, 139756

Radini, S., Marinelli, E., Akyol, Ç. et al., 2021. Urban water-energy-food-climate nexus in integrated wastewater and reuse systems: Cyber-physical framework and innovations. Applied Energy, 298, 117268

Ragab, R. 2023. The global challenges facing the water resources and irrigation sector. 4th African Regional Conference on Geosynthetics (GeoAfrica 2023). E3S Web Conf. 368

Rodríguez-Villanueva, P., Sauri, D. 2021. Wastewater Treatment Plants in Mediterranean Spain: An Exploration of Relations between Water Treatments, Water Reuse, and Governance. Water, 13, 1710

Rodríguez, P., Palma, D., Poch, M., Cugueró-Escofet, M. Á., & Sauri, D. 2019. The geographical context of wastewater treatment and reuse: a benchmarking analysis for Spanish Mediterranean Wastewater Treatment Plants. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 82, 2795, 1–30.

Savchenko, O. M., Kecinski, M., Li, T., & Messer, K. D. 2019. Reclaimed water and food production: Cautionary tales from consumer research. Environmental Research, 170, 320–331. https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2018.12.051

Shaffer, D.L., Yip, N.Y., Gilron, J., Elimelech, M. 2012. Seawater desalination for agriculture by integrated forward and reverse osmosis: improved product water quality for potentially less energy. J Membr Sci 415–416, 1–8.

Shahabi, M.P., McHugh, A., Anda, M., Ho, G. Environmental life cycle assessment of seawater reverse osmosis desalination plant powered by renewable energy. Renew Energy 67, 53–8.

Shemer, H.; Wald, S.; Semiat, R. 2023. Challenges and Solutions for Global Water Scarcity. Membranes, 13, 612

Soto-García, M., Martin-Gorriz, B., García-Bastida, P.A., Alcón F., Martínez-Alvarez, V. 2013. Energy consumption for crop irrigation in a semiarid climate (south-eastern Spain). Energy, 55, 1084–93.

Spiritos E, Lipchin C. 2013. Desalination in Israel. In: Water policy in Israel: context, issues and options. Dordrecht, Netherlands: Springer Publishing, 2013, 101–123.

Suwaileh, W., Johnson, D., Hilal, N. 2020. Membrane desalination and water re-use for agriculture: state of the art and future outlook. Desalination, 491, 114559.

United Nations. 2023. Water Scarcity, the Climate Crisis and Global Food Security: A Call for Collaborative Action. https://www.un.org/en/un-chronicle/water-scarcity-climate-crisis-and-global-food-security-call-collaborative-action

Ventura, D., Consoli., S., Barbagallo, S., et al. 2019. How to Overcome Barriers for Wastewater Agricultural Reuse in Sicily (Italy)? Water, 11, 335.

Villar-García, A. del, 2016. Reutilización de aguas regeneradas: aproximación a los costes de producción y valoración de su uso.(In English: *Reuse of reclaimed water: an analysis of production costs and an assessment of its use*). Agua y Territ. 70–79. https://doi.org/10.17561/at.v0i8.3297

Wang, C., Wang, L., Dong, L., Shon, H.K., Kim, J. 2025. Specific energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants using machine learning. Desalination 602, 118654.

Yermiyahu, U., Tal, A., Ben-Gal, A., Bar-Tal, A., Tarchitzky, J., Lahav, O. 2007, Rethinking desalinated water quality and agriculture. Science, 318, 920–921.

Yuan, J., Van Dyke, M.I., Huck, P.M. 2017. Identification of critical contaminants in wastewater effluent for managed aquifer recharge. Chemosphere. 172: 294-301

Zolghadr-Asli, B., McIntyre, N., Djordjevic, S., Farmani, R., Pagliero, L., Martínez-Alvarez, V., Maestre-Valero, JF. 2023. A review of limitations and potentials of desalination as a sustainable source of water.

1. **Introduction**

2. **Water REUSE**

   (a) Current use of treated wastewater resources for irrigation at world, European and other key countries levels

   (b) Implications for the hydrological cycle. Direct and indirect use of treated wastewater

   (c) Comparative analysis of regulations for treated wastewater for irrigation at international level.

   (d) Water-Energy nexus and water costs.

   (e) Agronomic benefits. Positive fertilisation effects. Spatial and temporal variability of water quality.

   (f) Main Challenges for implementation

   (g) How can integrated, interdisciplinary, and territorial approaches contribute to overcoming sociological, economic, and regulatory obstacles?

3. **Desalinated water**

   (a) Current use of treated desalinated water for irrigation at world, European and other key countries levels

   (b) Water-Energy nexus

   (c) Definition of a strategy to specifically meet agricultural needs, both in quantitative and qualitative terms

   (d) Economic model. Desalinated water costs.

   (e) Main challenges for the implementation

4. **SWOT analysis for the implementation of non-conventional water resources for irrigation.**

   (a) Water Reuse

   (b) Desalination

   (c) Conclusions

   (d) References

QUESTION 68:

EAUX NON CONVENTIONNELLES (RÉUTILISATION, DESSALEMENT) : PEUT-ON RÉELLEMENT DESSERRER L'ÉTAU SUR LA RESSOURCE, ET POUR QUELS USAGES ?

RAPPORT GÉNÉRAL

Prof. Juan Antonio Rodríguez Díaz*
Rapporteur Général

1. INTRODUCTION

Les ressources mondiales en eau douce font face à une pression sans précédent en raison des effets combinés du changement climatique et de l'augmentation de la demande alimentaire (Nations Unies, 2023).

Selon la base de données AQUASTAT de la FAO, environ 307 millions d'hectares de terre est équipée de l'irrigation à l'échelle mondiale. Les besoins totaux en irrigation sont estimés à 1 500 km³ ; ils sont satisfaits par un prélèvement d'environ 2 673 km³ d'eau provenant de ressources renouvelables primaires et secondaires, d'eaux souterraines d'origine fossile et de sources d'eau non conventionnelles. A l'échelle mondiale, l'agriculture reste le principal consommateur d'eau douce, représentant environ 70% de l'ensemble des prélèvements d'eau douce et plus de 80% de l'eau consommée provenant des eaux de surface et souterraines. L'agriculture irriguée, qui couvre environ un quart des terres cultivées de la planète, produit environ 40% de l'alimentation mondiale sur environ un tiers des terres exploitées.

Le changement climatique complique le bilan hydrique en raison de la modification des régimes de précipitations, de l'augmentation des taux d'évapotranspiration, de la réduction les débits des cours d'eau alimentés par les glaciers et de l'augmentation de la fréquence et de la gravité des sécheresses et des inondations. Les régions déjà confrontées à un stress hydrique — notamment le bassin méditerranéen, le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord (MENA), certaines parties de l'Afrique subsaharienne, l'Asie du Sud et l'Amérique du Nord occidentale — subissent les pressions les plus critiques. Dans les zones semi-arides et arides, l'agriculture dépend étroitement de l'irrigation, et la surexploitation des nappes phréatiques est devenue la norme. Dans de nombreux bassins, le prélèvement d'eau dépasse systématiquement les taux de réalimentation naturelle, épuisant ainsi des aquifères qui avaient besoin des millénaires pour se remplir. Les projections indiquent que la production alimentaire mondiale devra augmenter de 60% d'ici 2050 pour satisfaire les besoins d'une population croissante (FAO, 2017), un défi auquel les pays sont déjà confrontés dans des régions telles que le bassin méditerranéen et l'Afrique du Nord. On a connu une réduction de la disponibilité en eau par habitant de 12 050 m³/an en 1950 à environ 7 310 m³/an en 2000 et qu'elle devrait atteindre seulement 4 580 m³/an d'ici 2050, soit une réduction de 62% en un seul siècle, tandis que la consommation mondiale totale d'eau devrait augmenter de 50% (Ragab, 2023 ; Shemer et al, 2023).

* Catedrático de Ingeniería Hidráulica, Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba, Ed. Leonardo da Vinci, Campus de Rabanales, 14071 Córdoba. Spain. Tel. +34 957 212 242 / +34 676 660 277 (5853), E-mail: jarodriguez@uco.es

En réponse à cette situation, de nombreux pays intègrent des sources d'eau non conventionnelles dans leurs programmes de gestion de l'eau, la réutilisation des eaux usées recyclée (RWW) et le dessalement de l'eau de mer (DSW) étant devenue une force majeure.

Cependant, il est difficile de déterminer dans quelle mesure ces ressources en eau non conventionnelles (NCWR) peuvent contribuer à réduire le déficit hydrique mondial dans ce contexte d'incertitude. Le principal défi ne se limite pas au volume, mais concerne également la gouvernance, l'économie, le déploiement technologique, l'alignement réglementaire et l'acceptation sociale, autant de facteurs qui déterminent si les NCWR peuvent être mobilisées à l'échelle requise pour contribuer de manière significative à combler le déficit hydrique d'ici 2030 et au-delà. Les sections suivantes analysent l'état des connaissances, les pratiques et les stratégies émergentes en matière de réutilisation de l'eau et de dessalement dans les contextes agricoles.

2. RÉUTILISATION DE L'EAU

(a) Utilisation actuelle des ressources en eaux usées traitées pour but d'irrigation à l'échelle mondiale, européenne et d'autres pays clés.

Actuellement, on estime qu'une superficie de 36 millions d'hectares de terre, soit environ 12% de l'ensemble des terres irriguées du monde, utilisent une forme ou une autre des eaux usées urbaines pour but d'irrigation. Cependant, seule une fraction de 15% de cette réutilisation s'inscrit dans le cadre de systèmes formels et planifiés où la qualité et les volumes sont contrôlés (Ait-Mouheb et al., 2020). Il est nécessaire de formaliser ces pratiques non seulement pour tirer les avantages agronomiques des RWW, tels que l'approvisionnement stable et le recyclage des nutriments, mais aussi pour atténuer les risques pour la santé et l'environnement associés aux agents pathogènes d'origine hydrique et à la salinisation des sols.

À l'échelle mondiale, Jones et al. (2021) ont donné l'estimation de la production totale d'eaux usées de 380 milliards de m³/par an, dont 63% sont recueillies et 52% traitées. La partie formellement réutilisée — environ 40,7 milliards de m³/par an — est répartie de manière inégale, les volumes absolus et relatifs les plus élevés étant concentrés dans un petit nombre de pays. Cette valeur représente environ 22% de toutes les eaux usées traitées produites.

L'un des plus grands défis est la disponibilité de données sur la réutilisation de l'eau provenant des sources officielles. Il est vraiment difficile de rechercher des données fiables concernant la réutilisation de l'eau et le pourcentage de cette réutilisation alloué à l'agriculture dans différents pays. À l'échelle mondiale, la Chine et les États-Unis sont les principaux producteurs d'eaux recyclées. Cependant, en ce qui concerne le pourcentage de ces ressources réutilisées efficacement, Israël est en tête avec un taux d'environ 90%. De ce montant, la plupart d'eau est utilisée pour but d'irrigation agricole. Malgré un volume total d'eaux usées relativement faible, la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord, affiche des taux de réutilisation relativement élevés, car ces pays font face à une pénurie grave de l'eau. Les pays d'Europe du Sud (notamment Chypre, Malte, l'Espagne, l'Italie, la France et la Grèce) se trouvent en tête dans le contexte de l'UE. En Arabie saoudite, les eaux usées traitées sont des ressources stratégiques, étant donné la disponibilité extrêmement limitée des eaux douces renouvelables. En 2025, l'Arabie saoudite a généré 2,18 milliards de m³ d'eaux usées traitées; plus de 27% de ce volume était réutilisé dans l'agriculture, l'industrie et l'aménagement paysager — dont 92% était allouée à l'agriculture, ce qui représentait 4,7% de la consommation totale d'eau agricole.

L'Espagne est le premier pays de l'UE qui réutilise l'eau en termes de volume, représentant plus de la moitié de la production européenne d'eau recyclée, estimée à environ 532 hm³/an, soit 11% de l'ensemble des eaux usées traitées. En Espagne, l'agriculture (72,4%) est la principale consommatrice de l'eau recyclée, suivie des parcs et jardins (17,2%), des procédés industriels (2,5%), du nettoyage des égouts/rues (2,4%) et autres (5%) (INE, 2023). Les régions méditerranéennes espagnoles de Murcie (91,4%) et de Valence (42,5%) (INE, 2023 ; MITECO, 2021) utilisent le niveau le plus élevé des eaux recyclées pour but d'irrigation en vertu du Règlement européen 2020/741/UE, plus strict. La structure de gouvernance implique une interaction complexe entre les plans d'eau nationaux et des bassins versants, les autorités de bassin versant, les services publics des eaux usées urbaines (souvent des opérateurs privés) et les associations d'irrigants en tant qu'utilisateurs finaux.

Dans l'ensemble, la réutilisation des eaux usées traitées est de plus en plus reconnue comme une source d'eau alternative fiable qui soutient la durabilité agricole et réduit la dépendance envers les ressources en eau douce.

(b) Impacts sur le cycle hydrologique. Utilisation directe et indirecte des eaux usées traitées.

L'adoption des eaux usées traitées pour but d'irrigation agricole exerce des impacts sur le cycle hydrologique naturel, qui ne sont pas toujours suffisamment prises en compte de manière adéquate lors de la planification des projets ou dans les cadres réglementaires. La réutilisation des eaux usées traitées pouvant s'effectuer par des voies directes et indirectes, elle nécessite une approche globale prenant en compte les interactions entre le prélèvement d'eau, l'utilisation, les débits recyclés et les besoins en eau des écosystèmes. Il convient de distinguer les usages suivants :

La réutilisation directe (RD) des eaux usées traitées se produit lorsqu'elles sont intentionnellement fournies par les stations d'épuration aux utilisateurs via des réseaux de transport et de distribution dédiés. Cette eau est destinée à des utilisations définitives telles que l'irrigation, l'industrie ou la réalimentation des nappes phréatiques via une infrastructure contrôlée. Il s'agit d'appliquer l'eau recyclée directement aux cultures via des systèmes de surface, par aspersion ou d'irrigation goutte à goutte. L'eau qui s'infiltre dans le sol et n'est pas consommée par l'évapotranspiration finit par réalimenter les aquifères locaux et régionaux, contribuant ainsi au débit de base des rivières et des courants. Lorsque l'eau recyclée remplace une source d'eau douce qui a été précédemment déversée dans une rivière ou un aquifère, l'effet hydrologique net dépend de la réduction ou non du prélèvement initial d'eau douce.

La réutilisation indirecte (RI) se produit lorsque les eaux usées traitées sont déversées dans des systèmes naturels tels que les rivières ou les aquifères, puis réutilisées en aval ou prélevées de puits, où la qualité de l'eau varie en fonction du mélange et des conditions environnementales. Il s'agit du mode dominant de réutilisation de l'eau à l›échelle mondiale. Lorsque les eaux usées urbaines ou agricoles subissent un traitement secondaire avant d'être déversées dans des rivières, des lacs ou des eaux côtières, les périmètres irrigués et les écosystèmes situés en aval puisent essentiellement de ce qui est de l'eau recyclée fortement diluée. Dans de nombreux bassins versants, une partie importante du débit naturel des cours d'eau en période d'étiage est constituée d'effluents d'eaux usées traitées. Cette réutilisation indirecte est parfois non planifiée et non réglementée, ce qui soulève des questions quant à la charge cumulative pharmaceutiques, à l'enrichissement en nutriments, à la présence de microplastiques et de gènes de résistance aux antibiotiques dans les masses d'eau réceptrices (Macedo et al., 2022).

Réalimentation des aquifères gérés (MAR) utilisant de l'eau recyclée représente une forme planifiée de réutilisation indirecte qui offre de multiples avantages : elle améliore la qualité de l'eau recyclée grâce au traitement des sols et des aquifères (SAT), fournit un tampon contre la variabilité saisonnière et contribue à la réalimentation des réserves des eaux souterraines. La MAR avec de l'eau recyclée pour la réalimentation des eaux de surface et souterraines peuvent permettre une réutilisation indirecte de l'eau potable tout en générant des avantages économiques quantifiables. Cependant, le traitement des sols et des aquifères (SAT) peut ne pas éliminer complètement tous les contaminants de préoccupation émergente (CEC), y compris les précurseurs de la N-nitrosodiméthylamine (NDMA), les produits pharmaceutiques et certains gènes de résistance aux antibiotiques (Yuan et al., 2017; Declerq et al., 2017). En outre, la surveillance des résidus de pesticides et d'herbicides est essentielle pour garantir la réutilisation directe ou indirecte des eaux usées recyclées.

La réutilisation directe et indirecte des eaux usées traitées exerce des impacts importants sur le cycle hydrologique, en particulier dans les régions arides et semi-arides où la disponibilité des ressources en eau douce est limitée. Cette pratique réduit les prélèvements des rivières, des réservoirs et des aquifères souterrains, contribuant ainsi à préserver les ressources naturelles en eau douce et à améliorer la sécurité hydrique à long terme. La réutilisation des eaux usées augmente également le débit fluvial, réalimente les nappes phréatiques et soutient les écosystèmes pendant les périodes sèches. Dans de nombreuses régions, les eaux usées traitées sont devenues un élément important du bilan hydrique global ainsi qu'une source fiable d'eau non conventionnelle. La réutilisation des eaux usées peut également influencer le cycle hydrologique de plusieurs façons. La réutilisation continue peut modifier les régimes d'écoulement naturels et réduire le volume d'eau douce atteignant les écosystèmes en aval. Une dimension critique mais souvent négligée est la réduction des débits écologiques lorsque les effluents d'eaux usées, qui étaient auparavant le débit dominant pendant les saisons sèches, sont détournés vers des fins de réutilisation. Dans les rivières semi-arides méditerranéennes, le déversement d'effluents traités peuvent constituer le seul débit pérenne, soutenant les écosystèmes fluviaux et les zones humides en aval. La réorientation de cette eau vers l'irrigation sans mesures compensatoires peut avoir de graves conséquences écologiques, un compromis que les cadres de gestion intégrée de l'eau doivent résoudre explicitement.

Dans les zones agricoles, une irrigation excessive en utilisant des eaux usées traitées peut entraîner la salinité du sol, l'accumulation de nutriments ou la détérioration de la qualité des eaux souterraines si elle n'est pas correctement gérée. La persistance de contaminants émergents, d'agents pathogènes et de produits chimiques qui peuvent ne pas être totalement éliminées lors du traitement est également préoccupante.

(c) Analyse comparative des réglementations relatives aux eaux usées traitées pour but d'irrigation à l'échelle internationale.

La section suivante compare différentes approches réglementaires de l'utilisation des eaux recyclées et leurs impacts économiques qui en résultent, qui varient selon le pays dans lequel elles sont appliquées.

Approches de la gestion des risques : dangers Vs. risques

L'approche sous-jacente de la gestion des risques façonne de manière fondamentale la conception des politiques de réutilisation de l'eau. À ce stade, il convient de distinguer clairement entre les termes «danger» et «risque». Un danger est tout agent physique, chimique ou biologique susceptible de causer des dommages. En revanche, le risque fait référence à la probabilité qu'un danger cause des dommages dans un délai spécifié, y compris la gravité des conséquences (Organisation internationale de normalisation [ISO],

2018 ; Autorité européenne de sécurité des aliments, 2016). Lorsque les politiques visent à minimiser les risques pour la santé dans les programmes de réutilisation de l'eau agricole, elles peuvent se concentrer soit sur l'amélioration de la qualité de l'eau en réduisant les concentrations d'agents pathogènes grâce au traitement (approche basée sur les dangers), soit sur la limitation de l'exposition humaine aux agents pathogènes présents dans les eaux usées recyclées (RWW) en évaluant et en gérant les voies d'exposition (approche basée sur les risques).

Approche basée sur les dangers

L'approche basée sur le danger, illustrée par les critères de recyclage de l'eau en Californie (California State Water Resources Control Board, 2000), donne la priorité à l'élimination des agents nocifs à la source. Ces politiques se caractérisent par une conformité «en bout de chaîne», où la sécurité est vérifiée par des exigences de traitement normatif - telles que la filtration et la désinfection obligatoires - et des seuils de qualité rigides.

Les principaux avantages de cette approche sont sa simplicité d'application et sa capacité à gagner la confiance du public. En adhérant à une logique binaire «réussite/échec», ces réglementations offrent des références claires pour les services publics de l'eau. Cependant, cette rigidité conduit souvent à des normes «universelles» qui ne tiennent pas compte des niveaux d'exposition spécifiques des différentes pratiques agricoles, ce qui peut s'avérer inutilement conservateur et entraîner des coûts de traitement élevés sans augmentation proportionnelle de la sécurité (Barlow et al., 2015).

Approche basée sur les risques

En revanche, l'approche basée sur le risque, préconisée par les directives de l'Organisation mondiale de la santé (OMS, 2006), met l'accent sur la gestion de l'exposition humaine plutôt que sur l'amélioration stricte de la qualité de l'eau. Ce paradigme est basé sur les stratégies «adapté à l'usage» et «obstacles multiples», où la sécurité est atteinte grâce à une combinaison de traitements et d'interventions sur le terrain. Les obstacles peuvent inclure des méthodes d'irrigation spécifiques (par exemple, goutte-à-goutte souterrain), des zones tampons ou des intervalles de récolte obligatoires qui permettent l'élimination naturelle des agents pathogènes.

Bien que les modèles basés sur le risque soient techniquement flexibles et présentent un intérêt économique pour les régions ayant des infrastructures limitées, ils imposent une lourde charge administrative et de gouvernance, ce qui les rend difficiles à appliquer via des réglementations. La vérification de la conformité à ces programmes est décentralisée; elle exige que l'on surveille le comportement de nombreux exploitants individuels plutôt que celui d'une seule station d'épuration. En outre, ces modèles peuvent faire face à des obstacles sociaux tels que le «facteur de répulsion**»** (ou *yuck factor*), car les consommateurs peuvent percevoir l'eau comme moins sûre si elle ne subit pas un traitement intensif et centralisé (Savchenko et al., 2019).

Modèle hybride

Tout en reconnaissant les compromis des modèles précédents, de récents **événements marquants** internationaux tels que le règlement (UE) 2020/741 (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2020) et ISO 16075 (ISO, 2020) ont adopté une approche hybride. Ce modèle comble l'écart en combinant des critères de qualité obligatoires bas**és sur les dangers -** afin d'assurer la confiance du public - avec des stratégies de gestion des risques spécifiques au site (par exemple, en mettant en œuvre plusieurs barrières et en adaptant les exigences de qualité des eaux usées recyclée (RWW) à son utilisation prévue)

qui intègrent une flexibilité basée sur les risques (Maffettone & Gawlik, 2022). Dans le cadre de l'UE, par exemple, les eaux usées recyclée (RWW) doivent répondre à des exigences minimales de qualité, mais leur utilisation est également régie par un plan de gestion des risques qui identifie les dangers supplémentaires spécifiques au site et les obstacles requis. En fait, la mise en place d'obstacles efficaces permet l'utilisation de RWW moins intensivement traitées. L'approche hybride vise à concilier les exigences strictes de sécurité nécessaire à la confiance du public avec le pragmatisme opérationnel requis pour l'adoption de ces pratiques par les agriculteurs.

Conséquences économiques

En fin de compte, la durabilité économique de la réutilisation de l'eau agricole est liée au cadre réglementaire retenu. Bien que les politiques basées sur les dangers offrent une marge de sécurité claire, axée sur le traitement, qui simplifie la conformité grâce à une surveillance centralisée, leurs exigences élevées en matière de capital et d'énergie peuvent créer une barrière financière prohibitive pour les projets à petite échelle dépourvus d'économies d'échelle. À l'inverse, la flexibilité opérationnelle des modèles basés sur les risques se fait souvent au prix de dépenses plus élevées de gouvernance et d'inspection sur le terrain pour garantir que les obstacles distribués restent efficaces.

Comme le soulignent Exposito et al. (2024), la charge de coûts disproportionnée sur les petits projets de réutilisation - près du double de celle des grands projets - démontre que des normes rigides et «universelles» peuvent involontairement entraver l'utilisation des RWW dans des contextes décentralisés. Par conséquent, la réalisation des objectifs d'une économie de l'eau circulaire nécessite un équilibre réglementaire sophistiqué : la mise en œuvre des normes suffisamment strictes pour protéger la santé publique et l'environnement tout en restant suffisamment flexibles pour être économiquement viables à travers diverses échelles de projet. Dans ce contexte, l'émergence de modèles hybrides représente une évolution critique, offrant une voie pour concilier la sécurité basée sur le traitement requise pour la confiance du public avec la gestion pragmatique et spécifique au site nécessaire à une adoption agricole généralisée.

(d) Lien entre eau-énergie et coûts de l'eau.

La relation entre l'eau et l'énergie est particulièrement complexe dans le contexte du traitement et de la réutilisation des eaux usées. Les stations d'épuration des eaux usées (WWTP) sont de grands consommateurs d'énergie : en Europe, elles représentent environ 1% de la consommation nationale totale d'électricité dans la plupart des pays développés, avec une intensité énergétique très variable allant d'environ 0,3 à 1,5 kWh/m³ selon le niveau de traitement, la taille de l'usine et la technologie utilisée. Pour que l'eau recyclée atteigne la qualité de classe A selon UE 2020/741, les étapes de traitement tertiaire (généralement la filtration sur sable, l'ultrafiltration sur membrane, la désinfection par UV et parfois des procédés d'oxydation avancés) entraînent une consommation énergétique supplémentaire. Le bilan énergétique de la réutilisation de l'eau doit également prendre en compte l'énergie de transport, c'est-à-dire l'énergie nécessaire pour pomper et distribuer l'eau recyclée depuis les stations d'épuration jusqu'aux champs irrigués. D'autre part, les grandes installations ont tendance à être plus énergivores mais atteignent une consommation d'énergie plus faible par m^3 en raison des économies d'échelle, tandis que les petites installations rurales peuvent être moins énergivores mais faire face à des coûts unitaires plus élevés (Rodríguez et al., 2019).

La relation entre eau-énergie dans les stations d'épuration des eaux usées (WWTP) n'est pas purement unidirectionnelle : certaines installations peuvent récupérer de l'énergie grâce à la digestion anaérobie des boues d'épuration pour produire du biogaz, qui peut être utilisé pour générer de la chaleur et de l'électricité, répondant ainsi à un pourcentage significatif de la

demande énergétique interne de l'installation. La technologie des bioréacteurs à membrane, telle qu'évaluée à Grenade (Espagne) pour la réutilisation agricole de l'eau recyclée, peut simultanément répondre aux exigences de qualité de l'eau de classe A et produire du biogaz et des boues biostabilisées comme ressources supplémentaires dans un cadre d'économie circulaire (Antiñolo et al., 2022).

Les aspects économiques de la réutilisation de l'eau sont complexes et dépendent fortement du contexte; ils sont influencés par le niveau de traitement requis, la distance et la différence d'altitude entre l'installation et la zone irriguée, la nature des infrastructures de réception ainsi que le coût d'opportunité de la source d'eau douce déplacée. Une évaluation économique rigoureuse doit prendre en compte à la fois les coûts directs (investissements pour la modernisation des traitements, le stockage et les infrastructures de distribution) et les coûts et bénéfices indirects (gestion des risques en matière de santé, substitution d'engrais, réduction de la pression sur les sources conventionnelles, services environnementaux).

Une analyse coût-bénéfice française portant sur deux études de cas, Clermont-Ferrand (réutilisation de l'irrigation agricole) et Cannes (réutilisation indirecte de l'eau potable via la MAR), a révélé que lorsque tous les avantages sociaux et environnementaux sont monétisés, y compris la réduction des déversements dans l'environnement, l'évitement de prélèvements d'eau douce, et la substitution des engrais, les projets de réutilisation des eaux usées traitées peuvent être économiquement rentables d'un point de vue sociétal, même lorsqu'ils apparaissent peu ou pas rentables strictement d'un point de vue de service public. Le défi réside dans l'allocatiom appropriée des coûts et des bénéfices entre les acteurs multiples impliqués : municipalités, services publics, agriculteurs, utilisateurs d'eau en aval et la société dans son ensemble (Declerq et al., 2020).

Pour l'Espagne, le Tableau 1 présente une estimation du coût unitaire de l'eau recyclée, en fonction du procédé de traitement de l'eau utilisé.

Tableau 1. Coûts unitaires de l'eau recyclée concernant le processus de traitement

Traitement de recyclage	Coûts	
	Installation €/m³	Exploitation €/ m³
Physico-chimique + filtration + filtration sur membrane + chlore résiduel	0,82	0,20
Physico-chimique + filtration + ultraviolet + chlore résiduel	0,12	0,09
Filtration + ultraviolet + chlore résiduel	0,05	0,06
Filtration	0,03	0,06
Physico-chimique + filtration + filtration sur membrane + osmose inverse + chlore résiduel	1,14	0,46
Physico-chimique + filtration + électrodialyse réversible résiduelle + ultraviolet + chlore résiduel	1,04	0,46

Source: MAPA (2010)

Les traitements de recyclage ainsi que le transport et la distribution des eaux recyclée impliquent des coûts d'investissement et d'exploitation. Le Tableau 2 présente les chiffres obtenus à partir de l'étude menée par Villar-García (2016) où ils évaluent les coûts en capital et d'exploitation de la production et de la distribution d'eau recyclée en Espagne. Cette

étude se base sur une analyse de projets représentant plus de 20% du volume total d'eau réutilisée en Espagne. Elle utilise le concept de «coût annuel équivalent» (AEC) comme une mesure comparative des différents systèmes et processus de traitement, ce qui permet la normalisation des coûts en capital et des coûts d'exploitation annuels. Le coût moyen de production et de distribution s'élève à environ 1,10 €/m³.

Tableau 2. Eventail des coûts unitaires de production et de distribution d'eau recyclée en Espagne.

	Installation €/m³	Exploitation €/m³	AEC (coût annuel équivalent) €/m³
Production d'eau recyclée	0,20 – 4,50	0,06 – 0,48	0,08 – 0,84
Distribution d'eau recyclée	4,00 – 8,00	0,15 – 0,40	0,47 – 1,04
			0,55 – 1,88

Source (Villar-García, 2016)

Une étude menée au sud-est de l'Espagne a révélé que dans le secteur de l'agriculture sous serre, la marge disponible pour absorber l'augmentation des coûts de l'eau est considérable, ce qui rend la prime pour l'eau recyclée (par rapport aux eaux souterraines conventionnelles) économiquement viable (López Serrano et al., 2021). En revanche, pour les cultures pluviales à faible valeur ajoutée, même un coût modéré de l'eau recyclée peut s'avérer prohibitif dans l'absence de mécanismes de subvention. Les cadres politiques devraient donc prévoir des structures tarifaires différenciées qui reflètent la valeur ajoutée selon le type de culture, tout en restant abordables pour les petits et moyens agriculteurs.

(e) Avantages agronomiques. Effets positifs de fertilisation. Variabilité spatiale et temporelle de la qualité de l'eau.

L'un des avantages agronomiques les plus fréquemment cités de l'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation est leur teneur en nutriments. Les eaux recyclées provenant de traitements secondaire et tertiaire contiennent généralement des concentrations considérables d'azote (sous forme d'ammonium, de nitrate et d'azote organique), de phosphore et de potassium, ainsi que de micronutriments et de matières organiques. Dans de nombreux systèmes de réutilisation de l'eau, ces nutriments peuvent compenser 20–100% des besoins en engrais synthétiques des cultures irriguées, générant à la fois des économies pour les agriculteurs et des avantages environnementaux grâce à une production réduite d'engrais synthétiques (qui consomme beaucoup d'énergie) et un risque réduit de l'écoulement de nutriments provenant des parcelles trop fertilisées avec des produits synthétiques (Alcaide et al., 2019; Poustie et al., 2020).

La relation entre la teneur en nutriments de l'eau recyclée et la performance agronomique doit être nuancée. L'azote présent dans les effluents traités se trouve principalement sous forme ammoniacale (NH_4) et organique, qui sont minéralisés en nitrate dans le sol sur une période allant de quelques jours à quelques semaines, offrant un effet de fertilisation à diffusion lente bien adaptée aux cultures pérennes telles que les olives, les agrumes et les vignobles. Gómez Lucena et al. (2024) ont démontré que les processus de nitrification se produisent également à l'intérieur des tuyaux des réseaux collectifs de distribution d'eau d'irrigation et ont développé un modèle pour prédire la qualité de l'eau que chaque agriculteur reçoit à sa prise d'eau. Des études menées sur des oliveraies et des vignobles irrigués avec des eaux recyclées au sud-est de l'Espagne ont révélé une augmentation significative de la matière organique du sol, une diminution de la densité apparente et une réduction considérable des besoins en fertilisation azotée supplémentaire par rapport aux parcelles irriguées avec l'eau

douce (De las Heras & Mañas, 2020). Les effluents de pisciculture, une autre source d'eau non conventionnelle, ont également permis de réduire de 25% les besoins en engrais azotés minéraux pour la culture de tomates en Égypte (Abdelraouf et al., 2024).

Cependant, les avantages agronomiques doivent être rapportés à risque d'effets phytotoxiques ou d'accumulation associés à des constituants spécifiques de l'eau recyclée. La salinité, exprimée en conductivité électrique (EC) et, dans le contexte de la sodicité des sols, en taux d'adsorption du sodium (SAR), constitue une préoccupation majeure. Les effluents municipaux traités par traitement secondaire et tertiaire ont généralement une conductivité électrique (EC) comprise entre 0,8–2,5 dS/m, ce qui est généralement acceptable pour la plupart des cultures avec un lessivage bien géré, mais peut entraîner une accumulation de salinité dans les sols mal drainés au fil du temps. Les xénobiotiques (produits pharmaceutiques, produits de soins personnels, perturbateurs endocriniens, microplastiques) sont présents dans l'eau recyclée à des concentrations bien inférieures aux seuils de phytotoxicité aiguë dans la plupart des systèmes surveillés. Pourtant, leurs effets non mortels à long terme sur le microbiote du sol, la qualité des cultures et la santé humaine via la consommation alimentaire restent des domaines de recherche active et de préoccupation réglementaire (Poustie et al., 2020).

La variabilité spatiale et temporelle de la qualité de l'eau recyclée est un facteur essentiel de la gestion qui est souvent sous-estimé dans les cadres réglementaires et la planification de l'irrigation. La qualité des effluents des stations d'épuration varie au cours de la journée (reflétant les modèles d'activité urbaine), de la saison (répondant aux conditions météorologiques, à l'afflux de touristes et aux rejets de produits chimiques agricoles) et en réponse aux perturbations du processus de traitement.

Alcaide et al. (2022) ont prouvé que les changements de l'azote étaient évidents à la fois au fil du temps et dans un réseau de distribution d'eau d'irrigation au sud de l'Espagne. Selon les saisons, la teneur en azote a été réduite pendant la période estivale. Sur le plan spatial, une nitrification nette s'est produite entre la station de pompage et les exploitations agricoles. Ces variations démontrent l'importance d'un contrôle continu de la qualité de l'eau pour ajuster le plan de fertilisation en fonction de la teneur en azote dans l'eau. De plus, une étude approfondie sur les antibiotiques, les bactéries résistantes aux antibiotiques et les gènes de résistance aux antibiotiques dans un système de distribution d'eau entièrement recyclée en Espagne a révélé des variations significatives selon les points de prélèvement et les saisons, avec des zones critiques de revivification bactérienne identifiées au niveau des réservoirs de stockage et des émetteurs d'irrigation. Cette variabilité spatiale et temporelle plaide fortement en faveur de plans de gestion basés sur les risques qui traitent l'ensemble de la chaîne de réutilisation de l'eau comme un système, plutôt que de se baser uniquement sur la qualité des effluents au point de déversement de WWTP (Cadena-Aponte et al., 2025).

(f) Principaux défis liés à la mise en œuvre.

La mise en œuvre de la réutilisation des eaux usées traitées pour but d'irrigation fait face à plusieurs défis majeurs sur les plans technique, environnemental, économique, social et institutionnel. Les principaux défis pour étendre la réutilisation sûre de l'eau agricole à son niveau potentiel sont :

Coût élevé du traitement des eaux usées, du développement des infrastructures, de l'exploitation et de la maintenance : Les technologies avancées de traitement sont souvent nécessaires pour atteindre des normes de qualité de l'eau adaptées à l'irrigation agricole, en particulier pour les cultures vivrières, qui peut exercer une pression financière importante sur les gouvernements et les services publics de l'eau. Dans de nombreuses régions en développement, le manque de financements, la vétusté des infrastructures et l'insuffisance

d'expertise technique limitent davantage l'expansion des systèmes de réutilisation des eaux usées. De plus, les systèmes de traitement et de distribution à forte intensité énergétique peuvent augmenter les coûts d'exploitation et les impacts environnementaux.

Combler l'écart d'investissement entre le traitement et la distribution : La plupart des stations d'épuration (WWTP) existantes dans les régions confrontées à la pénurie d'eau nécessitent une modernisation importante pour produire de manière fiable de l'eau de haute qualité, tandis que les infrastructures de distribution permettant de les relier aux exploitations agricoles sont en grande partie absentes.

Préoccupations liées à l'environnement et à la santé publique constituent également des défis majeurs : Des eaux usées insuffisamment traitées peuvent contenir des agents pathogènes, des sels, des métaux lourds, des nutriments, des résidus pharmaceutiques, des microplastiques et d'autres contaminants émergents susceptibles de s'accumuler dans les sols, les eaux souterraines et les cultures. L'irrigation à long terme avec de l'eau recycl**ée peut contribuer à la salinité et à la dégradation des sols si les pratiques de surveillance et de gestion sont insuffisantes.** Il est donc essentiel d'assurer une performance de traitement fiable, une surveillance continue et un respect des normes de qualité de l'eau afin de minimiser les risques environnementaux et pour la santé.

Obstacles institutionnels et réglementaires, tels que la gouvernance fragmentée : Des normes incohérentes, des politiques peu claires et une faible coordination entre les agences de l'eau, de l'agriculture et de l'environnement peuvent retarder la mise en œuvre et réduire l'efficacité opérationnelle.

Élaboration d'une réglementation proportionnée et basée sur des preuves relative aux contaminants de préoccupation (CEC) : L'absence de limites obligatoires pour les produits pharmaceutiques, les microplastiques et les gènes de résistance aux antibiotiques crée à la fois une incertitude réglementaire et des risques réels qui nécessitent une gestion.

Aligner la réglementation relative à la sécurité alimentaire et à la réutilisation de l'eau : L'interaction entre les normes de réutilisation de l'eau et les règlements sur la securité alimentaire (en particulier pour les produits frais exportés) crée une complexité en matière de conformité qui décourage les agriculteurs.

Mise à l'échelle de la gouvernance et des capacités institutionnelles : De nombreuses institutions nationales et infranationales ne disposent pas d'expertise, de ressources et de mandat pour élaborer et mettre en œuvre les cadres complets de gestion des risques requis par des réglementations telles que l'UE 2020/741.

Mise en place de l'acceptation sociale : Dans de nombreux pays, les agriculteurs et les consommateurs hésitent encore à utiliser l'eau recyclée en raison des préoccupations concernant la sécurité alimentaire, l'hygiène et l'acceptation culturelle. Le manque de sensibilisation du public et la confiance limitée dans les systèmes de traitement créent souvent une résistance aux projets de réutilisation des eaux usées. Le **«**facteur de répulsion**»** et les préoccupations du marché alimentaire nécessitent une communication soutenue, bas**ée sur des preuves, un**e surveillance transparente et une gouvernance participative.

Prise en compte des retours hydrologiques : Les cadres de planification doivent explicitement prendre en compte les effets du détournement des eaux recyclées sur les débits environnementaux, les utilisateurs d'eau en aval et la réalimentation des aquifères.

Problèmes climatiques et opérationnels affectent également la fiabilité de la réutilisation des eaux usées traitées : Les variations saisonnières dans la production d'eaux usées et

la demande en eau pour but agricole peuvent créer des déséquilibres entre les besoins d'approvisionnement et d'irrigation.

Faire face aux impacts du changement climatique sur la qualité et la quantité des eaux usées : La hausse des températures, les sécheresses et les épisodes de précipitations extrêmes affectent à la fois le volume et la qualité des eaux usées générées, ce qui nécessite des stratégies de gestion adaptative.

Par conséquent, une mise en œuvre réussie nécessite une planification intégrée, des cadres réglementaires solides, une participation du public, des systèmes de surveillance fiables et des mécanismes de financement durables pour assurer une réutilisation sûre et efficace des eaux usées pour l'irrigation. L'élaboration de stratégies holistiques pour faciliter l'adoption de l'eau recyclée dans l'agriculture est essentielle à sa mise en œuvre réussie, un besoin mis en évidence par les projets SUDOE I-ReWater (Huerta et al., 2025) et SOLLAGUA, entre autres.

(g) Comment est-ce que les approches intégrées, interdisciplinaires et territoriales peuvent contribuer à surmonter les obstacles sociologiques, économiques et réglementaires?

Les cadres de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) aident à coordonner les secteurs urbains, agricoles, sanitaires et environnementaux afin de s'assurer que les politiques de recyclage de l'eau, les infrastructures et les systèmes de surveillance sont alignés sur les objectifs régionaux de gestion de l'eau et de durabilité. Une telle coordination améliore la prise de décision, réduit la fragmentation institutionnelle et soutient le développement de cadres réglementaires clairs ainsi que de normes de qualité de l'eau.

Les approches interdisciplinaires sont tout aussi importantes car les défis de la réutilisation des eaux usées dépassent le simple cadre de l'ingénierie et des technologies de traitement de l'eau. La collaboration entre hydrologues, agronomes, chimistes, économistes, spécialistes de la santé publique, sociologues et experts en politiques permet une évaluation complète des risques environnementaux, de la faisabilité économique, de la protection de la santé publique et de l'acceptation sociale. Par exemple, les spécialistes en sciences sociales peuvent aider à identifier les préoccupations du public et les obstacles culturels liés à l'utilisation des eaux recyclée, tandis que les économistes peuvent évaluer des scénarios coûts-bénéfices et des mécanismes de financement susceptibles de rendre les projets plus abordables aux agriculteurs et aux gouvernements. Les campagnes de sensibilisation du public et les programmes de participation des parties prenantes développés grâce à la coopération interdisciplinaire se sont révélés efficaces pour améliorer la confiance et l'acceptation de l'eau recyclée pour but d'irrigation agricole.

Les approches territoriales ou basées sur le lieu améliorent encore la mise en œuvre de la réutilisation des eaux usées en adaptant les solutions aux conditions environnementales, économiques et sociales locales. Les niveaux de pénurie d'eau, les pratiques agricoles, la capacité des infrastructures et les perceptions du public varient considérablement selon les régions; par conséquent, les stratégies de réutilisation doivent être adaptées aux contextes locaux plutôt que d'appliquer des modèles nationaux uniformes. La planification territoriale peut soutenir le développement de systèmes de réutilisation décentralisés, optimiser les réseaux de distribution d'eau recyclée et identifier les cultures et les méthodes d'irrigation appropriées en fonction des conditions climatiques et pédologiques locales. En outre, l'implication des communautés locales, des agriculteurs, des municipalités et des usagers de l'eau dans les processus de planification et de gouvernance renforce la responsabilité des parties prenantes et facilite le respect de la réglementation.

La nature multidimensionnelle des obstacles à la réutilisation de l'eau (couvrant l'hydrologie, l'agronomie, l'économie, la santé publique, la gouvernance et la psychologie sociale) rend nécessaires des approches intégrées, interdisciplinaires et territoriales. Aucun secteur ni aucune discipline ne peut à lui seul résoudre ces problèmes. Un plan stratégique efficace pour l'adoption généralisée de réutilisation des eaux usées traitées (TWW) doit prendre en compte les aspects suivants :

Les approches territoriales reconnaissent que la viabilité de la réutilisation de l'eau est fondamentalement une fonction des relations spatiales : entre les stations d'épuration des eaux usées (WWTP) et les terres irriguées, entre la qualité de l'eau produite et celle requise, ainsi qu'entre les juridictions de gouvernance (municipalités, autorités de bassin versant, associations d'irrigants) dont la coopération est nécessaire pour déployer des systèmes à grande échelle. Une approche de planification territoriale qui cartographie spatialement la production des stations d'épuration par rapport à la demande d'irrigation, aux types de sols, aux modèles de cultures et aux besoins de réalimentation des eaux souterraines peut identifier les zones prioritaires pour la coordination des investissements et de la gouvernance. En Espagne, la concurrence entre une production élevée d'eaux usées (zones touristiques, agglomérations urbaines) et l'horticulture intensive adjacente sur la bordure **méditerranéenne (Murcie, Almería, Alicante) crée des conditions territoriales idéales pour des systèmes** intégrés de réutilisation, mais cela nécessite des mécanismes de coordination formels entre les services publics urbains de l'eau et les associations d'irrigants (Rodríguez Villanueva & Sauri, 2021 ; Ventura et al., 2019).

La recherche et l'innovation interdisciplinaires sont nécessaires pour développer la base de connaissances techniques, économiques et sociales permettant d'étendre la réutilisation de l'eau en toute sécurité. Cela comprend : (i) l'amélioration des technologies de capteurs et la surveillance en temps réel pour la détection des agents pathogènes et des contaminants de préoccupation émergente (CEC); (ii) le développement de technologies de traitement tertiaire rentables adaptées aux stations d'épuration des eaux usées de petites et moyennes tailles; (iii) la création de modèles économiques quantitatifs intégrant l'ensemble des coûts et bénéfices sociaux et environnementaux; (iv) le développement de l'évaluation quantitative du risque microbien (QMRA) pour une gestion des risques adaptée au site; et (v) l'application de méthodes issues des sciences sociales pour comprendre la perception des risques, les lacunes en matière d'information et les stratégies de communication efficaces (Radini et al., 2021; Carter et al., 2024).

Innovation en matière de gouvernance : L'exigence du règlement UE 2020/741 relative aux plans de gestion des risques liés à la réutilisation de l'eau (WRRMP), qui couvrent l'ensemble de la chaîne allant de la station d'épuration aux parcelles irriguées, crée un mécanisme institutionnel de coordination multi-acteurs. Cependant, la mise en œuvre du règlement nécessite une intervention active aux niveaux national et régional, y compris la désignation d'une autorité compétente, un soutien aux petites entreprises de services publics pour élaborer les évaluations des risques requises et la création de mécanismes de marché (par exemple, certificats de réutilisation échangeables, assurance risque) qui peuvent réduire les obstacles financiers (Berbel et al., 2023).

Implication et co-conception des parties prenantes : L'établissement de la confiance des agriculteurs et des consommateurs envers les eaux recyclées nécessite une communication proactive fondée sur une participation véritable, et non sur la fourniture d'informations. Les programmes de réutilisation réussis menés — en Israël, en Californie et en Espagne — possèdent une caractéristique commune : les agriculteurs et les communautés d'irrigation ont été impliqués dès le début dans la conception et la gouvernance des systèmes de réutilisation, leur donnant ainsi la responsabilité des protocoles de sécurité et des avantages économiques.

Les jeux sérieux, le service civique avec Sciences Citoyennes et les plateformes numériques rendant les données sur la qualité de l'eau transparentes et accessibles à toutes les parties prenantes ont démontré leur impact positif sur l'acceptation sociale (Radini et al., 2021).

Cadres politiques de l'économie circulaire : La transition d'un modèle linéaire à un modèle circulaire de gestion de l'eau — dans lequel les eaux usées sont conceptualisées comme une ressource transportant de l'eau, des nutriments et de l'énergie, plutôt qu'un déchet à éliminer — fournit la base conceptuelle pour l'alignement des politiques et des investissements. Les stratégies d'économie circulaire aux niveaux international, national et régional doivent explicitement intégrer la réutilisation de l'eau comme mécanisme de co-prestation pour atteindre l'ODD 6 (eau propre), l'ODD 12 (consommation et production responsables) et l'ODD 2 (faim zéro) (Fernandes & Cunha Marques, 2023 ; Berbel et al., 2023).

Instruments financiers et économiques : Plusieurs instruments de politique ont démontré leur efficacité pour surmonter les obstacles économiques : i) les subventions en capital pour les infrastructures de traitement et de distribution (comme en Israël et en Espagne); ii) la tarification différenciée de l'eau qui subventionne la production d'eau recyclée grâce aux tarifs appliqués à l'eau urbaine; (iii) les crédits d'azote et de phosphore qui monétisent la valeur de substitution des engrais offerte par les eaux recyclées; et (iv) les obligations vertes et les structures de partenariat public-privé qui mobilisent des capitaux privés pour les infrastructures de réutilisation (Declerq et al., 2020).

3. EAU DESSALÉE

(a) Utilisation actuelle de l'eau dessalée pour but d'irrigation à l'échelle mondiale, européenne et d'autres pays clés.

Dès le départ, le dessalement de l'eau de mer (DSW) était principalement utilisé pour répondre aux besoins en eau domestique et industrielle du monde. Cependant, les améliorations technologiques continues et la baisse des coûts de production ont progressivement étendu son application à d'autres secteurs, en particulier l'agriculture. Au cours des deux dernières décennies, l'approvisionnement à grande échelle en DSW est apparu comme une alternative prometteuse pour soutenir l'agriculture irriguée dans les régions méditerranéennes confrontées à la pénurie d'eau, caractérisées par des systèmes d'irrigation efficaces et des cultures à haute valeur ajoutée, comme le sud-est de l'Espagne, l'Israël et le Maroc, ainsi que dans les contextes insulaires dépourvus de ressources en eau douce, tels que les îles Canaries (Maki et al., 2025 ; Martínez-Alvarez et Maestre-Valero, 2025). D'autres pays où l'utilisation de DSW pour but agricole reste plus limitée sont l'Italie, Chypre, le Koweït, l'Arabie saoudite, Bahreïn, le Qatar, Oman et les États-Unis. En même temps, son adoption potentielle est activement explorée dans les régions telles que l'Égypte, la Tunisie, le Chili, le Mexique et l'Australie, une tendance qui devrait s'intensifier dans un avenir proche (Martínez-Alvarez et al., 2018 ; Suwaileh et al., 2020). Les principales expériences d'irrigation à l›aide de DSW sont décrites ci-dessous.

Au sud-est de l'Espagne, l'agriculture a toujours été confrontée à une pénurie d'eau persistante, qui s'est intensifiée au fil du temps. Au milieu des années 1990, les agriculteurs ont répondu à une sécheresse prolongée en installant plus de 200 usines de dessalement d'eau saumâtre à l'échelle de l'exploitation. La persistance des déficits hydriques, conjuguée à la nécessité de soutenir une agriculture à haute valeur ajoutée et de réduire la surexploitation des eaux souterraines, a conduit le gouvernement espagnol à lancer le programme AGUA en 2004. Cette initiative s'est concentrée sur la construction ou la modernisation de 29 usines de dessalement d'eau de mer le long de la côte méditerranéenne pour répondre aux besoins agricoles, urbains et touristiques, avec un objectif global de production de 693 millions de m³/

an, dont 200 millions de m³/an ont été alloués à l'irrigation (Martínez-Alvarez et al., 2017). La plupart des installations étaient basées sur la technologie de l'osmose inverse, dans certains cas incorporant des systèmes à double passage pour réduire les concentrations de bore pour les usages agricoles. Actuellement, environ 25% de la production totale de DSW en Espagne est utilisée pour but d'irrigation, une proportion qui atteint environ 70% dans la région du sud-est, où neuf usines de dessalement fournissent de l'eau entièrement ou partiellement à des fins agricoles (figure 1).

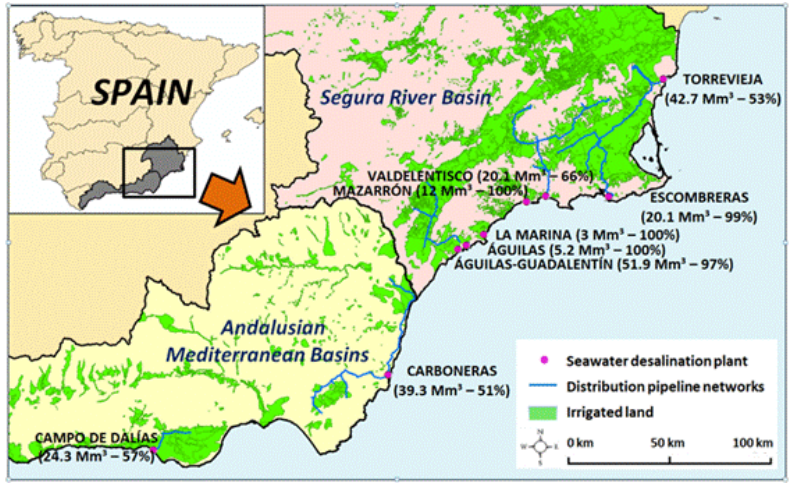


Figure 1. Production de DSW pour but d'irrigation au sud-est de l'Espagne. Les chiffres montrent la production totale et le pourcentage d'approvisionnement agricole à chaque SWDP. Source : Gallego-Elvira et al. (2021).

En Israël, la pénurie chronique d'eau a longtemps encouragé le recours aux eaux souterraines saumâtres et aux eaux recyclées pour but d'irrigation. Depuis 2006, le dessalement de l'eau de mer (DSW) est devenue une alternative de plus en plus viable. Le Plan directeur israélien de dessalement, élaboré en 1997, visait à satisfaire la demande en eau domestique en agrandissant les installations existantes et en construisant de nouvelles usines de dessalement à grande échelle, pour atteindre à terme une capacité de production de 750 millions de m³/an, dont environ 200 millions de m³/an destinés à l'agriculture (Spiritos et Lipchin, 2013). À l'heure actuelle, cinq grandes usines d'osmose inverse sont en cours, l'agriculture étant principalement concentrée dans les régions du sud où la densité de population plus faible permet une meilleure allocation de l'eau dessalée pour but d'agriculture, en particulier provenant des usines d'Ashkelon et de Palmachim (fig. 2). Les premières expériences d'utilisation de dessalement de l'eau de mer (DSW) pour but d'irrigation ont mis en évidence plusieurs défis agronomiques et environnementaux qui ont dû être abordés lors de l'intégration de cette ressource dans les systèmes agricoles (Ben-Gal et al., 2009 ; Yermiyahu et al., 2007).

Au Maroc, le dessalement de l'eau de mer soutient déjà l'agriculture, en particulier dans les régions côtières arides telles que le Souss-Massa, où sont produites les cultures à haute valeur ajoutée destinées à l'exportation. L'usine de dessalement d'Agadir en est un exemple représentatif : elle fournit environ 40 millions de m³/an d'eau pour but d'irrigation



Figure 2. Emplacement et capacité des usines de dessalement en Israël. L'approvisionnement agricole se concentre sur les usines du sud. Source: Martínez Alvarez et al. (2018).

et dessert actuellement entre 10 000 et 15 000 hectares de terres agricoles consacrées aux cultures sous serre, aux agrumes et à d'autres produits horticoles. À l'échelle nationale, environ 16 usines de dessalement produisent environ 350 millions de m³/an, une part croissante étant allouée à l'agriculture, contribuant ainsi à la stabilisation de la production dans les zones sujettes à la sécheresse et à l'atténuation de la pression sur les aquifères surexploités (Boutagayout et al., 2025). À l'avenir, le Maroc vise à augmenter sa capacité de dessalement à environ 1 700 millions de m³/an d'ici 2030, dont environ 30% seront dirigés - soit directement, soit indirectement par la réutilisation - vers l'agriculture, parallèlement à des plans visant à développer jusqu'à 100 000 hectares de nouvelles terres irriguées alimentées par le dessalement. (Jones et al., 2019).

(b) Lien entre eau-énergie.

Du point de vue de lien entre eau–énergie, le DSW se caractérise par une forte demande en énergie associée à la fois à sa production et à son transport ultérieur vers les zones irriguées (Zolghadr-Asli et al., 2023). Bien que l'osmose inverse représente actuellement la technologie de dessalement la plus efficace sur le plan énergétique en fonctionnement, elle nécessite encore beaucoup plus d'énergie que les sources d'eau conventionnelles, ce qui intensifie ainsi le lien entre eau-énergie. Au sud-est de l'Espagne, la consommation totale d'énergie pour l'approvisionnement en DSW est généralement de quatre à dix fois supérieure à celle des ressources alternatives (Martin-Gorriz et al., 2014). Plus précisément, les besoins en énergie des usines de dessalement d'eau de mer varient de 2,77 à 4,10 kWh/m³ pour la production, avec un besoin supplémentaire de 0,50 à 1,13 kWh/m³ pour le transport vers les zones d'irrigation (Martínez-Alvarez et al., 2019). La figure 3 montre les valeurs caractéristiques de la consommation d'énergie spécifique pour les différentes étapes de la production et de l'approvisionnement de DSW pour but d'irrigation au sud-est de l'Espagne.

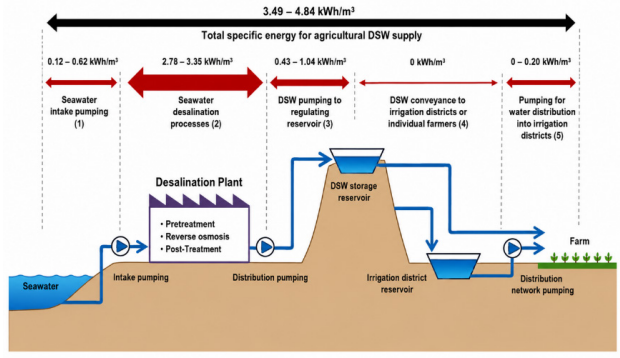


Figure 3. Énergie spécifique pour les différentes étapes de production et d'approvisionnement en DSW pour but d'irrigation au sud-est de l'Espagne. Source: Martínez-Alvarez *et al.* (2019).

Les usines de dessalement récentes peuvent atteindre des valeurs de consommation d'énergie spécifiques aussi faibles que 1,8–2,2 kWh/m³ pour l'étape de l'osmose inverse; cependant, les installations opérationnelles présentent généralement des valeurs plus élevées en raison de la nécessité de processus approfondis de prétraitement et de post-traitement (Wang et al., 2025).Les besoins en énergie peuvent être encore accrus dans les applications agricoles, où un traitement supplémentaire - tel qu'un second passage par osmose inverse - est souvent nécessaire pour réduire les concentrations de bore à des niveaux adaptés aux cultures sensibles, en aj outant environ 0,50–0,77 kWh/m³ (Shaffer et al., 2012). En Israël, des usines de dessalement à grande échelle fournissent des valeurs d'irrigation entre 2,9 et 3,85 kWh/m³ (Spiritos et Lipchin, 2013), comparables à celles observées au sud-est de l'Espagne lors des étapes de prise d'eau et de dessalement (fig. 3). Ces chiffres relativement modérés reflètent la grande capacité et la mise en service récente de telles installations, qui intègrent des technologies de membrane avancées et des systèmes de récupération d'énergie. Les facteurs techniques, notamment la salinité de l'eau d'alimentation, la qualité cible de l'eau, les systèmes de la gestion des eaux usées salines concentrées, la capacité des usines, l'efficacité de la récupération d'énergie et le type de membrane, entraînent principalement la variabilité entre les usines. De plus, la distribution de l'eau aux échelles des ptimètres irrigués et des exploitations agricoles nécessite des apports énergétiques supplémentaires, en moyenne à 0,16 et 0,17 kWh/m³ respectivement au sud-est de l'Espagne (Soto-García et al., 2013).

Le remplacement des sources d'eau conventionnelles par de DSW pour but d'agriculture irriguée augmenterait donc considérablement la consommation globale d'énergie, soulevant d'importantes préoccupations environnementales en raison des émissions de gaz à effet de serre (GHG) associées. L'ampleur de ces émissions dépend en grande partie du mix électrique de chaque pays, mais dans tous les cas, une utilisation plus importante d'énergie peut faire passer l'agriculture irriguée d'un absorbant de carbone net à un émetteur net, ce qui est en contradiction avec les objectifs d'atténuation du changement climatique (Martínez Alvarez et al., 2023). Par conséquent, l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre (GHG) associées au

dessalement est essentielle pour évaluer la durabilité de l'agriculture irriguée basée sur le DSW.

La mauvaise adaptation apparente au changement climatique est étroitement liée à l'intensité carbone des systèmes d'électricité actuels. Une transition progressive vers des sources d'énergie renouvelables permettrait d'alléger considérablement le lien entre eau–énergie et d'atténuer l'empreinte carbone associée à l'utilisation de l'eau dessalée dans l'agriculture. Dans ce contexte, des études récentes indiquent que les usines de dessalement alimentées par des énergies renouvelables pourraient réduire les émissions de gaz des effets de serre (GHG) jusqu'à 90%, améliorant ainsi considérablement la performance environnementale de l'irrigation dépendante du DSW (Shahabi et al., 2014).

(c) Définition d'une stratégie visant à répondre de manière spécifique aux besoins agricoles, tant sur le plan quantitatif que qualitatif

L'irrigation avec le DSW peut être encadrée dans deux scénarios d'approvisionnement globaux qui déterminent à la fois son comportement agronomique et sa viabilité économique. La première correspond à des situations dans lesquelles le DSW constitue la seule ou principale source d'eau pour l'irrigation. Le second fait référence aux systèmes d'approvisionnement mixte, dans lesquels le DSW est combiné à d'autres ressources conventionnelles ou non conventionnelles. Dans le premier cas, si les besoins agricoles ne sont pas suffisamment pris en compte au stade de la conception des usines de dessalement d'eau de mer, les agriculteurs peuvent être exposés à un approvisionnement continu en eau pauvre en minéraux, ce qui peut donner lieu à des déséquilibres agronomiques, y compris la diminution des nutriments et les déséquilibres chimiques du sol. Dans le second cas, la qualité de l'eau est intrinsèquement variable avec la disponibilité saisonnière et les taux de mélange entre les sources, ce qui conduit à des variations des conditions physico-chimiques nécessitant une gestion adaptative de l'irrigation et de la fertigation. Dans les deux scénarios, des mesures techniques peuvent atténuer les effets négatifs, mais elles transfèrent généralement une partie de la responsabilité - et des coûts supplémentaires pour la fertilisation et la gestion du sol - à l'agriculteur.

D'un point de vue stratégique, le mélange des ressources en eau est systématiquement recommandé pour la stabilité agronomique et l'optimisation économique. Cela inclut le mélange des sources conventionnelles et non conventionnelles, telles que les eaux de surface, les eaux souterraines, l'eau recyclée (REUSE), ou même les flux de drainage, dans des conditions contrôlées. Le mélange permet d'atténuer la variabilité de la qualité de l'eau, de réduire les risques de phytotoxicité et d'améliorer l'équilibre des nutriments, tout en réduisant simultanément le coût effectif de l'eau d'irrigation. À l'heure actuelle, la dépendance totale au dessalement de l'eau de mer reste largement limitée aux cultures à forte valeur ajoutée avec des rendements économiques suffisants; par conséquent, le mélange apparaît comme la stratégie la plus pratique à l›échelle de l›exploitation pour élargir son applicabilité à un éventail plus large de systèmes agricoles.

Dans ce contexte, il convient de distinguer les nouveaux projets d'irrigation des périmètres irrigués existants. Pour les nouveaux systèmes conçus autour du DSW, une évaluation préalable et approfondie des caractéristiques locales du sol, des besoins des cultures et des impacts à long terme est indispensable avant toute mise en œuvre. Cela comprend l'évaluation de la dynamique de la salinité du sol, les stratégies de gestion des nutriments et le besoin potentiel d'amendements du sol, la sélection des rhizomes ou même l'introduction de nouvelles variétés de cultures. Dans de tels cas, la sélection des cultures devient centrale, les espèces horticoles à forte valeur — généralement celles générant des revenus supérieurs

à 2 €/m³ et ayant des besoins en eau relativement faibles — étant l'option la plus viable. Néanmoins, des recherches supplémentaires sont encore nécessaires pour évaluer la faisabilité d'étendre le DSW pour but d'irrigation des cultures de base stratégiques telles que les céréales et le fourrage. En revanche, dans les zones irriguées existantes, le DSW joue un rôle fondamentalement complémentaire, renforçant la résilience face à une pénurie d'eau croissante due à la demande croissante et au changement climatique. Ici, le dessalement agit comme une ressource stabilisatrice qui soutient les systèmes agricoles établis.

Une autre distinction concerne le mode de livraison, qui peut être direct ou indirect. L'approvisionnement direct fait référence à la distribution de DSW directement des usines aux réseaux d'irrigation. En revanche, l'offre indirecte implique son allocation initiale à des usages urbains, suivie de la régénération et de la réutilisation ultérieure en agriculture. Dans les deux cas, la gestion de la qualité de l'eau reste essentielle, en particulier lors de l'intégration de sources aux caractéristiques physico-chimiques contrastées, car les agriculteurs doivent adapter les stratégies de fertigation à maintenir la productivité des cultures et la fertilité du sol.

Enfin, les considérations environnementales et systémiques renforcent la nécessité d'avoir une planification intégrée. Le choix du site, le dimensionnement, la surveillance et la réglementation des infrastructures de dessalement, ainsi qu'une conception robuste des systèmes de prise d'eau et de l'évacuation, sont essentiels pour minimiser les impacts écologiques. Parallèlement, une transition vers des approches d'économie circulaire - telles que la valorisation des eaux usées salines concentrées et le recyclage des membranes - pourrait transformer une partie de la charge environnementale en occasions locales.

(d) Modèle économique. Coûts de l'eau dessalée

En raison de ses besoins en énergie élevés, l'approvisionnement en dessalement de l'eau de mer (DSW) pour but agricole est considérablement plus cher que les sources d'eau conventionnelles et son prix est donc nettement plus élevé, ce qui limite souvent son acceptation chez les agriculteurs (Aznar-Sánchez et al., 2021). Ces prix élevés peuvent augmenter considérablement les coûts de production agricole et, dans certains cas, compromettre la viabilité économique des exploitations agricoles où le DSW est la principale ou unique source d'eau (Martínez-Alvarez et al., 2023). Le coût total de DSW est très spécifique au site et dépend de plusieurs facteurs, tels que la capacité des usines, les coûts de main-d'œuvre, les sources d'énergie, la disponibilité des terres, la salinité de l'eau d'alimentation et le développement technologique. Les coûts globaux sont généralement divisés en dépenses d'investissement — associées à l'investissement initial dans les usines de dessalement d'eau de mer — et en coûts d'exploitation et de maintenance engagés tout au long de leur durée de vie. En termes généraux, ces composantes représentent environ 40% et 60% des coûts totaux respectivement (Lapuente, 2012). Cependant, les coûts opérationnels sont particulièrement dynamiques, car ils sont largement déterminés par les prix de l'énergie, qui sont intrinsèquement volatils, ce qui entraîne des fluctuations importantes du coût définitf de DSW. De plus, les coûts totaux augmentent de manière disproportionnée lorsque les usines de dessalement fonctionnent en dessous de leur capacité maximale (Ghaffour et al., 2015).**

Martinez Alvarez et al. (2019) ont rapporté qu'au moment de l'analyse, les coûts totaux déclarés des usines de dessalement fournissant l'eau à l'agriculture variaient entre 0,50 et 0,66 €/m³ en Israël et entre 0,55 et 0,69 €/m³ au sud-est de l'Espagne. Le coût définitif payé par les agriculteurs est encore plus élevé en raison des dépenses supplémentaires de transport et de distribution, en particulier lorsque les zones d'irrigation sont situées à l'intérieur des terres ou à des altitudes plus élevées. Au sud-est de l'Espagne, ces coûts supplémentaires comprennent le transfert d'eau des usines vers les périmètres irrigués (0,04–0,06 €/m³), la gestion collective et l'allocation au sein des communautés d'irrigation (0,03–0,06 €/m³) et les

coûts d'application à la parcelle dans le cadre de systèmes d'irrigation localisés. (environ 0,02 €/m³) (Soto-García et al., 2013). Au moment de l'analyse, les prix payés par les agriculteurs reflétaient étroitement cette structure de coûts complets, y compris les redevances et taxes applicables, conformément au principe de recouvrement des coûts établi dans la Directive-cadre sur l'eau de l'UE.

Néanmoins, les tensions survenues dans les marchés mondiaux de l'énergie au cours de la période 2022-2023 ont entraîné une augmentation marquée du coût du DSW pour but d'irrigation, atteignant près de 1 € /m³ en Espagne, soulignant ainsi la forte sensibilité de l'économie du dessalement à la volatilité des prix de l'énergie. Cette hausse soudaine a suscité une opposition importante de la part des agriculteurs et a incité le gouvernement espagnol à introduire des subventions temporaires, assouplissant partiellement le principe de recouvrement des coûts. En conséquence, les récents prix subventionnés de DSW pour but d'irrigation ont été maintenus dans un éventail de 0,35 à 0,50 €/m³ (Ordre ministériel TED/157/2023).

La figure 4 illustre l'évolution des prix d'approvisionnement des usines de dessalement à grande échelle dans le monde au cours des deux dernières décennies, montrant une nette tendance à la baisse des valeurs dépassant 1 $/m³ vers l'an 2000 à environ 0,5–0,6 $/m³ ces dernières années. Ces valeurs sont globalement cohérentes avec celles observées en Espagne et en Israël pour la production de DSW pour but agricole dans des conditions stables du marché de l'énergie.

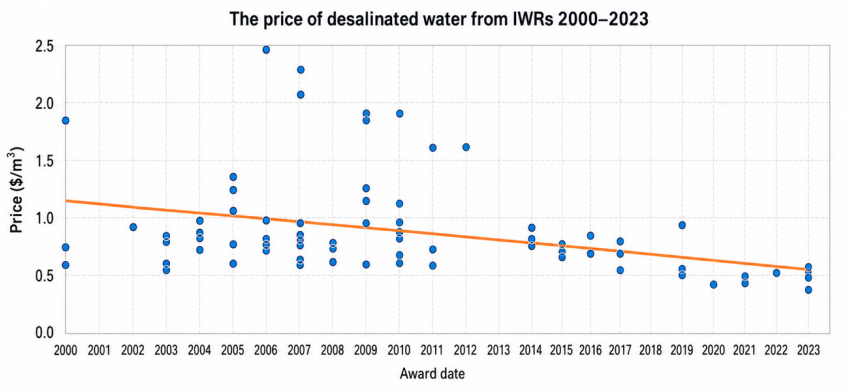


Figure 4. Évolution du prix DSW de 2000 à 2023. Source GWI (2023).

(e) Principaux défis liés à la mise en œuvre.

Aspects techniques

Les premières expériences mondiales de dessalement de l'eau de mer (DSW) à des fins agricoles soulignent systématiquement sa forte demande en énergie, ce qui a donné lieu aux coûts de production agricole élevés et à une augmentation des émissions de gaz à effet de serre. L'osmose inverse est devenue la technologie mature dominante pour le dessalement de l'eau de mer, soutenue par deux décennies de réductions de coûts des équipements et des processus opérationnels grâce au déploiement à grande échelle et aux stratégies de récupération d'énergie. Les améliorations de l'efficacité ont réduit la consommation d'énergie spécifique à environ 3–4 kWh/ m³, y compris les étapes de prise d'eau, de prétraitement et de post-traitement, bien qu'il reste le potentiel limité de réductions supplémentaires. La

planification énergétique est donc centrale dans le déploiement de DSW pour but agricole, non seulement en termes de conception des usines mais aussi en ce qui concerne le mix de production d'électricité en amont et les infrastructures de transport d'électricité (Spiritos et Lipchin, 2013).

Les économies d'échelle jouent un rôle important dans l'approvisionnement en DSW, car les grandes usines atteignent généralement des coûts de production unitaires plus faible. Cependant, ces installations ne sont pas toujours compatibles avec les systèmes agricoles dispersés ou à petite échelle, où de vastes réseaux de distribution — stations de pompage, pipelines et consommation d'énergie associée — deviennent nécessaires. Par conséquent, l'augmentation de la distance et de l'élévation entre les sites de production et les zones irriguées augmente considérablement les coûts et peut compromettre la viabilité du projet (Daghari et al., 2022).

Enfin, un aspect technique clé de l'approvisionnement en DSW pour but agricole est la réduction de la concentration de bore. En plus de l'osmose inverse conventionnelle, des traitements supplémentaires tels qu'un second passage par osmose inverse ou des résines échangeuses d'ions sélectives pour le bore sont souvent nécessaires pour atteindre les seuils de tolérance des cultures. Ces solutions améliorent la qualité de l'eau, mais augmentent les coûts d'investissement et d'exploitation.

Aspects économiques

Le coût reste le principal obstacle dans l'adoption généralisée de dessalement de l'eau de mer (DSW) dans l'agriculture, en particulier pour les cultures en plein champ telles que l'horticulture méditerranéenne et les vergers, ainsi que pour les systèmes irrigués à l'intérieur des terres où les coûts de livraison augmentent encore les prix de production déjà élevés. En conséquence, l'utilisation actuelle de DSW agricole est largement limitée aux cultures à forte valeur ajoutée, ce qui peut absorber les coûts de l'eau considérablement plus élevés associés au DSW (Maki et al., 2025).

Le remplacement des approvisionnements en eau traditionnels par le DSW réduit généralement la rentabilité de l'exploitation et, dans certains cas, peut rendre la production économiquement non viable, dépassant ainsi la capacité financière de nombreux systèmes agricoles (Martínez-Alvarez et al., 2023). Même avec les récentes réductions de coûts et les projections optimistes pour l'avenir, les prix d'environ 0,4-0,5 €/ m³ restent un défi pour la plupart des agriculteurs du monde. Bien que le mélange de l'eau dessalée avec d'autres sources puisse réduire les coûts, le prix qui en résulte reste généralement supérieur aux tarifs de l'eau d'irrigation conventionnelle.

Aspects agronomiques

D'un point de vue agronomique, la composition chimique du DSW introduit plusieurs contraintes qui doivent être soigneusement gérées pour éviter des effets négatifs sur le sol et la productivité des cultures (Yermiyahu et al., 2007). Les principales préoccupations incluent les effets exercés par la salinité sur le rendement, l'augmentation des besoins en lessivage et la demande en eau d'irrigation associée, la modification des besoins en engrais due à la composition nutritionnelle, les risques de toxicité due au bore et l'alcalinisation du sol induite par les déséquilibres entre cations monovalents et divalents. (Martínez Alvarez et al., 2023).

Des ajustements de qualité post-traitement sont donc souvent nécessaires. L'augmentation des concentrations de calcium et de magnésium aide à équilibrer la teneur en sodium de l'eau dessalée, réduisant ainsi les risques de sodicité du sol et de carences en nutriments.

L'élimination du bore est particulièrement critique, car des concentrations de 0,7–1,2 mg L^{-1} — fréquentes dans les systèmes d'osmose inverse à passage unique — peuvent provoquer une phytotoxicité chez les cultures sensibles telles que les agrumes. De plus, le maintien d'une capacité tampon adéquate est essentiel pour stabiliser le pH et prévenir les processus d'entartrage dans les systèmes de distribution et de fertigation (Lahav et Brinhack, 2007).

Ces risques agronomiques peuvent également être partiellement atténués en mélangeant le dessalement de l'eau de mer (DSW) avec d'autres sources d'eau avant l'irrigation. Néanmoins, l'établissement de normes formelles de qualité de l'eau est essentiel pour assurer la pertinence physico-chimique des DSW fournies. Une telle réglementation est essentielle pour la durabilité agricole à long terme et devrait être explicitement incorporée dans les contrats d'approvisionnement pour l'utilisation en irrigation.

Aspects environnementaux

L'évaluation environnementale du dessalement pour l'agriculture nécessite une perspective holistique, car les impacts peuvent être à la fois négatifs et positifs (Elimelech et Phillip, 2011). Du côté négatif, la forte intensité énergétique de dessalement contribue à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GHG), en particulier dans les systèmes électriques encore dominés par les combustibles fossiles. Cela renforce l'empreinte environnementale de l'approvisionnement en eau par rapport aux sources conventionnelles.

La gestion des eaux usées salines concentrées est une autre préoccupation clé, en particulier dans les environnements marins semi-fermés ou peu profonds comme le golfe Persique, où les rejets cumulés de plusieurs usines peuvent entraîner une dégradation écologique. Bien que les solutions d'ingénierie telles que les diffuseurs et les embouchures contrôlés puissent atténuer les impacts locaux, la concentration de plusieurs installations de dessalement dans des zones côtières restreintes augmente les risques environnementaux à long terme (Maki et al., 2025).

Du côté positif, le dessalement peut réduire la pression sur les systèmes d'eau douce surexploités, notamment en empêchant la dégradation des aquifères. Dans l'ensemble, les impacts environnementaux dépendent fortement de la sélection des sites, de la conception des usines, des cadres réglementaires et des pratiques de surveillance. Lorsqu'il est bien géré, la combinaison d'une évaluation environnementale minutieuse et d'une conception technique solide peut réduire considérablement les effets négatifs sur les écosystèmes marins et terrestres.

4 Analyse SWOT (Forces, Faiblesses, Opportunités et Menaces) pour la mise en œuvre des ressources en eau non conventionnelles pour but d'irrigation

(a) Réutilisation de l'eau

Forces

Ressource riche en nutriments : L'eau recyclée fournit de l'azote, du phosphore, du potassium et des matières organiques qui remplacent partiellement les engrais synthétiques, réduisant ainsi les coûts de production et la charge environnementale liée à une application excessive d'engrais (Pustie et al., 2020 ; Alcaide et al., 2019).

Proximité à la demande : Dans la plupart des contextes urbains et périurbains, les stations d'épuration sont situées à proximité des zones habitées, qui elles-mêmes se trouvent souvent

proches des zones agricoles, ce qui réduit les distances et les coûts de distribution par rapport aux transferts d'eau douce sur de longues distances.

Disponibilité tout au long de l'année : Contrairement aux eaux de surface (très saisonnières) ou aux précipitations (épisodiques), les débits d'eaux usées traitées sont relativement constants tout au long de l'année, offrant une fiabilité d'approvisionnement essentielle pour les cultures pérennes et l'horticulture intensive.

Résistance climatique : La disponibilité de l'eau recyclée est largement découplée de la variabilité des précipitations, ce qui en fait une source d'eau résistante au climat pour l'agriculture dans les régions sujettes à la sécheresse.

Cadre réglementaire progressif : Dans le cas de l'Union européenne, le règlement (UE) 2020/741 établit une norme réglementaire minimale claire et harmonisée à l'échelle de l'UE, offrant ainsi une certitude au marché et des signaux d'investissement positifs pour le secteur de l'eau.

Contribution à l'économie circulaire : La réutilisation de l'eau illustre le principe d'économie circulaire en conservant l'eau (ainsi que ses nutriments et son énergie) dans un usage productif plutôt qu'en la rejetant sous forme de déchets (Fernandes & Cunha Marques, 2023 ; Johannes et al., 2024).

Technologie éprouvée : Les technologies de traitement (bioréacteurs à membrane [MBR], désinfection par UV, ozonation, oxydation avancée) capables de répondre aux normes de réutilisation les plus strictes sont disponibles sur le marché et sont techniquement matures (Antiñolo Bermúdez et al., 2022 ; Ho et al., 2024).

Consommation d'énergie inférieure à celle du dessalement : Pour la plupart des applications et des distances entre la source et l'exploitation agricole, le coût énergétique de la production et de la distribution de l'eau recyclée est inférieur à celui du dessalement de l'eau de mer (Crutchik & Campos, 2021).

Faiblesses

Qualité irrégulière et variabilité temporelle : La qualité des effluents des stations d'épuration (WWTP) varie en fonction des performances du procédé de traitement, de la variabilité des affluents, des charges saisonnières (tourisme, agriculture, conditions météorologiques) et de l'état des réseaux de distribution, ce qui donne lieu aux défis de gestion (Alcaide et al., 2022).

Risques de salinité et de sodicité : L'irrigation à long terme avec de l'eau recyclée peut entraîner une accumulation de salinité et un développement de la sodicité dans les sols, en particulier dans les régions à faible pluviométrie où le lessivage est limité (Poustie et al., 2020).

Présence des contaminants de préoccupation émergente (CEC) : Les produits pharmaceutiques, les microplastiques, les gènes de résistance aux antibiotiques et les perturbateurs endocriniens présents dans les eaux recyclée ne sont pas entièrement réglementés ni surveillés de manière régulière, ce qui crée des risques résiduels et donne lieu aux préoccupations quant à l'acceptation par le marché (Berbel et al., 2023).

Besoins d'investissement dans les infrastructures : La modernisation ou la construction de stations d'épuration (WWTP), ainsi que la mise en place de réseaux de distribution acheminant l'eau traitée vers les exploitations agricoles, nécessitent des capitaux importants

qui pourraient ne pas être recovrables par la tarification de l'eau à court ou moyen terme (Marcantonio et al., 2025).

Manque d'acceptation sociale : La résistance des consommateurs et des agriculteurs aux produits irrigués avec des eaux usées traitées constitue un obstacle non technique majeur qui est difficile à surmonter par la seule information (Michetti et al., 2019).

Limitations de volume : Le volume total d'eau recyclée disponible est plafonné par la production d'eaux usées urbaines. Dans de nombreuses zones rurales ou périurbaines, les volumes d'eaux usées peuvent être insuffisants pour répondre à la demande d'irrigation à grande échelle.

Complexité de la gouvernance : La gouvernance multi-acteurs impliquant les services d'eau, les municipalités, les autorités des bassins versants, les agriculteurs, les agences de sécurité alimentaire et les organismes de santé publique donne lieu aux **défis de coordination et des coûts de transaction (Rodríguez Villanueva & Sauri, 2021).**

Usages intérieurs : Les autorités de l'eau imposent souvent des restrictions sur la réutilisation de l'eau dans les zones intérieures situées loin de la côte, où les utilisateurs en aval dépendent des mêmes ressources en eau.

Opportunités

Demande de ressources en eau alternatives liée au changement climatique : L'aggravation de la pénurie d'eau en raison du changement climatique attire l'attention économique et politique vers les eaux recyclée en tant que source d'appoint fiable (Ragab, 2023).

Technologies numériques : Les réseaux de capteurs en temps réel, l'Internet des objets (IoT), les jumeaux numériques et le pilotage des procédés par intelligence artificielle offrent des occasions à améliorer la fiabilité du traitement, **à** réduire les coûts et **à** tracer la qualité de l'eau tout au long de la chaîne de réutilisation (Radini et al., 2021).

Synergies liées à la récupération des nutriments : La coproduction de l'eau recyclée, de biogaz et de biosolides riches en nutriments au sein de systèmes intégrés de stations d'épuration génère de multiples sources de revenus qui peuvent améliorer la viabilité économique des projets de réutilisation de l'eau (Antoñolo Bermúdez et al., 2022).

Pacte vert pour l'UE et Plan d'action en faveur de l'économie circulaire : Les cadres politiques de l'UE soutiennent explicitement l'investissement dans la réutilisation de l'eau dans le cadre de la transition vers une économie circulaire, avec des possibilités de financement via les fonds structurels, le programme Horizon Europe et le Fonds européen pour les investissements stratégiques.

Intégration de la politique agricole (réforme de la PAC) : L'évolution de la Politique agricole commune vers un état conditionnel lié aux performances environnementales et **à** l'efficacité des ressources pourrait encourager l'adoption des eaux recyclée dans les États membres de l'UE confrontés à la pénurie d'eau.

Marchés émergents : L'urbanisation rapide au Moyen-Orient et en Afrique du Nord (MENA), en Asie du Sud et du Sud-Est ainsi qu'en Afrique subsaharienne crée de nouveaux marchés pour des technologies de réutilisation de l'eau peu coûteuses et adaptées aux conditions locales et aux cadres réglementaires en vigueur.

Menaces

Incertitude réglementaire concernant les contaminants de préoccupation émergente (CEC) : L'absence de seuils réglementaires clairs pour les CEC aux niveaux européen et international donne lieu à une incertitude concernant le marché et **à une responsabilité potentielle future pour les agriculteurs et les services publics utilisant de l'eau recyclée** (Berbel et al., 2023).

Exclusion du marché de la sécurité alimentaire : Le refus des détaillants d'accepter des produits provenant de fermes irriguées avec de l'eau recyclée, de marchés d'exportation ou d'organismes de certification de la sécurité alimentaire pourrait compromettre la viabilité commerciale agricole en faveur de la réutilisation par le secteur agricole, même lorsque la qualité de l'eau répond techniquement aux normes.

Concurrence avec les sources conventionnelles : Au cours des saisons ou des années de forte disponibilité en eau naturelle, la valeur marginale des eaux recyclées tombe, ce qui sape l'économie des infrastructures dédiées au traitement et à la distribution qui nécessitent une utilisation constante pour rester **économiquement** viable.

Impacts du changement climatique sur la qualité des eaux usées : Des températures plus élevées, des réseaux d'écoulement modifiés et une charge chimique accrue provenant du ruissellement agricole lors d'événements extrêmes peuvent dégrader la qualité des effluents des stations d'épuration de manière à remettre en question les systèmes de traitement.

Opposition du public : Des incidents de contamination très médiatisés — même s'ils résultent de défaillances au sein d'un système unique — peuvent ébranler la confiance du public envers les eaux recyclée à l›échelle du secteur, entraînant un durcissement de la réglementation ou un rejet par le marché.

(d) Dessalement

Forces

Source d'eau illimitée : L'eau de mer constitue, en principe, une source inépuisable d'eau douce pour les régions côtières, garantissant une indépendance totale vis-à-vis des précipitations et de la variabilité hydrologique (Shemer et al., 2023).

Qualité de l'eau élevée et constante : L'osmose inverse de l'eau de mer (SWRO) produit une eau à très faible teneur en matières dissoutes totales (TDS < 500 mg/L), exempte d'agents pathogènes et de qualité constante, quelles que soient la saison ou les conditions en amont; elle constitue ainsi une ressource agricole fiable et de haute qualité pour les cultures sensibles.

Technologie éprouvée et évolutive : L'osmose inverse de l'eau de mer (SWRO) est commercialement mature, bancable et disponible à des échelles allant de quelques centaines de m³/jour à plusieurs millions de m³/jour, avec une chaîne d'approvisionnement mondiale pour les membranes, les pompes et les dispositifs de récupération d'énergie.

Baisse des coûts et de la consommation d'énergie : La trajectoire des coûts du SWRO, dans les plus grandes usines modernes, continue de s'abaisser à mesure que s'améliorent les énergies renouvelables, la technologie des membranes et les économies d'échelle (Kurihara, 2021).

Intégration des énergies renouvelables : Le dessalement solaire et éolien peut produire de l'eau douce avec une empreinte carbone minimale (0,14–0,19 kg de CO_2/m³), ce qui s'aligne sur les objectifs de neutralité climatique (Shemer et al., 2023).

Faiblesses

Consommation d'énergie et coût élevés : Malgré les améliorations, l'osmose inverse d'eau de mer (SWRO) reste plus énergivore (3,5–4,5 kWh/m 3) et plus coûteuse que la plupart des options conventionnelles d'approvisionnement en eau ou de réutilisation des eaux usées (Politano et al., 2024).

Contraintes économiques sont également critiques, car l'eau dessalée reste nettement plus chère que les sources conventionnelles. Cela limite son utilisation principalement aux cultures de grande valeur (principalement les fruits et légumes) et nécessite souvent des subventions pour assurer la viabilité.

Défis liés à la gestion des eaux usées salines concentrées: La production du débit de l'eau usée saline concentrée présente des risques environnementaux pour les écosystèmes marins (dans le cas des rejets côtiers) ou de graves problèmes de gestion (pour l'osmose inverse de l'eau salée intérieure, BWRO, plantes).

Dépendance à l'emplacement côtier : L'osmose inverse de l'eau de mer (SWRO) n'est économiquement viable qu'à proximité des côtes ou des plans d'eau sal**és**; la distribution vers les zones agricoles intérieures nécessite un transport sur de longues distances à un coût énergétique et d'infrastructures considérables.

Empreinte carbone sous énergie conventionnelle : Lorsqu'elle est alimentée par des combustibles fossiles, la désalinisation par osmose inverse de l'eau de mer (SWRO) présente une empreinte carbone importante qui crée des tensions avec les objectifs climatiques (Shelmer et al., 2023).

Besoins fonciers et autorisations : Les grandes usines de dessalement nécessitent d'importantes superficies côtières et sont soumises à des procédures d'autorisation environnementale complexes, susceptibles de retarder, voire d'empêcher, leur construction.

Absence de réglementation spécifique concernant l'approvisionnement en eau de mer dessalée à usage agricole dans la plupart des pays.

Opportunités

Dessalement en mer : Les usines de dessalement flottantes et les systèmes en mer peuvent réduire la concurrence pour les terres côtières et simplifier la gestion des eaux usées salines concentrées en milieu marin.

Systèmes hybrides : L'intégration d'osmose inverse d'eau de mer (SWRO) avec la réutilisation des eaux usées (dilution de eaux usées salines concentrées avec de l'eau recyclée, rejet combiné d'effluents de l'eau usées salines concentrées-l'eau usée) et avec les énergies renouvelables crée des synergies qui réduisent à la fois les coûts et les impacts sur l'environnement (Crutchik & Campos, 2021).

Valorisation des eaux usées salines concentrées: Les technologies émergentes de récupération des minéraux (lithium, magnésium, potassium, uranium) contenus dans l'eau usée saline concentrée de dessalement pourraient fournir des coproduits précieux qui améliorent l'économie du projet (Politano et al., 2024).

Dessalement adapté à l'agriculture : La conception de systèmes de dessalement spécifiquement conformes aux normes de qualité agricoles (plutôt qu'aux normes d'eau potable) réduit les risques agronomiques et pourrait diminuer les coûts énergétiques et de post-traitement si d'autres sources d'eau de mélange sont disponibles, rendant ainsi le dessalement plus compétitif économiquement pour l'irrigation.

Augmentation de la demande liée au changement climatique : A mesure que la pénurie d'eau douce s'aggrave dans les régions côtières en raison du changement climatique, l'avantage concurrentiel du dessalement par rapport aux sources conventionnelles de moins en moins fiables va croître.

Menaces

Risques liés au prix et à la disponibilité de l'énergie : Le dessalement à grande échelle donne lieu à une dépendance structurelle sur une énergie abordable et fiable; les fluctuations des prix de l'énergie ou l'instabilité du réseau peuvent augmenter considérablement les coûts de production.

Composition chimique des eaux de dessalement, en particulier leur teneur en bore, peut entraîner une phytotoxicité chez les cultures sensibles si elle n'est pas correctement contrôlée. De plus, une faible teneur en minéraux et la dominance du sodium peuvent également entraîner une dégradation des sols, des déséquilibres nutritionnels ou une corrosion des infrastructures. Ces effets peuvent être atténués par le mélange ou le post-traitement, mais nécessitent une gestion prudente (Martínez Álvarez et al., 2023).

Tableau 3. Analyse SWOT (Forces, Faiblesses, Opportunités et Menaces) pour des ressources en eau non conventionnelles pour but d'irrigation.

	FORCES	**FAIBLESSES**
REUTILISATION	Approvisionnement en nutriments; proximité; disponibilité tout au long de l'année; économie circulaire; technologie éprouvée; résistance climatique	Variabilité de la qualité; incertitude réglementaire des contaminants de préoccupation émergente (CEC); risque de salinité; coût des infrastructures; acceptation sociale; plafond de volume; utilisations intérieures
DESSALEMENT	Source illimitée ; qualité constante; évolutivité; baisse des coûts; intégration des énergies renouvelables; sécurité stratégique	Intensité d'énergie; gestion des eaux usées salines concentrées; adaptation à la qualité agricole; dépendance côtière; coût
	OPPORTUNITES	**MENACES**
REUTILISATION	Soutien politique de l'UE/Pacte vert; technologie numérique; récupération des nutriments; raréfaction croissante de l'eau	Incertitude liée à la réglementation de contaminants de préoccupation émergente; rejet du marché; concurrence des sources conventionnelles
DESSALEMENT	Systèmes en mer; approches hybrides; valorisation des eaux usées salines concentrées; demande liée au climat	Risques liés au prix de l'énergie; impacts sur les écosystèmes marins; opposition du public; Dépendance et enfermement

Impacts sur les écosystèmes marins : Le débit cumulé des eaux usées salines concentrées provenant de plusieurs usines concentrées dans des mers semi-fermées (golfe Persique, Méditerranée) pose des risques à long terme pour la biodiversité marine, susceptibles d'entraîner des restrictions réglementaires.

Effets du changement climatique sur la température et la qualité de l'eau de mer : L'augmentation de la température de surface de la mer accélère l'encrassement biologique des membranes et peut modifier la composition de l'eau de mer de telle manière qu'elle peut affecter l'efficacité du traitement.

Opposition publique et acceptabilité sociale : Les communautés locales vivant à proximité des sites de dessalement prévus s'opposent souvent au développement en raison de préoccupations concernant les impacts côtiers, le bruit et l'intrusion visuelle.

Dépendance et enfermement technologique : Les sociétés qui deviennent fortement dépendantes du dessalement pour leur sécurité hydrique sont exposées à un enfermement technologique, à des risques liés aux prix et à la vulnérabilité des infrastructures.

5. CONCLUSIONS

Les ressources en eau non conventionnelles (NCWR) — telles que les eaux usées recyclées et l'eau dessalée — constituent des leviers essentiels pour une transition vers une gestion durable et résistante au climat destinées à la production alimentaire. Aucune de ces sources ne peut remplacer en gros l'eau douce conventionnelle, mais dans des contextes stratégiquement définis, en particulier dans les régions côtières et méditerranéennes où l'eau est rare, elles offrent la perspective de réduire considérablement l'écart croissant entre la demande en eau agricole et l'offre disponible, y compris les ressources en eau non conventionnelles (NCWR) dans le mélange d'eau disponible pour l'agriculture.

Selon le point de vue purement volumétrique, il existe énorme potentiel mais reste largement inexploité. Si l'on parvenait à réutiliser la totalité de quelque 188 milliards de m³ d'eaux usées traitées générées chaque année dans le monde (au lieu de 40,7 milliards de m³ actuellement réutilisés), cela suffirait à accroître considérablement l'approvisionnement en eau disponibles, en particulier à l'échelle des bassins versants et des régions. De même, l'intensification du dessalement pour répondre aux besoins agricoles (où environ 2 700 km³/an d'eau sont prélevés pour l'irrigation à l›échelle mondiale selon la FAO) nécessiterait des avancées technologiques et économiques d'une ampleur considérable. Avec les technologies et les structures de coûts actuelles, les ressources en eau non conventionnelles (NCWR) ne peuvent pas remplacer les systèmes d'approvisionnement en eau douce conventionnels à l'échelle mondiale; mais, néaumoins elles peuvent jouer un rôle déterminant dans des contextes géographiques et sectoriels spécifiques, notamment dans les régions côtières confrontées à la pénurie d'eau, les zones au climat méditerranéen et les régions agricoles arides ou semi-arides. Le principal défi, par conséquent, n'est pas purement volumétrique, mais concerne également la gouvernance, les aspects économiques, le déploiement des technologies, l'alignement réglementaire et l'acceptation sociale.

La réutilisation de l'eau présente le plus grand potentiel d'expansion immédiate à l'échelle mondiale, compte tenu des infrastructures existantes pour la collecte et le traitement des eaux usées dans la plupart des pays développés, la proximité des stations d'épuration des eaux usées (WWTP) des zones agricoles irriguées, et les multiples co-bénéfices liés à l'apport en nutriments et à l'économie circulaire. Les principaux obstacles sont d'ordre économique (investissements dans les infrastructures), réglementaire (alignement de la gouvernance, cadres relatifs aux contaminants de préoccupation émergente (CEC)) et social (acceptation

par le public et le marché). Des approches intégrées, interdisciplinaires et territoriales sont indispensables pour surmonter ces obstacles.

Le dessalement de l'eau de mer (DSW) apparaît comme une ressource stratégique et fiable capable de découpler la production agricole de la variabilité hydrologique et de fournir un approvisionnement résistant à la sécheresse. Son application est particulièrement adaptée aux systèmes agricoles de grande valeur et technologiquement avancés, où les coûts de l'eau représentent une part relativement faible de la production totale et où les ressources alternatives sont limitées ou indisponibles.

D'un point de vue technique et agronomique, le dessalement a atteint un haut niveau de maturité, l'osmose inverse permettant une production à grande échelle d'eau d'irrigation de qualité. Cependant, son intégration dans le secteur agricole nécessite une gestion prudente en raison de ses caractéristiques physico-chimiques spécifiques, notamment sa faible teneur en nutriments et la présence d'éléments phytotoxiques tels que le bore. Ces contraintes nécessitent des processus de post-traitement, des stratégies de mélange et des pratiques de fertigation adaptées à la santé du sol et à la productivité des cultures. Bien que de telles mesures puissent atténuer efficacement les risques potentiels, elles augmentent également la complexité du système et les exigences opérationnelles.

Les considérations économiques et environnementales restent au cœur de la viabilité à long terme de l'utilisation de dessalement de l'eau de mer (DSW) en agriculture. La consommation élevée d'énergie continue de faire augmenter les coûts de production et les émissions de gaz à effet de serre (GES) associées, ce qui limite l'adoption généralisée de cette technologie au-delà des cultures à haut rendement et des régions bénéficiant de cadres politiques favorables. En même temps, la durabilité du dessalement dépend de facteurs tels que la proximité des zones irriguées, les sources d'énergie et la gestion des impacts environnementaux, en particulier la gestion des eaux usées salines concentrées.

Dans l'ensemble, l'eau de mer dessalée représente une solution prometteuse mais dépendante du contexte pour l'approvisionnement en eau agricole. Sa mise en œuvre réussie nécessite des stratégies intégrées qui combinent l'innovation technologique, la faisabilité économique, l'adaptation agronomique et les mesures de protection de l'environnement. À cet égard, le dessalement de l'eau de mer (DSW) ne doit pas être considérée comme un produit de substitution universel des ressources conventionnelles, mais plutôt comme une composante complémentaire au sein de systèmes diversifiés et résistants de gestion de l'eau afin d'assurer la durabilité agricole à long terme.

6. REFERENCES

Abdelraouf, R.E., Abdou, M.A.A., Bakr, A., Hamza, A.E., Rashad, Y.M., Abd-ElGawad, A.M., Hafez, M.; Ragab, R. 2024. Enhancing Tomato Production by Using Non-Conventional Water Resources within Integrated Sprinkler Irrigation Systems in Arid Regions. Atmosphere, 15, 722.

Ait-Mouheb, N., Mayaux, P.-L., Mateo-Sagasta, J., Hartani, T., & Molle, B. 2020. Water reuse: A resource for Mediterranean agriculture. In Water Resources in the Mediterranean Region (pp. 107–136). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818086-0.00005-4

Alcaide, C., Fernández García, I., González Perea, R., Camacho Poyato, E., Rodríguez Díaz, J.A. 2019. REUTIVAR: Model for Precision Fertigation Scheduling for Olive Orchards Using Reclaimed Water. Water. 11, 2632

Alcaide, C., Fernández García, I., Martín, I. Camacho Poyato, E., Rodríguez Díaz, J.A. 2022. Spatio-temporal analysis of nitrogen variations in an irrigation distribution network using reclaimed water for irrigating olive trees. Agricultural Water Management, 262, 107353

Antiñolo Bermúdez, L., Leyva Díaz, J.C., Martín Pascual, J., Muñío Martínez, M.d.M., Poyatos. 2022 Study of the Potential for Agricultural Reuse of Urban Wastewater with Membrane Bioreactor Technology in the Circular Economy Framework. Agronomy, 12, 1877.

Aznar-Sánchez, J.A, Belmonte-Ureña, L.J, Velasco-Muñoz J.F., Valera, D.L. 2021. Farmers' profiles and behaviours toward desalinated seawater for irrigation: Insights from South-east Spain. Journal of Cleaner Production 296, 126568.

Barlow, S. M., Boobis, A. R., Bridges, J., Cockburn, A., Dekant, W., Hepburn, P., Houben, G. F., König, J., Nauta, M. J., Schuermans, J., & Bánáti, D. 2015. The role of hazard- and risk-based approaches in ensuring food safety. Trends in Food Science & Technology, 46(2), 176–188. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.10.007

Ben-Gal, A., Yermiyahu, U., Cohen, S. 2009. Fertilization and blending alternatives for irrigation with desalinated water. J Environ Qual 2009, 38, 529–36.

Berbel, J., Mesa Pérez, E., Simón, P. 2023. Challenges for Circular Economy under the EU 2020/741 Wastewater Reuse Regulation. Global Challenges, 7, 7: 1-12

Boutagayout, A., Hamdani, A., Boutgayout, I., Adiba, A. 2025. Towards sustainable water management in Morocco: assessing resources, challenges, and adaptation strategies. Frontiers in Sustainable Food Systems, 10, 3389.

Cadena Aponte, F., Plaza Bolaños, P., Agüera, A., Nahim Granados, S., Berruti, I., Abeledo-Lameiro, M.J., Polo López, M.I. 2025. From the Reclaimed Water Treatment Plant to Irrigation in Intensive Agriculture Farms: Assessment of the Fate of Antibiotics, Antibiotic Resistance Bacteria and Genes, and Microbial Pathogens at Real Scale. Environ. Sci. Technol., 59, 19953−19965

California State Water Resources Control Board. 2000. California Water Recycling Criteria (Title 22, Division 4, Chapter 3).

Capilla, J.M. 2022 Study of the Potential for Agricultural Reuse of Urban Wastewater with Membrane Bioreactor Technology in the Circular Economy Framework. Agronomy, 12, 1877.

Carter, L., Dennis, S., Allen, K. et al. 2024. Mitigating Contaminant-Driven Risks for the Safe Expansion of the Agricultural Sanitation Circular Economy in an Urbanizing World. ACS EST Water, 4, 1166−1176

Crutchik, D., Campos, J.L. 2021. Municipal Wastewater Reuse: Is it a Competitive Alternative to Seawater Desalination? Sustainability, 13, 6815.

Daghari, H., Janson, A., & Bouzidi, Y. 2022. Assessment of desalination as an alternative water supply for agriculture in arid regions. Water, 14(6), 1712.

De las Heras, J., Mañas, P. 2020. Reclaimed Wastewater to Irrigate Olive Groves and Vineyards: Effects on Soil Properties. Agronomy 2020, 10, 649

Declercq, R., Loubier, S., Condom, N., Molle, B. 2020. Socio-Economic Interest of Treated Wastewater Reuse in Agricultural Irrigation and Indirect Potable Water Reuse: Clermont-Ferrand and Cannes Case Studies' Cost–Benefit Analysis. Irrig. and Drain., 69 (Suppl. 1): 194–208

Elimelech, M., Phillip, W.A. 2011.The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment. Science, 333, 712–7.

European Food Safety Authority. 2016. Hazard vs. Risk. https://www.efsa.europa.eu/en/discover/infographics/hazard-vs-risk.

European Parliament, & Council of the European Union. 2020. Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the Council on minimum requirements for water reuse. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32020R0741

Expósito, A., Lorenzo Lopez, A. M., & Berbel, J. 2024. How much does reclaimed wastewater cost? A comprehensive analysis for irrigation uses in the European Mediterranean context. Water Reuse, 14(3), 434–447. https://doi.org/10.2166/wrd.2024.040

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2017. Water for Sustainable Food and Agriculture. ISBN 978-92-5-109977-3

Fernandes, E., Cunha Marques, R. 2023. Review of Water Reuse from a Circular Economy Perspective. Water. 15, 848.

Gallego-Elvira, B., Reca, J., Martin-Gorriz, B., Maestre-Valero, J.F. and Martinez-Alvarez, V. 2021. Irriblend-DSW: A decision support tool for the optimal blending of desalinated and conventional irrigation waters in dry regions. Agricultural Water Management, 255, 107012.

Ghaffour, N., Bundschuh, J., Mahmoudi, H., Goosen, M.F.A. 2015. Renewable energy-driven desalination technologies: a comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems. Desalination, 356, 94–114.

Gómez Lucena, I., Camacho Poyato, E., Martín, I. Draissi, K.F., Rodríguez Díaz, J.A. 2024. NITRINET: A predictive model for nitrification in reclaimed water distribution in pressurised irrigation networks. Agricultural Water Management, 302,108982

GWI. 2023. Desalination Markets. Global Water Intelligence (GWI)

Hafez, M.; Ragab, R. 2024. Enhancing Tomato Production by Using Non-Conventional Water Resources within Integrated Sprinkler Irrigation Systems in Arid Regions. Atmosphere, 15, 722.

Ho, J., Ahmadi, J., Hübner, U., Tiehm, A., Drewes, J. 2024. Assuring reclaimed water quality using a multi-barrier treatment train according to the new EU non-potable water reuse regulation. Water Research, 267, 122429

Huerta M, Teijeiro MT, Kurek M, Campos M, Brito da Luz P, Cancela JJ (2025). Analysis of Strategies/ Policies for the Use of Reclaimed Water-SUDOE. I-ReWater project (S1/2.5/E0136). 50 p.. URL: https://hdl.handle.net/10347/40809

INE, 2023.Spanish National Institute of Statistics [WWW Document]. URL https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?tpx=53450

International Organization for Standardization. 2018. ISO 20426: Guidelines for health risk assessment and management for non-potable water reuse.

International Organization for Standardization. 2020. ISO 16075: Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects.

Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T. H., Smakhtin, V., Kang, S. M. 2019. The state of desalination and brine production: A global outlook. Science of The Total Environment, 657, 1343-1356.

Jones, E.R., van Vliet, M.T.H., Qadir, M., Bierkens, M.F.P. 2021. Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse. Earth Syst. Sci. Data, 13, 237–254

Kurihara, M. 2021. Current Status and Future Trend of Dominant Commercial Reverse Osmosis Membranes. Membranes, 11, 906

Lahav, O., Birnhack, L. 2007. Quality criteria for desalinated water following post treatment. Desalination 207, 286–303.

Lapuente, E. 2012. Full cost in desalination. A case study of the Segura River Basin. Desalination, 300, 40–5.

López-Serrano, M.J., Velasco-Muñoz, J.F., Aznar-Sánchez, J.A., Román-Sánchez, I.M. 2021. Economic Analysis of the Use of Reclaimed Water in Agriculture in Southeastern Spain, A Mediterranean Region. Agronomy, 11, 2218.

Macedo, H.E., Lehner, L., Nicell, J., et al. 2022. Distribution and characteristics of wastewater treatment plants within the global river network. Earth Syst. Sci. Data, 14, 559–577

Maffettone, R., & Gawlik, B. M. 2022. Technical Guidance Water Reuse Risk Management for Agricultural Irrigation Schemes in Europe. https://dx.doi.org/10.2760/590804

Maki, A., Pedrero, F., Hafsi, M., Guerber, F. 2025. Desalination for agriculture development: Addressing opportunities and challenges in the context of changing climate and the global agricultural commodity market – Expert consultation workshop report. Tunis, FAO. https://doi.org/10.4060/cd4781en

Marcantonio, C., Mangiagli, G., Boni, M.R., et al. 2025. Are we ready for the application of the EU Regulation on wastewater reuse in agriculture? A techno-economic preliminary evaluation based on a case-study. Journal of Environmental Management. 373, 123973

Martin-Gorriz, B., Soto-García, M., Martínez-Alvarez, V. 2014. Energy and greenhouse-gas emissions in irrigated agriculture of SE (southeast) Spain. Effects of alternative water supply scenarios. Energy, 77, 478–88.

Martínez-Alvarez V., Maestre-Valero J.F., González-Ortega M.J., Gallego-Elvira, V., Martin-Gorriz B. 2019. Characterization of the Agricultural Supply of Desalinated Seawater in Southeastern Spain. Water, 11, 1233.

Martínez-Alvarez, V., González-Ortega, M.J., Martin-Gorriz, B., Soto-García, M., Maestre-Valero, J.F. 2018. Seawater desalination for crop irrigation—Current status and perspectives. Editor(s): Veera Gnaneswar Gude. In: Emerging Technologies for Sustainable Desalination Handbook, Butterworth-Heinemann, 2018, 461-492.

Martínez-Alvarez, V., Imbernón-Mulero, A., Gallego-Elvira, B., Soto-García, M., Maestre Valero, J.F. 2023. Multidisciplinary assessment of the agricultural supply of desalinated seawater in south-eastern Spain. Desalination, 548, 116252.

Martínez-Álvarez, V., Imbernón-Mulero, A., Maestre-Valero, J.F.; Ben Abdallah, S., Gallego-Elvira, B. 2023. Agronomic Analysis of the Replacement of Conventional Agricultural Water Supply by Desalinated Seawater as an Adaptive Strategy to Water Scarcity in South-Eastern Spain. Agronomy,13, 2878.

Martínez-Alvarez, V., M., Maestre-Valero, J.F. 2025. Irrigation with non-conventional water. In Engineering, Water and Food Nexus. Eds. Silva, A., Gonçalves, J.M. World Federation of Engineering Organizations (WFEO), 2025, 117-133.

Martínez-Alvarez, V.; González-Ortega, M.J.; Martin-Gorriz, B.; Soto-García, M.; Maestre-Valero, J. F. 2017. The use of desalinated seawater for crop irrigation in the Segura River basin (South-eastern Spain). Desalination, 422, 153–164.

Michetti, M., Raggi, M., Guerra, E., Viaggi, D. 2019. Interpreting Farmers' Perceptions of Risks and Benefits Concerning Wastewater Reuse for Irrigation: A Case Study in Emilia-Romagna (Italy). Water, 11, 108

MITECO, 2021. National Plan for Water Treatment, Sanitation, Efficiency, Water Conservation and Reuse.

Politano, A., Al-Juboori, R.A., Alnajdi, S. et al. 2024. 2024 roadmap on membrane desalination technology at the water-energy nexus. Journal of Physics Energy, 6, 2

Poustie, A., Yang, Y., Velburg, P., Pagilla, K., Hanigan, D. 2020. Reclaimed wastewater as a viable water source for agricultural irrigation: A review of food crop growth inhibition and promotion in the context of environmental change. Science of the Total Environment. 739, 139756

Radini, S., Marinelli, E., Akyol, Ç. et al., 2021. Urban water-energy-food-climate nexus in integrated wastewater and reuse systems: Cyber-physical framework and innovations. Applied Energy, 298, 117268

Ragab, R. 2023. The global challenges facing the water resources and irrigation sector. 4th African Regional Conference on Geosynthetics (GeoAfrica 2023). E3S Web Conf. 368

Rodríguez-Villanueva, P., Sauri, D. 2021. Wastewater Treatment Plants in Mediterranean Spain: An Exploration of Relations between Water Treatments, Water Reuse, and Governance. Water, 13, 1710

Rodríguez, P., Palma, D., Poch, M., Cugueró-Escofet, M. Á., & Sauri, D. 2019. The geographical context of wastewater treatment and reuse: a benchmarking analysis for Spanish Mediterranean Wastewater Treatment Plants. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 82, 2795, 1–30.

Savchenko, O. M., Kecinski, M., Li, T., & Messer, K. D. 2019. Reclaimed water and food production: Cautionary tales from consumer research. Environmental Research, 170, 320–331. https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2018.12.051

Shaffer, D.L., Yip, N.Y., Gilron, J., Elimelech, M. 2012. Seawater desalination for agriculture by integrated forward and reverse osmosis: improved product water quality for potentially less energy. J Membr Sci 415–416, 1–8.

Shahabi, M.P., McHugh, A., Anda, M., Ho, G. Environmental life cycle assessment of seawater reverse osmosis desalination plant powered by renewable energy. Renew Energy 67, 53–8.

Shemer, H.; Wald, S.; Semiat, R. 2023. Challenges and Solutions for Global Water Scarcity. Membranes, 13, 612

Soto-García, M., Martin-Gorriz, B., García-Bastida, P.A., Alcón F., Martínez-Alvarez, V. 2013. Energy consumption for crop irrigation in a semiarid climate (south-eastern Spain). Energy, 55, 1084–93.

Spiritos E, Lipchin C. 2013. Desalination in Israel. In: Water policy in Israel: context, issues and options. Dordrecht, Netherlands: Springer Publishing, 2013, 101–123.

Suwaileh, W., Johnson, D., Hilal, N. 2020. Membrane desalination and water re-use for agriculture: state of the art and future outlook. Desalination, 491, 114559.

United Nations. 2023. Water Scarcity, the Climate Crisis and Global Food Security: A Call for Collaborative Action. https://www.un.org/en/un-chronicle/water-scarcity-climate-crisis-and-global-food-security-call-collaborative-action

Ventura, D., Consoli., S., Barbagallo, S., et al. 2019. How to Overcome Barriers for Wastewater Agricultural Reuse in Sicily (Italy)? Water, 11, 335.

Villar-García, A. del, 2016. Reutilización de aguas regeneradas: aproximación a los costes de producción y valoración de su uso.(In English: *Reuse of reclaimed water: an analysis of production costs and an assessment of its use*). Agua y Territ. 70–79. https://doi.org/10.17561/at.v0i8.3297

Wang, C., Wang, L., Dong, L., Shon, H.K., Kim, J. 2025. Specific energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants using machine learning. Desalination 602, 118654.

Yermiyahu, U., Tal, A., Ben-Gal, A., Bar-Tal, A., Tarchitzky, J., Lahav, O. 2007, Rethinking desalinated water quality and agriculture. Science, 318, 920–921.

Yuan, J., Van Dyke, M.I., Huck, P.M. 2017. Identification of critical contaminants in wastewater effluent for managed aquifer recharge. Chemosphere. 172: 294-301

Zolghadr-Asli, B., McIntyre, N., Djordjevic, S., Farmani, R., Pagliero, L., Martínez-Alvarez, V., Maestre-Valero, JF. 2023. A review of limitations and potentials of desalination as a sustainable source of water. Environ Sci Pollut Res Int 30 (56),118161-118174.

ABSTRACTS OF PAPERS RECEIVED IN RESPONSE TO /
RÉSUMÉS DES ARTICLES REÇUS EN RÉPONSE À

Q.68.1: In the context of water reuse (REUSE), how can integrated, interdisciplinary, and territorial approaches contribute to overcoming sociological, economic, and regulatory obstacles?

Dans le contexte de la réutilisation de l'eau (REUSE), comment est-ce que des approches intégrées, interdisciplinaires et territoriales peuvent contribuer à surmonter les obstacles sociologiques, économiques et réglementaires?

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.68.1.01 **USE OF TREATED WASTEWATER FOR AGRICULTURE THROUGH MICRO IRRIGATION IN INDIA: A SUSTAINABLE SOLUTION** 565
UTILISATION DES EAUX USÉES TRAITÉES POUR L'AGRICULTURE PAR MICRO-IRRIGATION EN INDE: UNE SOLUTION DURABLE
Somnath Jadhav (India)

R.68.1.02 **HYDROPONIC CROP PRODUCTION USING HOTEL GREYWATER: GROWTH AND SAFETY ASSESSMENT** 567
PRODUCTION HYDROPONIQUE À PARTIR D'EAUX USÉES D'HÔTEL: ÉVALUATION DE LA CROISSANCE ET DE LA SÉCURITÉ
Josephine Vosse, Sofia Semitsoglou Tsiapou, Lúcia Helena Santos, Lucas Alonso, Esther Mendoza, Joaquim Comas, and Gianluigi Buttiglieri (Spain)

R.68.1.03 **ADAPTING IRRIGATED AGRICULTURE TO REDUCED WATER TRANSFERS: THE ROLE OF NON-CONVENTIONAL WATER RESOURCES IN SOUTHEASTERN SPAIN** 569
ADAPTER L'AGRICULTURE IRRIGUÉE À LA DIMINUTION DES TRANSFERTS D'EAU: LE RÔLE DES RESSOURCES EN EAU NON CONVENTIONNELLES DANS LE SUD-EST DE L'ESPAGNE
C. Villacorta Ranera, I. Blanco Gutiérrez, A. Escriva-Bou, and P. Esteve, (Spian)

R.68.1.04 **DEVELOPMENT OF A NATURE-BASED SOLUTION TO ENABLE THE REUSE OF TREATED WASTEWATER IN AGRICULTURE** 571
DÉVELOPPEMENT D'UNE SOLUTION FONDÉE SUR LA NATURE POUR PERMETTRE LA RÉUTILISATION DES EAUX USÉES TRAITÉES EN AGRICULTURE
Diana Le Berre Rémi Lombard-Latune, and Jaime Nivala (France)

R.68.1.05 **WOMEN PRESERVE "AGRICULTURAL" HERITAGE UNDER WATER REUSE IN TUNISIA** 572
LES FEMMES PRÉSERVENT LE PATRIMOINE « AGRI-CULTUREL » GRÂCE À LA RÉUTILISATION DE L'EAU EN TUNISIE
O. Mahjoub, J. L. Ullman, and S. Harigua (Tunisia)

R.68.1.06 **A GROUNDED APPROACH TO THE REUSE OF TREATED WASTEWATER: ENVIRONMENT AND MODERNIZATION** 574
UNE APPROCHE TERRE-A-TERRE DE LA REUTILISATION DES EAUX USEES TRAITEES: ENVIRONNEMENT ET MODERNISATION
Anne-Laure Collard (France)

R.68.1.07 **A POLICY SUPPORT SYSTEM FOR ADVANCING SDG-6 ACHIEVEMENT IN TUNISIA** 575
UN SYSTÈME D'ACCOMPAGNEMENT POLITIQUE POUR FAVORISER LA RÉALISATION DE L'ODD-6 EN TUNISIE
O. Mahjoub, A. Ouasli, A. Jridi, O. Sebai, N. Hamrouni, N. Ferjani, A. Arif, L. Guppy, M. Qadir, S. Jafarzadeh, E. H. Lee, and C. K. Park (Tunisia)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.68.1.08 FEASIBILITY ASSESSMENT OF INTEGRATED WATER SUPPLY FOR RURAL FARMS AND URBAN RESIDENTS: EVIDENCE FROM NEW ZEALAND 577
ÉVALUATION DE LA FAISABILITÉ D'UN SYSTÈME INTÉGRÉ D'APPROVISIONNEMENT EN EAU POUR LES EXPLOITATIONS AGRICOLES RURALES ET LES HABITANTS DES ZONES URBAINES: LE CAS DE LA NOUVELLE-ZÉLANDE
Birendra KC, Arno Benadie, Raj Khadka, Bart Schultz and Krishna Prasad (New Zealand)

R.68.1.09 DISTILLERY EFFLUENT IRRIGATION, BIOCHAR, AND SOIL NUTRIENT BALANCE 579
IRRIGATION À BASE D'EFFLUENTS DE DISTILLERIE, BIOCHAR ET ÉQUILIBRE NUTRITIONNEL DU SOL
Yi-Tai Liao, Li-Chi Chiang, Ci-Jyun Liao, and Feng -Wen Chen (Taiwan)

R.68.1.10 DESIGNING A SERIOUS GAME FOR PARTICIPATORY REUSE PLANNING IN THE WEST BANK 581
CONCEPTION D'UN JEU CONSÉQUENT POUR LA PLANIFICATION PARTICIPATIVE DE LA RÉUTILISATION DES EAUX EN CISJORDANIE
B. Noury, M. Ramnuth, T. Cazalis, F. Abu Seif, I. Dababat, I. and Atallah, C. Papin. (France)

R.68.1.11 INTEGRATED EVALUATION OF SOIL PROPERTIES AND CROP RESPONSE TO TREATED DAIRY WASTEWATER IRRIGATION 583
ÉVALUATION INTÉGRÉE DES PROPRIÉTÉS DU SOL ET DE LA RÉACTION DES CULTURES À L'IRRIGATION AVEC DES EAUX USÉES LAITIÈRES TRAITÉES
Oulaya Zoui, Aziz Abouabdillah, Abdelkader Chehlaoui and Mohamed Bourioug (Morocco)

R.68.1.12 SUBSTITUTING CONVENTIONAL RAW WATER WITH REUSE WATER. LIMITATIONS AND CONSTRAINTS. ILLUSTRATION USING THE MONTPELLIER MÉDITERRANÉE MÉTROPOLE PROJECT 585
REMPLACEMENT DE L'EAU BRUTE CONVENTIONNELLE PAR DE L'EAU RÉUTILISÉE. LIMITES ET CONTRAINTES. ILLUSTRATION A PARTIR DU PROJET DE MONTPELLIER MEDITERRANEE METROPOLE
Burgaud, Laurence, Montginoul Marielle (France)

R.68.1.13 A DISRUPTIVE APPROACH TO THE REUSE OF TREATED WASTEWATER IN SOUTHERN TUNISIA 587
UNE APPROCHE NOVATRICE DE LA REUTILISATION DES EAUX USEES TRAITEES DANS LE SUD DE LA TUNISIE
O. STINTZY, Ph.D. and Jean-Marc PHILIP (Luxembourg)

R.68.1.14 ROAD RUNOFF WATER: INTEGRATED APPROACH TO OVERCOMING BARRIERS TO WATER REUSE 589
EAUX DE RUISSELLEMENT DES ROUTES: UNE APPROCHE INTÉGRÉE POUR SURMONTER LES OBSTACLES À LA RÉUTILISATION DE L'EAU
Juline Volpellière (France)

R.68.1.15 AN INTEGRATED APPROACH FOR WEF NEXUS IMPLEMENTATION UNDER WATER REUSE IN TUNISIA 591
UNE APPROCHE INTÉGRÉE POUR LA MISE EN ŒUVRE DU NEXUS EAU-ÉNERGIE-ALIMENTATION-ENVIRONNEMENT DANS LE CADRE DE LA RÉUTILISATION DE L'EAU EN TUNISIE
A. Ben Slimane, O. Mahjoub, A. Zairi, H. Amami, R. Aouay and M. Taghouti (Tunisia)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.68.1.16 **POLICY PRACTICES AND IMPLEMENTATION PATHWAYS OF UNCONVENTIONAL WATER SOURCE UTILIZATION IN CHINA — CONTRIBUTIONS TO SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOAL 6** **593**
PRATIQUES POLITIQUES ET VOIES DE MISE EN ŒUVRE DE L'UTILISATION DES RESSOURCES EN EAU NON CONVENTIONNELLES EN CHINE — CONTRIBUTIONS AU DEVELOPPEMENT DURABLE OBJECTIF 6
Zheru Wu (China)

R.68.1.17 **INTEGRATION OF TREATED WASTEWATER REUSE AND SOLAR-POWERED SPRINKLER IRRIGATION FOR CLIMATE-RESILIENT SMALLHOLDER** **594**
INTÉGRATION DE LA RÉUTILISATION DES EAUX USÉES TRAITÉES ET DE L'IRRIGATION PAR ASPERSION ALIMENTÉE À L'ÉNERGIE SOLAIRE POUR UNE AGRICULTURE DE PETITE EXPLOITATION RÉSILIENTE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE
Dr Dilip Yewalekar, and Manisha Kinge (India)

R.68.1.18 **COMPARATIVE REVIEW OF INTERNATIONAL WATER REUSE POLICIES FROM A RISK MANAGEMENT PERSPECRTIVE** **596**
ÉTUDE COMPARATIVE DES POLITIQUES INTERNATIONALES DE RÉUTILISATION DE L'EAU DU POINT DE VUE DE LA GESTION DES RISQUES
Ignacio Gómez-Lucena, Nassim Ait-Mouheb, Emilio Camacho and Juan Antonio Rodríguez-Díaz (Spain)

R.68.1.19 **STORING TREATED WASTEWATER: (DE) LIMITING AND DEFINING POSSIBLE FUTURES FOR IRRIGATION IN AREAS WITH STRUCTURAL WATER SHORTAGES (SOUTH-WEST FRANCE)** **598**
STOCKAGE DES EAUX USEES TRAITEES: (DE) LIMITER ET DEFINIR LES AVENIRS POSSIBLES DE L'IRRIGATION DANS LES ZONES SOUFFRANT DE PENURIES HYDRIQUES STRUCTURELLES (SUD-OUEST DE LA FRANCE)
Romain Carrausse, Selin Le Visage (France)

R.68.1.20 **AGRICULTURAL WATER REUSE IN CALIFORNIA: CLIMATE RESILIENCE LESSONS** **600**
LA RÉUTILISATION DE L'EAU DANS L'AGRICULTURE EN CALIFORNIE: LES ENSEIGNEMENTS EN MATIÈRE DE RÉSILIENCE CLIMATIQUE
Francisco Pedrero Salcedo, Michael Cahn, Belinda Platts and Isaya Kisekka (Spain)

R.68.1.21 **BEYOND TREATMENT: DESIGNING TREATED WASTEWATER REUSE AS AN INTEGRATED SYSTEM OF TERRITORIAL SERVICES** **602**
AU-DELÀ DU TRAITEMENT: CONCEVOIR LA RÉUTILISATION DES EAUX USÉES TRAITÉES COMME UN SYSTÈME INTÉGRÉ DE SERVICES TERRITORIAUX
M.T. Laaouimri, T. Ourbak, and H. Bilrha (Morocco)

R.68.1.22 **AN INTEGRATED PLANNING AND RISK MANAGEMENT FRAMEWORK FOR SCALING UP AGRICULTURAL WATER REUSE IN LARGE-SCALE IRRIGATION DISTRICTS UNDER REGULATION (EU) 2020/741** **604**
UN CADRE INTÉGRÉ DE PLANIFICATION ET DE GESTION DES RISQUES POUR LA CROISSANCE DE LA RÉUTILISATION DE L'EAU AGRICOLE DANS LES DISTRICTS D'IRRIGATION À GRANDE ÉCHELLE AU TITRE DU RÈGLEMENT (UE) 2020/741
Pietro Drei, Giuseppe Maistrello, Stevo Lavrnić, Giuseppe Mancuso, Francesca Valenti, and Attilio Toscano (Italy)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.68.1.23 **PARADOXES OF WATER REUSE: WHEN CIRCULARITY CONFLICTS WITH ENVIRONMENTAL AND GOVERNANCE PRINCIPLES** **606**
LES PARADOXES DE LA REUTILISATION DE L'EAU: QUAND LA CIRCULARITE ENTRE EN CONFLIT AVEC LES PRINCIPES ENVIRONNEMENTAUX ET DE GOUVERNANCE
Thomas Harmand, Vincent Kulesza, Barbara Howes, Frédéric Bouin, and Nicolas Roche (France)

R.68.1.24 **SCALING UP WASTEWATER REUSE: LESSONS FROM REUT'O'SUD LIVING-LABS** **608**
ACCROÎTRE LA RÉUTILISATION DES EAUX USÉES: LES ENSEIGNEMENTS TIRÉS DES LIVING-LABS DE REUT'O'SUD
P. Lombard--Creisson, N. Roche, B. Howes, P. Dewaele, J. Cherel, and A. Rotereau (France)

R.68.1.25 **EFFECT OF TRANSPIRATION ON THE ACCUMULATION AND TRANSPORT OF BISPHENOL A IN CROP UNDER RECLAIMED WATER IRRIGATION** **610**
EFFET DE LA TRANSPIRATION SUR L'ACCUMULATION ET LE TRANSPORT DU BISPHENOL A DANS LES CULTURES IRRIGUEES AVEC DES EAUX RECYCLEES
Panpan Zhao, Wenyong Wu, Yaqi Hu, and Ruoxi Li (China)

R.68.1.26 **THE KEY CHALLENGE WATER OCCITANIE: SIX LIVING LABS NETWORK FOR THE ASSESSMENT OF THE RELEVANCE OF LOCAL WATER REUSE SOLUTIONS AND THEIR CONSEQUENCES** **612**
LE DÉFI MAJEUR CHEZ « WATER OCCITANIE »: UN RÉSEAU DE SIX LABORATOIRES VIVANTS POUR ÉVALUER LA PERTINENCE DES SOLUTIONS LOCALES DE RÉUTILISATION DE L'EAU ET LEURS CONSÉQUENCES
Justine Bassoul, Claire Albasi, Olivier Barreteau (France)

USE OF TREATED WASTEWATER FOR AGRICULTURE THROUGH MICRO IRRIGATION IN INDIA: A SUSTAINABLE SOLUTION

UTILISATION DES EAUX USÉES TRAITÉES POUR L'AGRICULTURE PAR MICRO-IRRIGATION EN INDE : UNE SOLUTION DURABLE

Somnath Jadhav[1]

ABSTRACT

India is an agrarian country. Even today more than 50 % of the population depends up on agriculture and allied fields. To feed its ever-increasing population, we need to produce more food. Agricultural productivity can be increased by adopting following ways:

1. **By introduction of high yielding hybrid varieties**: During the first green revolution, this alternative was tried and found that use of hybrid varieties even though high yielding, have limitations, since many times new hybrid varieties bring diseases along with them and they are more prone to diseases rather than the original indigenous varieties.
2. **By increasing the additional area under cropping:** This alternative also has limitations. In fact, because of growing urbanization, the area under cropping gets reduced unless we bring additional waste lands under cultivation.
3. **By increasing area under irrigation:** This is the most practical and technically feasible solution. By increasing area under irrigation we can definitely increase the productivity of crops without any limitations/side effects such as diseases etc. However there are exceptional cases where because of over irrigation the soils have become saline/alkaline. These types of problems can be taken care of by judicious use of available water resources by introducing modern irrigation systems such as drip and sprinkler irrigation.
4. On the water side, more than 75 % of the total water in the country is used for agricultural irrigation purposes. Water is a vital input for increasing crop productivity. India's per capita water resources are shrinking day by day. Apart from this there are issues related to droughts, water shortages, water pollution, excessive use of water through flood irrigation, these are the constraints in the food production system.
5. Since we are continuously facing increasing water scarcity problems, innovative approaches to water management are crucial. There are many innovative approaches to manage the available water resources in judicious manner. One such solution is the use of treated wastewater for agricultural purposes, particularly through micro-irrigation. This technique offers a sustainable and efficient way to conserve water resources while boosting agricultural productivity.

The need, advantages, key considerations and actionable points with respect to Indian context are discussed in this paper.

Keywords: Treated wastewater, Wastewater reuse, Agricultural water management, Micro-irrigation, Water scarcity, Water conservation, Sustainable irrigation.

1 Sr Vice President – Business Development, Jain Irrigation Systems Ltd, Jalgaon, (India) 425001, Mobile +9194222275076, Email: jadhav.somnath@jains.com, Web: www.jains.com

RÉSUMÉ

L'Inde est un pays agraire. Aujourd'hui encore, plus de 50 % de la population dépend de l'agriculture et des secteurs connexes. Pour nourrir une population en constante augmentation, il est nécessaire de produire davantage de denrées alimentaires. La productivité agricole peut être accrue en adoptant les mesures suivantes :

1. Par l'introduction de variétés hybrides à haut rendement : lors de la première révolution verte, cette alternative a été testée et il s'est avéré que l'utilisation de variétés hybrides, bien qu'à haut rendement, présente des limites, car souvent, les nouvelles variétés hybrides s'accompagnent de maladies et sont plus sensibles aux maladies que les variétés indigènes d'origine.
2. En augmentant la superficie cultivée : Cette solution présente également des limites. En effet, en raison de l'urbanisation croissante, la superficie cultivée diminue, à moins de mettre en culture des terres en friche supplémentaires.
3. En augmentant la superficie irriguée : Il s'agit de la solution la plus pratique et la plus viable sur le plan technique. En augmentant la superficie irriguée, nous pouvons sans aucun doute accroître la productivité des cultures sans aucune limitation ni effet secondaire, tels que les maladies, etc. Il existe toutefois des cas exceptionnels où, en raison d'une irrigation excessive, les sols sont devenus salins ou alcalins. Ce type de problème peut être résolu par une utilisation judicieuse des ressources en eau disponibles, grâce à la mise en place de systèmes d'irrigation modernes, tels que l'irrigation goutte à goutte et par aspersion.
4. En ce qui concerne l'eau, plus de 75 % de l'eau totale du pays est utilisée à des fins d'irrigation agricole. L'eau est un intrant essentiel pour accroître la productivité des cultures. Les ressources en eau par habitant de l'Inde diminuent de jour en jour. À cela s'ajoutent des problèmes liés aux sécheresses, aux pénuries d'eau, à la pollution de l'eau et à l'utilisation excessive de l'eau par l'irrigation par inondation. Telles sont les contraintes qui pèsent sur le système de production alimentaire.
5. Comme nous sommes confrontés à des problèmes croissants de pénurie d'eau, des approches innovantes en matière de gestion de l'eau sont cruciales. Il existe de nombreuses approches novatrices pour gérer les ressources en eau disponibles de manière judicieuse. L'une de ces solutions consiste à utiliser les eaux usées traitées à des fins agricoles, notamment à l'aide de la micro-irrigation. Cette technique offre un moyen durable et efficace de préserver les ressources en eau tout en stimulant la productivité agricole. La nécessité, les avantages, les considérations clés et les mesures concrètes à prendre dans le contexte indien sont abordés dans ce document.

Mots-clés : Eaux usées traitées; Réutilisation des eaux usées; Gestion de l'eau agricole; Micro-irrigation; Pénurie d'eau; Préservation de l'eau; Irrigation durable.

HYDROPONIC CROP PRODUCTION USING HOTEL GREYWATER: GROWTH AND SAFETY ASSESSMENT

PRODUCTION HYDROPONIQUE À PARTIR D'EAUX USÉES D'HÔTEL : ÉVALUATION DE LA CROISSANCE ET DE LA SÉCURITÉ

Josephine Vosse[1,2], Sofia Semitsoglou Tsiapou[1], Lúcia Helena Santos[3], Lucas Alonso[1], Esther Mendoza[1], Joaquim Comas[1,4], and Gianluigi Buttiglieri[1]

ABSTRACT

The reuse of greywater for hydroponic crop production may contribute to reducing freshwater demand in water-scarce regions while supporting local food production. This study assessed the suitability of source-separated light greywater from bathroom sinks and showers at Hotel Samba in Lloret de Mar, Spain, for growing lettuce (Lactuca sativa) and mint (Mentha sativa) in a hydroponic system. Two experimental cycles were conducted during high and low tourist seasons. Plants were grown for four weeks under controlled environmental conditions using three treatments: a conventional hydroponic nutrient solution prepared with deionized water, raw greywater, and greywater supplemented with the same hydroponic nutrients as the control.

Raw greywater supported plant survival and biomass increase without visible disease or acute phytotoxicity. However, compared with the control, lettuce and mint grown in unamended greywater showed reduced leaf area and dry mass, smaller and thicker leaves, and greater biomass allocation to roots, indicating nutrient limitation. In contrast, nutrient-amended greywater produced lettuce plants larger than the control and mint plants of comparable size, confirming that light hotel greywater can substitute freshwater in hydroponic nutrient solutions when nutrients are adequately supplied.

Although organic micropollutants were detected in greywater, transfer to edible tissues was limited, and the calculated dietary risk for detected compounds remained negligible under the assessed high-consumption scenario. Overall, the results indicate that light greywater is a promising alternative water source for hydroponic production of leafy vegetables and aromatic herbs, provided that nutrient management, disinfection, salt accumulation, and effluent treatment or recirculation are addressed.

Keywords: Greywater reuse; Hydroponics; Water scarcity; Source-separated greywater; Sustainable agriculture.

RÉSUMÉ

La réutilisation des eaux grises pour la culture hydroponique peut contribuer à réduire la demande en eau douce dans les régions souffrant de pénurie d'eau, tout en soutenant la production alimentaire locale. Cette étude a évalué l'aptitude des eaux grises légères, collectées à la source au niveau des lavabos et des douches de l'hôtel Samba à Lloret de Mar, en Espagne, à la culture de la laitue (Lactuca sativa) et de la menthe (Mentha sativa) dans un système hydroponique. Deux cycles expérimentaux ont été menés respectivement pendant la haute et la basse saison touristique. Les plantes ont été cultivées pendant quatre semaines

1 Catalan Institute for Water Research (ICRA-CERCA), 17003 Girona, Spain

2 University of Girona, Girona, Spain

3 Institute of Natural Resources and Agrobiology of Salamanca, Spanish National Research Council, C/ Cordel de Merinas 40-52, 37008 Salamanca, Spain

4 LEQUIA, Institute of the Environment, University of Girona, 17001 Girona, Spain

dans des conditions environnementales contrôlées selon trois traitements : une solution nutritive hydroponique conventionnelle préparée avec de l'eau désionisée, des eaux grises brutes, et des eaux grises enrichies des mêmes nutriments hydroponiques que le témoin. Les eaux grises brutes ont permis la survie des plantes et l'augmentation de leur biomasse sans aucune maladie visible ni phytotoxicité aiguë. Cependant, par rapport au témoin, la laitue et la menthe cultivées dans des eaux grises non enrichies présentaient une surface foliaire et une masse sèche réduites, des feuilles plus petites et plus épaisses, ainsi qu'une plus grande allocation de biomasse vers les racines, ce qui indique une limitation en nutriments. En revanche, les eaux grises enrichies en nutriments ont permis d'obtenir des plants de laitue plus grands que ceux du témoin et des plants de menthe de taille comparable, confirmant que les eaux grises légères issues d'hôtels peuvent se substituer à l'eau douce dans les solutions nutritives hydroponiques lorsque les nutriments sont fournis en quantité suffisante.

Bien que des micropolluants organiques aient été détectés dans les eaux grises, leur transfert vers les tissus comestibles était limité, et le risque alimentaire calculé pour les composés détectés restait négligeable dans le scénario de consommation élevée évalué. Dans l'ensemble, les résultats indiquent que les eaux grises légères constituent une source d'eau alternative prometteuse pour la production hydroponique de légumes-feuilles et d'herbes aromatiques, à condition que la gestion des nutriments, la désinfection, l'accumulation de sel et le traitement ou la recirculation des effluents soient pris en compte.

Mots-clés : Réutilisation des eaux grises; Hydroponie; Pénurie d'eau; Eaux grises collectées séparément; Agriculture durable.

ADAPTING IRRIGATED AGRICULTURE TO REDUCED WATER TRANSFERS: THE ROLE OF NON-CONVENTIONAL WATER RESOURCES IN SOUTHEASTERN SPAIN

ADAPTER L'AGRICULTURE IRRIGUÉE À LA DIMINUTION DES TRANSFERTS D'EAU : LE RÔLE DES RESSOURCES EN EAU NON CONVENTIONNELLES DANS LE SUD-EST DE L'ESPAGNE

C. Villacorta Ranera [1,2], I. Blanco Gutiérrez [1, 2], A. Escriva-Bou [3], and P. Esteve [1, 2]

ABSTRACT

Water scarcity is a growing challenge in Mediterranean regions, where climate change and increasing water demand are intensifying pressure on limited resources. In southeastern Spain, the Tagus–Segura Transfer (TST) has historically played a key role in supporting irrigated agriculture. However, environmental regulations and climate change are expected to reduce transfer volumes by approximately 40% by 2027, raising concerns about the future viability of agricultural production. In this context, non-conventional water resources (NCW), particularly desalinated and reclaimed water, are increasingly promoted as alternative supply sources.

This study evaluates the impacts of reduced TST allocations on irrigated agriculture and assesses the capacity of NCW to compensate for future water shortages in the Campo de Cartagena Irrigation Community (CRCC), one of the largest and most productive irrigation districts in Spain. To achieve this objective, an agro-economic Positive Mathematical Programming (PMP) model was developed and calibrated using data from the 2018–2020 period. Six scenarios were analysed, including transfer reductions, expansion of NCW supplies, groundwater and desalination constraints, subsidised desalinated water, and full cost recovery pricing.

The results show that a 40% reduction in TST supplies decreases total water use by 23%, reduces cultivated area by 27%, lowers farm profit by 14%, and causes a 22% decline in agricultural employment. Increased use of desalinated and reclaimed water can largely offset water shortages and maintain agricultural activity, although at higher production costs. Desalinated water emerges as the main alternative source, but its economic viability depends heavily on public subsidies. While subsidised desalinated water allows farm profits to approach baseline levels, each additional euro of farm profit generated requires approximately one euro of public expenditure.

The findings highlight that the long-term sustainability of irrigated agriculture in southeastern Spain will require a combination of expanded desalination capacity, renewable energy investments, integrated water resource management, and policies that balance economic, environmental, and social objectives.

Keywords: Mediterranean regions; water shortages; Public expenditure; renewable energy; water resources.

1 Universidad Politécnica de Madrid, Department of Agricultural Economics, Statistics and Business Management, ETSIAAB, Madrid, Spain
2 Centro de Estudios e Investigación para la Gestión de Riesgos Agrarios y Medioambientales (CEIGRAM), Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain
3 University of California, Davis, Department of Civil and Environmental Engineering, Davis, United States

RÉSUMÉ

La pénurie d'eau constitue un défi croissant dans les régions méditerranéennes, où le changement climatique et l'augmentation de la demande en eau accentuent la pression sur des ressources limitées. Dans le sud-est de l'Espagne, le transfert Tage-Segura (TST) a historiquement joué un rôle clé dans le soutien de l'agriculture irriguée. Cependant, la réglementation environnementale et le changement climatique devraient entraîner une réduction des volumes transférés d'environ 40 % d'ici 2027, ce qui soulève des inquiétudes quant à la viabilité future de la production agricole. Dans ce contexte, les ressources en eau non conventionnelles (NCW), en particulier l'eau dessalée et l'eau recyclée, sont de plus en plus mises en avant comme sources d'approvisionnement alternatives.

Cette étude évalue les impacts de la réduction des allocations du TST sur l'agriculture irriguée et examine la capacité des NCW à compenser les futures pénuries d'eau au sein de la Communauté d'irrigation du Campo de Cartagena (CRCC), l'un des districts d'irrigation les plus vastes et les plus productifs d'Espagne. Pour atteindre cet objectif, un modèle agroéconomique de programmation mathématique positive (PMP) a été développé et calibré à partir de données de la période 2018-2020. Six scénarios ont été analysés, portant notamment sur les réductions de transferts, l'augmentation de l'approvisionnement en NCW, les contraintes liées aux eaux souterraines et au dessalement, l'eau dessalée subventionnée et une tarification basée sur le recouvrement intégral des frais.

Les résultats montrent qu'une réduction de 40 % des apports du TST entraîne une baisse de 23 % de la consommation totale d'eau, une diminution de 27 % de la superficie cultivée, une baisse de 14 % des bénéfices agricoles et une baisse de 22 % de l'emploi agricole. Le recours accru à l'eau dessalée et à l'eau réutilisée peut largement compenser les pénuries d'eau et maintenir l'activité agricole, bien qu'à des coûts de production plus élevés. L'eau dessalée apparaît comme la principale source alternative, mais sa viabilité économique dépend fortement des subventions publiques. Si l'eau dessalée subventionnée permet aux bénéfices agricoles de se rapprocher des niveaux de référence, chaque euro supplémentaire de bénéfice agricole généré nécessite environ un euro de dépenses publiques.

Ces résultats soulignent que la pérennité à long terme de l'agriculture irriguée dans le sud-est de l'Espagne nécessitera une combinaison de plusieurs mesures : augmentation des capacités de dessalement, investissements dans les énergies renouvelables, gestion intégrée des ressources en eau et politiques conciliant les objectifs économiques, environnementaux et sociaux.

Mots-clés : Régions méditerranéennes; Pénurie d'eau; Dépenses publiques; Energies renouvelables, Ressources en eau.

DEVELOPMENT OF A NATURE-BASED SOLUTION TO ENABLE THE REUSE OF TREATED WASTEWATER IN AGRICULTURE

DÉVELOPPEMENT D'UNE SOLUTION FONDÉE SUR LA NATURE POUR PERMETTRE LA RÉUTILISATION DES EAUX USÉES TRAITÉES EN AGRICULTURE

Diana Le Berre[1], Rémi Lombard-Latune[1], and Jaime Nivala[1]*

ABSTRACT

This study evaluated an aerated horizontal flow treatment wetland (20 m²) treating primary treated domestic wastewater to assess its potential for safe agricultural reuse under French regulations. Over one year, the system performance was monitored for conventional pollutants, physicochemical parameters, and multiple microbial indicators, including *Escherichia coli*, total coliforms, anaerobic sulfite-reducing bacteria spores, helminths, and phages. The wetland achieved high removal of organic matter and nutrients (93% COD, 99% NH_4-N, 58% TN) and notable pathogen reduction, with geometric mean log reduction values of 3.2 for *E. coli*, 3.7 for crAssPhages, and 1.8 for anaerobic sulfite-reducing bacteria spores. Pathogen removal was heterogeneous along the flow path, suggesting differing removal mechanisms for bacteria, viruses and protozoan indicators. Overall, the effluent mostly met Class B reuse requirements, with 20% of samples downgraded to Class C due to residual *E. coli*, highlighting the need for expanded monitoring of additional pathogens and molecular indicators to better characterize treatment reliability.

Keywords: Reuse of treated water; System performance; Effluent; Pathogen removal; molecular indicators.

RÉSUMÉ

Cette étude a évalué une zone humide de traitement à écoulement horizontal aéré (20 m²) traitant les eaux usées domestiques traitées primaires afin d'évaluer son potentiel de réutilisation agricole sûre selon la réglementation française. Pendant un an, la performance du système a été surveillée pour détecter les polluants conventionnels, les paramètres physicochimiques et de multiples indicateurs microbiens, notamment Escherichia coli, coliformes totaux, spores bactériennes anaérobies réductrices de sulfites, helminthes et phages. La zone humide a permis une élimination élevée de la matière organique et des nutriments (93 % de DCO, 99 % de NH_4— N, 58 % de TN) ainsi qu'une réduction notable des agents pathogènes, avec des valeurs de réduction logarithmique moyenne géométrique de 3,2 pour E. coli, de 3,7 pour les crAssPhages et de 1,8 pour les spores de bactéries anaérobies sulfite réducteur. L'élimination des agents pathogènes s'est avérée hétérogène le long du parcours d'écoulement, ce qui suggère des mécanismes d'élimination différents pour les indicateurs bactériens, viraux et protozoaires. Dans l'ensemble, l'effluent répondait majoritairement aux exigences de réutilisation de classe B, 20 % des échantillons ayant été reclassés en classe C en raison de la présence résiduelle d'E. coli, ce qui souligne la nécessité d'étendre la surveillance à d'autres agents pathogènes et indicateurs moléculaires afin de mieux caractériser la fiabilité du traitement

Mots-clés : Réutilisation des eaux usées; Performance du système; Effluent; Elimination des agents pathogènes ; Indicateurs moléculaires.

1 INRAE — National Research Institute for Agriculture, Food, and the Environment, Research Unit REVERSAAL, 5 rue de la Doua, 69625 Villeurbanne, France, E-mail : diana.le-berre@inrae.fr

WOMEN PRESERVE "AGRICULTURAL" HERITAGE UNDER WATER REUSE IN TUNISIA

LES FEMMES PRÉSERVENT LE PATRIMOINE « AGRI-CULTUREL » GRÂCE À LA RÉUTILISATION DE L'EAU EN TUNISIE

O. Mahjoub[1], J. L. Ullman[2,3], and S. Harigua[4]

ABSTRACT

Reclaimed water (RW) has been adopted as an alternative water resource to help secure water and food for local communities in arid regions. In the Oued Souhil area, northeast Tunisia, the use of RW for irrigation rescued citrus-based agricultural systems suffering water shortage and preserved the orange blossom steam distillation sector; the latter is a longstanding seasonal tradition practiced by rural women. Despite the important role women play in water management, their actual contribution to the water reuse sector remains underexplored and their perspectives on global changes are rarely considered. For the first time, this study explores the combined perception of RW reuse and climate change by women practicing blossom flower distillation to comprehend their role in anchoring this cultural heritage under local circumstances. A survey of 30 close-ended and open-ended questions revealed that 90% of women were reusing RW since the 1980's. Overall, 90% accept RW because of its availability - regardless of its quality and because of groundwater degradation. However, only 30% are satisfied with RW use. Regarding climate change, women have observed reduced rainfall, higher temperatures, and prolonged summer seasons, which can accelerate flower blooming and disrupt the harvesting schedule, eventually impacting product quality and its marketability. For 93% of the participants, blossom steam distillation is a cultural heritage, passed down through family traditions and 100% indicate it provides a reliable source of income. More than 90% of interviewees emphasized the necessity of improving RW reliability and quality to maintain agricultural activity. Hence, preserving the cultural heritage of blossom steam distillation is closely linked to rural women empowerment and to the sustainability of RW reuse through improved practices and appropriate resilience measures to global changes; this calls for a transdisciplinary approach to inform policy decisions for both the agricultural and the industrial sectors.

Keywords: Reclaimed water; Arid regions; Climate change; Harvesting schedule; Source of income.

RÉSUMÉ

L'eau recyclée a été adoptée comme ressource alternative pour aider à garantir l'approvisionnement en eau et en denrées alimentaires des communautés locales dans les régions arides. Dans la région de l'Oued Souhil, au nord-est de la Tunisie, l'utilisation de l'eau recyclée pour l'irrigation a permis de sauver les systèmes agricoles basés sur les agrumes,

1 Laboratory of the Valorization of Non-Conventional Water Resources (LR16INRGREF02) National Research Institute for Rural Engineering, Water, and Forestry, Tunisia, Carthage University, Hedy Karrai St. P.O Box 10, 2080, Tunisia Email: olfa.mahjoub@ingref.ucar.tn

2 Department of Biological Systems Engineering, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE, USA Email: Jeffrey.Layton.Ullman@gmail.com

3 Laboratory of the Valorization of Non-Conventional Water Resources (LR16INRGREF02) National Research Institute for Rural Engineering, Water, and Forestry, Tunisia, Carthage University, Hedy Karrai St. P.O Box 10, 2080, Tunisia Email: olfa.mahjoub@ingref.ucar.tn

4 The Water Users' Association (GDA) Souhil, Nabeul, Tunisia. Email: sabrinegdasouhil@gmail.com

qui souffraient d'une pénurie d'eau, et de préserver le secteur de la distillation à la vapeur des fleurs d'oranger ; ce dernier est une tradition saisonnière de longue date pratiquée par les femmes rurales. Malgré le rôle important que jouent les femmes dans la gestion de l'eau, leur contribution réelle au secteur de la réutilisation de l'eau reste peu étudiée et leurs points de vue sur les changements mondiaux sont rarement pris en compte. Pour la première fois, cette étude explore la perception combinée de la réutilisation des eaux recyclées et du changement climatique chez les femmes pratiquant la distillation des fleurs d'oranger afin de comprendre leur rôle dans la préservation de ce patrimoine culturel dans le contexte local. Une enquête comportant 30 questions fermées et ouvertes a révélé que 90 % des femmes réutilisaient les eaux usées depuis les années 1980. Dans l'ensemble, 90 % d'entre elles acceptent ces eaux en raison de leur disponibilité – indépendamment de leur qualité – et de la dégradation des nappes phréatiques. Cependant, seules 30 % se déclarent satisfaites de leur utilisation. En ce qui concerne le changement climatique, les femmes ont constaté une baisse des précipitations, une hausse des températures et un allongement de la saison estivale, ce qui peut accélérer la floraison et perturber le calendrier de récolte, affectant à terme la qualité du produit et sa commercialisation. Pour 93 % des participantes, la distillation à la vapeur des fleurs constitue un patrimoine culturel transmis par les traditions familiales, et 100 % d'entre elles indiquent qu'elle constitue une source de revenus fiable. Plus de 90 % des personnes interrogées ont souligné la nécessité d'améliorer la fiabilité et la qualité des eaux usées rurales afin de maintenir l'activité agricole. Par conséquent, la préservation du patrimoine culturel que constitue la distillation à la vapeur des fleurs est étroitement liée à l'autonomisation des femmes rurales et à la durabilité de la réutilisation des eaux usées rurales grâce à des pratiques améliorées et à des mesures de résilience adaptées aux changements mondiaux. Cela appelle à une approche transdisciplinaire pour orienter les décisions politiques tant pour les secteurs agricoles qu'industriels.

Mots-clés : Eau recyclée; Régions arides; Changement climatique; Calendrier de récolte; Source de revenus.

A GROUNDED APPROACH TO THE REUSE OF TREATED WASTEWATER: ENVIRONMENT AND MODERNIZATION

UNE APPROCHE TERRE-A-TERRE DE LA REUTILISATION DES EAUX USEES TRAITEES: ENVIRONNEMENT ET MODERNISATION

Anne-Laure Collard[1]

ABSTRACT

Since April 2026, treated water from the River Tech (South of France), processed at the coastal town's (Argelès-sur-Mer) wastewater treatment plant, has been reused to irrigate 700 hectares of agricultural land. The aim of this communication is to examine the project's local anchoring in order to understand how it contributes to societal transformations in a territory of scarcity. The study demonstrates how the 'environmental' aspect of the "Reuse" is articulating to the modernization of irrigation and agriculture.

Keywords: Reuse of treated wastewater; Environment; Modernization; Coastal town; Societal transformations.

RÉSUMÉ

Depuis avril 2026, les eaux traitées provenant de la rivière Tech (sud de la France), traitées à la station d'épuration de la ville côtière d'Argelès-sur-Mer, sont réutilisées pour irriguer 700 hectares de terres agricoles. L'objectif de cette communication est d'examiner l'ancrage local du projet afin de comprendre comment il contribue aux transformations sociétales dans un territoire en situation de pénurie. L'étude montre comment la dimension « environnementale » de la « réutilisation » s'articule avec la modernisation de l'irrigation et de l'agriculture.

Mots-clés : Réutilisation des eaux usées traitées; Environnement; Modernisation; Ville côtière; Transformations sociétales.

1 G-EAU, Univ Montpellier, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France Email: anne- laure.collard@inrae.fr

A POLICY SUPPORT SYSTEM FOR ADVANCING SDG-6 ACHIEVEMENT IN TUNISIA

UN SYSTÈME D'ACCOMPAGNEMENT POLITIQUE POUR FAVORISER LA RÉALISATION DE L'ODD-6 EN TUNISIE

O. Mahjoub[1], A. Ouasli[2], A. Jridi[3], O. Sebai[4], N. Hamrouni[5], N. Ferjani[6], A. Arif[7], L. Guppy[8], M. Qadir[9], S. Jafarzadeh[9], E. H. Lee[10] , and C. K. Park[10]

ABSTRACT

Since 2016, countries committed to achieving 17 Sustainable Development Goals (SDGs) adopted by the United Nations. However, progress reports on SDG 6 indicate insufficient improvement caused by the lack of data to inform indicators. Developing and implementing tools to support developing countries facing data limitation is more than urgent to enhance their progress toward meeting their objectives. The paper aims to introduce the Support System for SDG 6 (SDG-PSS) developed to help government officials and stakeholders navigate limited data conditions and promote evidence-based policy, and to evaluate the enabling environment for achieving SDG 6. The tool is structured around 6 critical components applicable to SDG 6 targets and indicators: Capacity, Finance, Policy and Institutional, Gender, Disaster Risk Reduction (DRR)/Resilience, and Integrity. In Tunisia, a multidisciplinary and multi-sectorial expert working group was established, bringing together representatives from governmental institutions, academia, and civil society to contextualize and implement the tool.

The process involved the identification, validation, and analysis of data through collaborative efforts, fostering consensus-building and transparent reporting. Finance and capacity were among the most relevant components in the Tunisian context. Finance emerged among priority components due to the need for adequate and sustainable funding mechanisms to support water policies and implementation plans. Capacity challenges were underscored by shortage of qualified human resources and technical expertise, exacerbated by staff retirement and limited recruitment. Gender mainstreaming was deemed less relevant, though still important, with several frameworks and initiatives implemented at national, regional and local levels.

[1] Laboratory of the Valorization of Non-Conventional Water Resources (LR16INRGREF02) National Research Institute for Rural Engineering, Water, and Forestry, Tunisia, Carthage University, Hedy Karrai St. P.O Box 10, 2080, Tunisia, Email: olfa.mahjoub@ingref.ucar.tn

[2] Independent expert in Water Resources Management Email: ouasliab@gmail.com

[3] Department of Rural Engineering and Water Exploitation, Ministry of Agriculture, Water Resources and Fisheries, Alain Savary St., Tunisia Email: aida_tn@gmail.com

[4] National Agency for Environmental Protection (ANPE), Essalam city, 7051 St., Tunisia Email: sebai.olfa@gmail.com

[5] Bureau of Rural Women Outreach, Ministry of Agriculture, Water Resources and Fisheries, Alain Savary St., Tunisia Email: narjishamrouni@gmail.com

[6] National Observatory of Agriculture Institute, Ministry of Agriculture, Water Resources and Fisheries, Alain Savary St., Tunisia Email: noura.ferjani@iresa.agrinet.tn

[7] National Wastewater Utility (ONAS), Hedi Nouira St., Tunisia Email: div.planification@onas.nat.tn

[8] Department of Risk and Disaster Reduction, University College London, Gower St. London, United Kingdom. Email: lisa.guppy@ucl.ac.uk

[9] Institute for Water, Environment and Health (UNU-INWEH), United Nation University, East Beaver Creek Road, Ontario, Canada, Email: manzoor.qadir@unu.edu ; sogol.jafarzadeh@unu.edu

[10] United Nation Office for sustainable Development (UNOSD), Yonsei University International campus, Incheon, Republic of Korea Email: eunhee.lee@un.org ; chun.park@un.org

The SDG-PSS contributed to improving stakeholders' understanding of SDG 6 targets and indicators, strengthening inter-institutional cooperation, and raising awareness of the importance of cross-sectoral collaboration for sustainable water governance. To ensure the long-term sustainability and impact of the tool, high-level political endorsement and the establishment of a permanent national committee are recommended.

Keywords: Sustainable Development Goals; Support System; Qualified human resources; Frameworks and initiatives; Cross-sectoral collaboration.

RÉSUMÉ

Depuis 2016, les pays se sont engagés à atteindre les 17 Objectifs de développement durable (ODD) adoptés par les Nations unies. Cependant, les rapports d'avancement concernant l'ODD 6 indiquent des progrès insuffisants dus au manque de données permettant d'étayer les indicateurs. Il est plus qu'urgent de développer et de mettre en œuvre des outils destinés à aider les pays en développement confrontés à des contraintes en matière de données, afin de renforcer leurs progrès vers la réalisation de leurs objectifs. Cet article vise à présenter le Système de soutien pour l'ODD 6 (SDG-PSS), développé pour aider les responsables gouvernementaux et les parties prenantes à faire face à des conditions de données limitées et à promouvoir des politiques fondées sur des données probantes, ainsi qu'à évaluer l'environnement propice à la réalisation de l'ODD 6. Cet outil s'articule autour de six composantes essentielles applicables aux cibles et indicateurs de l'ODD 6 : capacités, financement, politiques et institutions, égalité des sexes, réduction des risques de catastrophe (RRC)/résilience, et intégrité. En Tunisie, un groupe de travail multidisciplinaire et multisectoriel d'experts a été mis en place, réunissant des représentants d'institutions gouvernementales, du monde universitaire et de la société civile afin d'adapter l'outil au contexte local et de le mettre en œuvre.

Ce processus a impliqué l'identification, la validation et l'analyse des données grâce à des efforts collaboratifs, favorisant ainsi la recherche d'un consensus et la transparence des rapports. Les composantes « Financement » et « Capacités » figuraient parmi les plus pertinentes dans le contexte tunisien. Le financement est apparu comme l'une des composantes prioritaires en raison de la nécessité de disposer de mécanismes de financement adéquats et durables pour soutenir les politiques de l'eau et les plans de mise en œuvre. Les défis en matière de capacités ont été mis en évidence par la pénurie de ressources humaines qualifiées et d'expertise technique, exacerbée par les départs à la retraite du personnel et un recrutement limité. L'intégration de la dimension de genre a été jugée moins pertinente, bien qu'elle reste importante, plusieurs cadres et initiatives ayant été mis en œuvre aux niveaux national, régional et local.

Le SDG-PSS a contribué à améliorer la compréhension des parties prenantes concernant les cibles et les indicateurs de l'ODD 6, à renforcer la coopération interinstitutionnelle et à sensibiliser à l'importance de la collaboration intersectorielle pour une gouvernance durable de l'eau. Afin de garantir la pérennité et l'impact à long terme de l'outil, un soutien politique de haut niveau et la mise en place d'un comité national permanent sont recommandés.

Mots-clés : Objectifs de développement durable; Système de soutien; Ressources humaines qualifiées; Cadres et initiatives; Collaboration intersectorielle.

FEASIBILITY ASSESSMENT OF INTEGRATED WATER SUPPLY FOR RURAL FARMS AND URBAN RESIDENTS: EVIDENCE FROM NEW ZEALAND

ÉVALUATION DE LA FAISABILITÉ D'UN SYSTÈME INTÉGRÉ D'APPROVISIONNEMENT EN EAU POUR LES EXPLOITATIONS AGRICOLES RURALES ET LES HABITANTS DES ZONES URBAINES : LE CAS DE LA NOUVELLE-ZÉLANDE

Birendra KC*[1], Arno Benadie[2], Raj Khadka[3], Bart Schultz[4] and Krishna Prasad[5]

ABSTRACT

The Tutaenui Reservoir, located north of Marton Township in the Rangitikei District Council (RDC), New Zealand, is the primary source of drinking water for the town. Its quality is strongly influenced by rainfall, runoff, and upstream land-use activities. Key water quality issues include higher nutrient concentrations (nitrogen and phosphorus), which affect the taste, colour, and odour and promote algal growth, necessitating comprehensive treatment.

The RDC operates a conventional multi-stage treatment process to produce high-quality drinking water. However, the treated water is also supplied to 35 farms located along the 5 km channel between the Water Treatment Plant (WTP) and the Pressure Reducing Valve (PRV) at 12 Tutaenui Road. This dual-use arrangement places additional pressure on the water supply system, which is already affected by increasing water demand due to population growth and network leakage.

This study aimed to (i) quantify the proportion of treated water used by the 35 farms, and (ii) evaluate system leakage along the water main between the WTP and PRV. Five-minute interval data from two water meters—one at the WTP and another at the PRV—were collected from November 2025 to February 2026.

For farm entry-point meters, readings were collected at the same time on two consecutive days each week over five weeks to estimate daily farm water use and to improve the reliability of the result. Leakage was assessed using the Minimum Night Flow (MNF) technique, based on flows recorded between 00:00AM and 04:00AM. Total daily farm water use was estimated by subtracting leakage losses from the total outflow measured at the WTP.

The results demonstrated a significant variation in farm water use, with a single farm accounting for around 20% of the total farm consumption. In contrast, thirty-one farms collectively represented about 40% of total consumption, while four farms together consumed nearly 60%. Leakage analysis revealed that between the WTP and PRV, leakage accounted for nearly 98% of MNF, with an Infrastructure Leakage Index (ILI) of 9.1, indicating "very poor" performance according to international benchmarks.These findings indicate that supplying treated water to both urban and rural users through a single integrated system is not efficient and sustainable, as a small number of farms consume disproportionately large volumes compared to per capita urban demand.

Keywords: Treated water, rural demand, urban supply, leakage, water management.

1 Engineering Advisor, RangitikEi District Council, Marton, New Zealand, birendra.kc@rangitikei.govt.nz
2 GM, Assets, Infrastructure & Projects, Rangitikei District Council, Marton, New Zealand, arno.benadie@rangitikei.govt.nz
3 Solid Waste Officer, Rangitikei District Council, Marton, New Zealand, raj.khadka@rangitikei.govt.nz
4 Prof. em. Land and Water Development IHE Delft, the Netherlands, schultz1@kpnmail.nl
5 Irrigation and Water Resources Management Consultant, Janakpur, Nepal, kcpsah@gmail.com

RÉSUMÉ

Le réservoir de Tutaenui, situé au nord de la commune de Marton dans le district de Rangitikei (RDC), en Nouvelle-Zélande, constitue la principale source d'eau potable de la ville. La qualité de cette eau est fortement influencée par les précipitations, le ruissellement et les activités d'occupation des sols en amont. Parmi les principaux problèmes liés à la qualité de l'eau figurent des concentrations élevées en nutriments (azote et phosphore), qui altèrent le goût, la couleur et l'odeur de l'eau et favorisent la prolifération d'algues, rendant ainsi nécessaire un traitement complet.

Le RDC exploite un procédé de traitement conventionnel en plusieurs étapes pour produire une eau potable de haute qualité. Cependant, l'eau traitée est également fournie à 35 exploitations agricoles situées le long du canal de 5 km reliant la station de traitement de l'eau (STE) au réducteur de pression (VRP) situé au 12, Tutaenui Road. Ce double usage exerce une pression supplémentaire sur le réseau d'adduction d'eau, déjà affecté par une demande croissante due à la croissance démographique et aux fuites du réseau.

Cette étude visait à (i) quantifier la proportion d'eau traitée utilisée par les 35 exploitations agricoles, et (ii) évaluer les fuites du réseau le long de la conduite principale entre la STE et le VRP. Des données relevées toutes les cinq minutes à partir de deux compteurs d'eau — l'un situé à la STE et l'autre au VRP — ont été collectées de novembre 2025 à février 2026. Pour les compteurs situés aux points d'entrée des exploitations agricoles, les relevés ont été effectués à la même heure pendant deux jours consécutifs chaque semaine, sur une période de cinq semaines, afin d'estimer la consommation quotidienne d'eau des exploitations et d'améliorer la fiabilité des résultats. Les fuites ont été évaluées à l'aide de la technique du débit nocturne minimal (DNM), sur la base des débits enregistrés entre 00h00 et 04h00. La consommation quotidienne totale d'eau des exploitations agricoles a été estimée en soustrayant les pertes par fuite du débit total mesuré à la station de traitement d'eau.

Les résultats ont mis en évidence une variation significative de la consommation d'eau des exploitations agricoles, une seule exploitation représentant environ 20 % de la consommation totale. En revanche, trente et une exploitations représentaient collectivement environ 40 % de la consommation totale, tandis que quatre exploitations consommaient à elles seules près de 60 %. L'analyse des fuites a révélé qu'entre la station de traitement et le régulateur de pression (VRP), les fuites représentaient près de 98 % du DNM, avec un indice de fuite des infrastructures (IFI) de 9,1, ce qui indique une performance « très médiocre » selon les références internationales.Ces résultats indiquent que l'approvisionnement en eau traitée des usagers urbains et ruraux par un système intégré unique n'est ni efficace ni durable, car un petit nombre d'exploitations agricoles consomment des volumes disproportionnés par rapport à la demande urbaine par habitant.

Mots-clés : Eau traitée; Demande rurale; Approvisionnement urbain; Fuites; Gestion de l'eau.

DISTILLERY EFFLUENT IRRIGATION, BIOCHAR, AND SOIL NUTRIENT BALANCE

IRRIGATION À BASE D'EFFLUENTS DE DISTILLERIE, BIOCHAR ET ÉQUILIBRE NUTRITIONNEL DU SOL

Yi-Tai Liao[1], Li-Chi Chiang[2], Ci-Jyun Liao[2], and Feng -Wen Chen[13]

ABSTRACT

Climate change has intensified hydrological variability and destabilized water supply and demand, increasing competition for freshwater among agricultural, domestic, and industrial sectors. Consequently, non-traditional water resources have become an important irrigation option. Reclaimed effluent has considerable reuse potential, but its high nutrient and sodium contents may also increase the risk of soil salinization.

This study was conducted in Kinmen County, a region with chronic water scarcity. Distillery effluent was mixed with Houlong Creek water at 0, 20, 40, 60, and 80% proportions to produce five irrigation treatments, each with and without biochar application (0.625 t/ha), resulting in ten sorghum field treatments. Water quality, sorghum uptake, soil properties, and nutrient accumulation were analyzed. A soil nutrient balance equation was established by integrating water quality, water losses, and crop uptake to estimate and validate soil nutrient contents.

Results showed that irrigation water pH, EC, and nutrient contents increased with effluent proportion. Soil pH and EC also increased after irrigation. Compared with non-biochar treatments, biochar further increased soil pH and mitigated EC increase. Nutrient balance analysis indicated that Na accumulated in nearly all treatments, whereas P and K decreased in most treatments. Only some treatments achieved mass balance closure, indicating that the equation still requires refinement. Overall, reclaimed effluent has potential as a non-traditional irrigation water source, but routine monitoring of EC, SAR, ESP, and major crop nutrients, together with leaching and drainage management, remains necessary to enhance irrigation resilience under water-supply uncertainty.

Keywords : Distillery Effluent Irrigation, Biochar, Soil salinization and Nutrient Balance.

RÉSUMÉ

Le changement climatique a accentué la variabilité hydrologique et déstabilisé l'offre et la demande en eau, ce qui a accru la concurrence pour l'eau douce entre les secteurs agricole, domestique et industriel. Par conséquent, les ressources en eau non traditionnelles sont devenues une option d'irrigation importante. Les effluents traités présentent un potentiel de réutilisation considérable, mais leur teneur élevée en nutriments et en sodium peut également accroître le risque de salinisation des sols.

Cette étude a été menée dans le comté de Kinmen, une région souffrant d'une pénurie chronique d'eau. Les effluents de distillerie ont été mélangés à l'eau du ruisseau Houlong dans des proportions de 0, 20, 40, 60 et 80 % afin de créer cinq traitements d'irrigation, chacun avec et sans application de biochar (0,625 t/ha), ce qui a donné lieu à dix traitements

1 Resource Division, Agricultural Engineering Research Center, 32061 Taoyuan City, Taiwan E-mail: jeremy881222@gmail.com
2 Department of Bioenvironmental Systems Engineering, National Taiwan University, Taipei 10617, Taiwan E-mail: lchiang@ntu.edu.tw
3 Department of Water Resources and Environmental Engineering, TamKang University, New Taipei City 251301, Taiwan E-mail: chenfw@aerc.org.tw

sur des champs de sorgho. La qualité de l'eau, l'absorption par le sorgho, les propriétés du sol et l'accumulation de nutriments ont été analysées. Une équation de bilan nutritif du sol a été établie en intégrant la qualité de l'eau, les pertes en eau et l'absorption par les cultures afin d'estimer et de valider les teneurs en nutriments du sol.

Les résultats ont montré que le pH, la conductivité électrique (CE) et les teneurs en nutriments de l'eau d'irrigation augmentaient avec la proportion d'effluents. Le pH et la CE du sol ont également augmenté après l'irrigation. Par rapport aux traitements sans biochar, le biochar a encore augmenté le pH du sol et atténué l'augmentation de la CE. L'analyse du bilan nutritif a indiqué que le Na s'est accumulé dans presque tous les traitements, tandis que le P et le K ont diminué dans la plupart d'entre eux. Seuls certains traitements ont permis d'atteindre l'équilibre massique, ce qui indique que l'équation doit encore être affinée. Dans l'ensemble, les effluents réutilisés ont un potentiel comme source d'eau d'irrigation non traditionnelle, mais le suivi régulier de la CE, de la SAR, de l'ESP et des principaux nutriments des cultures, ainsi que la lixiviation et la gestion du drainage, reste nécessaire pour renforcer la résilience à l'irrigation face à l'incertitude de l'approvisionnement en eau.

Mots-clés : Irrigation par effluents de distillerie; Biochar; Salinisation du sol et bilan nutritif.

DESIGNING A SERIOUS GAME FOR PARTICIPATORY REUSE PLANNING IN THE WEST BANK

CONCEPTION D'UN JEU CONSÉQUENT POUR LA PLANIFICATION PARTICIPATIVE DE LA RÉUTILISATION DES EAUX EN CISJORDANIE

B. Noury[1], M. Ramnuth[2], T. Cazalis[2], F. Abu Seif[3], I. Dababat[4], I. Atallah[5], and C. Papin[6].

ABSTRACT

Wastewater reuse (REUSE) for irrigation is increasingly considered a strategic adaptation option in Mediterranean and water-scarce regions facing climate change, growing population pressure and increasing pressure on conventional freshwater resources. However, beyond technical feasibility, the effective implementation of REUSE projects often remains constrained by fragmented governance arrangements, limited coordination between water, sanitation and agricultural stakeholders, insufficient planning capacities and persistent social and institutional barriers. These challenges are particularly visible in the West Bank, where water scarcity, territorial fragmentation and asymmetric access to water strongly constrain agricultural development and local water management.

This paper presents an ongoing project aimed at designing a serious game to support participatory planning of treated wastewater reuse for irrigation in two Palestinian territories: the Tayassir area in Tubas Governorate and the Kharas area in Hebron Governorate. The approach combines participatory modelling, territorial diagnosis and role-playing methodologies inspired by the Wat-A-Game and Companion Modelling frameworks. Rather than functioning as a simple awareness-raising tool, the game is conceived as an intermediary planning device intended to facilitate dialogue between stakeholders, explore management scenarios and support collective reflection on allocation rules, infrastructure constraints, agricultural practices, environmental risks and institutional responsibilities.

Particular attention is given to the operational scale represented in the game. Instead of adopting a conventional river basin approach, the project focuses on wastewater treatment plant effluents and associated irrigation perimeters. This intermediate scale allows stakeholders to directly engage with tangible interactions between sanitation performance, water availability, irrigation demand and collective management arrangements.

The paper analyses the conceptual framework guiding the project, the territorial and institutional context of wastewater reuse in the West Bank, and the methodological principles structuring the co-design process.

Keywords: Wastewater reuse; territorial fragmentation; water management; water availability; Irrigation demand; Methodological principles.

1 Independant consultant, 9B rue d'Hem, 59170 Croix, France Email: Bjm.noury@gmail.com
2 Experts Solidaires, Parc Scientifique Agropolis 2. Boulevard de la Lironde 34980 Montferrier-Sur-Lez, France, Email: contact@experts-solidaires.org & tcazalis@experts-solidaires.org
3 Al ARD, Sateh Marhaba street, Ramallah, Palestine Email: info@al-ard.org
4 Tubas Joint Water and Sanitation Services Council, Tubas, Palestine Email: Tubas.jwssc@gmail.com
5 Joint Service Council for Water and Wastewater in North Hebron, Palestine Email: issatalal36@yahoo.com
6 Eau, agriculture et territoires (EAT), 500 rue Jean-François Breton. 34093 Montpellier, France Email: Celine.papin@inrae.fr,

RÉSUMÉ

La réutilisation des eaux usées (REUSE) à des fins d'irrigation est de plus en plus considérée comme une option stratégique d'adaptation dans les régions méditerranéennes et celles souffrant de pénurie d'eau, confrontées au changement climatique, à une pression démographique croissante et à une pression accrue sur les ressources en eau douce conventionnelles. Cependant, au-delà de la faisabilité technique, la mise en œuvre efficace des projets REUSE reste souvent entravée par des dispositifs de gouvernance fragmentés, une coordination limitée entre les acteurs des secteurs de l'eau, de l'assainissement et de l'agriculture, des capacités de planification insuffisantes et des obstacles sociaux et institutionnels persistants. Ces défis sont particulièrement visibles en Cisjordanie, où la pénurie d'eau, la fragmentation territoriale et l'accès asymétrique à l'eau freinent fortement le développement agricole et la gestion locale de l'eau.

Cet article présente un projet en cours visant à concevoir un jeu conséquent destiné à soutenir la planification participative de la réutilisation des eaux usées traitées à des fins d'irrigation dans deux territoires palestiniens : la région de Tayassir dans le gouvernorat de Tubas et la région de Kharas dans le gouvernorat d'Hébron. L'approche combine la modélisation participative, le diagnostic territorial et des méthodologies de jeux de rôle inspirées des cadres « Wat-A-Game » et « Companion Modelling » (~ Compagnon de Modélisation). Plutôt que de fonctionner comme un simple outil de sensibilisation, le jeu est conçu comme un dispositif de planification intermédiaire destiné à faciliter le dialogue entre les parties prenantes, à explorer des scénarios de gestion et à soutenir la réflexion collective sur les règles d'allocation, les contraintes d'infrastructure, les pratiques agricoles, les risques environnementaux et les responsabilités institutionnelles.

Une attention particulière est accordée à l'échelle opérationnelle représentée dans le jeu. Au lieu d'adopter une approche conventionnelle par bassin hydrographique, le projet se concentre sur les effluents des stations d'épuration et les périmètres d'irrigation associés. Cette échelle intermédiaire permet aux parties prenantes de s'engager directement dans des interactions concrètes entre les performances en matière d'assainissement, la disponibilité en eau, la demande d'irrigation et les modalités de gestion collective.

Cet article analyse le cadre conceptuel qui guide le projet, le contexte territorial et institutionnel de la réutilisation des eaux usées en Cisjordanie, ainsi que les principes méthodologiques qui structurent le processus de co-conception.

Mots-clés : Réutilisation des eaux usées; Fragmentation territoriale; Gestion d'eau; Disponibilité en eau; Irrigation demande; Principes méthodologiques.

INTEGRATED EVALUATION OF SOIL PROPERTIES AND CROP RESPONSE TO TREATED DAIRY WASTEWATER IRRIGATION

ÉVALUATION INTÉGRÉE DES PROPRIÉTÉS DU SOL ET DE LA RÉACTION DES CULTURES À L'IRRIGATION AVEC DES EAUX USÉES LAITIÈRES TRAITÉES

Oulaya Zoui [1], Aziz Abouabdillah [2], Abdelkader Chehlaoui [3] and Mohamed Bourioug [4]

ABSTRACT

Morocco, like many Mediterranean countries, faces increasing water scarcity due to recurrent droughts, creating significant challenges for agricultural production and food security. In this context, the reuse of treated wastewater offers a sustainable alternative for irrigation. This study evaluated the short-term effects of treated dairy industry wastewater "whitewater" on soil chemical properties, crop performance, and ecophysiological responses of oat (Avena sativa L.) and triticale (× Triticosecale) under field conditions. A field experiment was conducted in November 2024 using a randomized complete block design with four replicates. Three irrigation treatments were applied: T_1 (100% treated whitewater), $T_{1/2}$ (50% treated whitewater + 50% conventional water), and T_0 (100% conventional water). Soil pH, electrical conductivity (EC), nitrogen content, plant growth, biomass yield, and physiological parameters were assessed. In both crops, whitewater irrigation significantly increased soil pH and EC compared with the control, reflecting the higher ionic content of the effluent. In oat, these changes did not affect plant growth, chlorophyll content, leaf water potential, or biomass yield, which remained comparable across treatments. Similarly, triticale showed no significant differences in morphological traits or biomass production. However, triticale exhibited higher sodium accumulation under T_1 and significant changes in chlorophyll content and stomatal conductance, indicating greater physiological sensitivity to the effluent's salinity. Despite these responses, treated whitewater did not reduce biomass productivity in either species during the experimental period, demonstrating its short-term agronomic potential. Nevertheless, the observed sodium accumulation and species-specific physiological responses highlight the need for long-term monitoring to prevent salinity buildup and ionic imbalance. Overall, the results support the reuse of treated dairy wastewater as a sustainable irrigation resource, contributing to water conservation, resource efficiency, and circular water management in drought-prone agricultural systems.

Keywords : Whitewater, Wastwater, Reuse, Avena sativa L., Triticosecale.

RÉSUMÉ

Le Maroc, à l'instar de nombreux pays méditerranéens, est confronté à une pénurie d'eau croissante due à des sécheresses récurrentes, ce qui pose des défis importants pour la production agricole et la sécurité alimentaire. Dans ce contexte, la réutilisation des eaux usées traitées offre une alternative durable pour l'irrigation. Cette étude a évalué les effets à court terme des eaux usées traitées issues de l'industrie laitière (« eaux blanches ») sur les propriétés chimiques du sol, le rendement des cultures et les réponses écophysiologiques de l'avoine (Avena sativa L.) et du triticale (× Triticosecale) en conditions de plein champ.

1 National School of Agriculture, Department of Agronomy, Km.10. Route Haj Kaddour, B.P.S/40, Meknes 50001, Morocco, Morocco Email: ozoui@enameknes.ac.ma
2 Email: aabouabdillah@enameknes.ac.ma
3 Faculty of sciences, Department of biology, Meknes 50001, Morocco Email: a_chahlaoui@yahoo.fr
4 Email: mbourioug@enameknes.ac.ma

Une expérience en plein champ a été menée en novembre 2024 selon un plan en blocs complets randomisés avec quatre répétitions. Trois traitements d'irrigation ont été appliqués : T1 (100 % d'eaux blanches traitées), T1/2 (50 % d'eaux blanches traitées + 50 % d'eau conventionnelle) et T0 (100 % d'eau conventionnelle).

Le pH du sol, la conductivité électrique (CE), la teneur en azote, la croissance des plantes, le rendement en biomasse et les paramètres physiologiques ont été évalués. Pour les deux cultures, l'irrigation à l'eau blanche a augmenté de manière significative le pH et la CE du sol par rapport au témoin, ce qui reflète la teneur ionique plus élevée de l'effluent. Pour l'avoine, ces modifications n'ont pas affecté la croissance des plantes, la teneur en chlorophylle, le potentiel hydrique foliaire, ni le rendement en biomasse, qui sont restés comparables entre les traitements. De même, le triticale n'a présenté aucune différence significative au niveau des caractères morphologiques ou de la production de biomasse. Cependant, le triticale a présenté une accumulation de sodium plus élevée sous le traitement T1 ainsi que des changements significatifs de la teneur en chlorophylle et de la conductance stomatique, indiquant une plus grande sensibilité physiologique à la salinité de l'effluent.

Malgré ces réponses, l'eau blanche traitée n'a pas réduit la productivité en biomasse chez l'une ou l'autre des espèces au cours de la période expérimentale, démontrant ainsi son potentiel agronomique à court terme. Néanmoins, l'accumulation de sodium observée et les réponses physiologiques spécifiques à chaque espèce soulignent la nécessité d'un suivi à long terme afin de prévenir l'accumulation de salinité et le déséquilibre ionique. Dans l'ensemble, les résultats plaident en faveur de la réutilisation des eaux usées laitières traitées comme ressource d'irrigation durable, contribuant ainsi à la conservation de l'eau, à l'efficacité des ressources et à la gestion circulaire de l'eau dans les systèmes agricoles sujets à la sécheresse.

Mots-clés. Eaux blanches, Eaux usées, Réutilisation, *Avena sativa L., Triticosecale*.

SUBSTITUTING CONVENTIONAL RAW WATER WITH REUSE WATER. LIMITATIONS AND CONSTRAINTS. ILLUSTRATION USING THE MONTPELLIER MÉDITERRANÉE MÉTROPOLE PROJECT

REMPLACEMENT DE L'EAU BRUTE CONVENTIONNELLE PAR DE L'EAU RÉUTILISÉE. LIMITES ET CONTRAINTES. ILLUSTRATION A PARTIR DU PROJET DE MONTPELLIER MEDITERRANEE METROPOLE

Burgaud, Laurence[1], and Montginoul Marielle[2]

ABSTRACT

Wastewater reuse from treatment plants has been put on the political agenda, perceived in France as a solution to current and future water shortages. It is particularly promoted in coastal areas, where treated wastewater is discharged into the sea. This is the case for MAERA, the main wastewater treatment plant in the Montpellier metropolitan area, which discharges 30 million m^3 of water into the sea each year. This plant has two advantages: a fresh water not contaminated by salt and the proximity of a conventional untreated water distribution network ('RHR', from the Rhône River) that could be used to distribute REUSE water. Replacing this conventional untreated water makes even more sense as it faces high demand and has other potential uses.

This article outlines the outcomes of investigations conducted by Régie des Eaux de Montpellier in collaboration with BRL Exploitation and DV2E. The project was conceived with a multi-purpose objective, enabling a network connected to the station to serve several types of usage (urban, agricultural, industrial). This analysis highlighted the numerous limitations and constraints of such a solution: water with limited potential; water less acceptable than conventional untreated water (as it is less universally usable and more constrained) and very expensive, with a complex financial structure; and, finally, water whose governance framework remains to be established. Given these difficulties, the necessary and sufficient conditions are not currently in place to enable its widespread development close to users at an affordable cost.

Keywords: Coastal REUSE; technical constraints; governance; cost-sharing; impact on untreated water users.

RÉSUMÉ

La réutilisation des eaux usées issues des stations d'épuration figure désormais à l'ordre du jour politique ; elle est perçue en France comme une solution aux pénuries d'eau actuelles et futures. Elle est particulièrement encouragée dans les zones côtières, où les eaux usées traitées sont rejetées en mer. C'est le cas de la MAERA, la principale station d'épuration de l'agglomération montpelliéraine, qui rejette chaque année 30 millions de m3 d'eau en mer. Cette station présente deux avantages : une eau douce non contaminée par le sel et la proximité d'un réseau de distribution d'eau non traitée conventionnelle (« RHR », provenant du Rhône) qui pourrait être utilisé pour distribuer l'eau de réutilisation. Le remplacement de cette eau non traitée conventionnelle est d'autant plus pertinent qu'elle fait l'objet d'une forte demande et qu'elle a d'autres utilisations potentielles. Cet article présente les résultats des études menées par la Régie des Eaux de Montpellier en collaboration avec BRL Exploitation

1 Montpellier Méditerranée Métropole (3M) Public Water Authority, France
2 UMR G-Eau, Montpellier University, INRAE, France Member of Management Board of 3M Public Water Authority

et DV2E. Le projet a été conçu avec un objectif polyvalent, permettant à un réseau raccordé à la station de répondre à plusieurs types d'utilisations (urbaines, agricoles, industrielles). Cette analyse a mis en évidence les nombreuses limites et contraintes d'une telle solution : une eau au potentiel limité ; une eau moins acceptable que l'eau non traitée conventionnelle (car moins polyvalente et soumise à davantage de contraintes) et très coûteuse, avec une structure financière complexe ; et, enfin, une eau dont le cadre de gouvernance reste à établir. Compte tenu de ces difficultés, les conditions nécessaires et suffisantes ne sont actuellement pas réunies pour permettre son développement à grande échelle à proximité des utilisateurs à un coût abordable.

Mots-clés : réutilisation côtière ; contraintes techniques ; gouvernance ; partage des coûts ; impact sur les utilisateurs d'eau non traitée.

A DISRUPTIVE APPROACH TO THE REUSE OF TREATED WASTEWATER IN SOUTHERN TUNISIA

UNE APPROCHE NOVATRICE DE LA RÉUTILISATION DES EAUX USÉES TRAITÉES DANS LE SUD DE LA TUNISIE

O. Stintzy[1], and Jean-Marc Philip[2]

ABSTRACT

This article presents the results of a feasibility study conducted by the Mediterranean Water Institute, with financial support from the Rhône Mediterranean Corsica Water Agency, across three governorates in Southern Tunisia (Sfax, Gabès and Médenine) during 2025–2026. Facing chronic water scarcity, with renewable water resources below 450 m³ per capita per year, Tunisia is accelerating the development of non-conventional water resources to secure agricultural, industrial and urban water supplies. The study proposes an innovative and integrated model based on a single operator covering the entire multi-use treated wastewater (TWW) reuse value chain, supported by a blended finance approach.

An original 35-year economic model demonstrates that the long-term economic viability of treated wastewater reuse depends on three key conditions: user diversification, sufficient geographical coverage to achieve economies of scale in infrastructure and operating costs, and long-term stakeholder commitment. High-value uses such as industry, tourism, and environmental and nature-based solutions emerge as essential complements to agricultural reuse, ensuring both operator financial viability and affordable irrigation tariffs. The findings support a paradigm shift from wastewater disposal toward a circular water economy in which treated wastewater becomes a strategic asset for water security, climate resilience and sustainable development in Southern Tunisia.

Keywords: Multi-use treated wastewater reuse; Economic model; Operating costs; Long-term stakeholder; Water economy.

RÉSUMÉ

Cet article présente les résultats d'une étude de faisabilité menée par l'Institut méditerranéen de l'eau, avec le soutien financier de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, dans trois gouvernorats du sud de la Tunisie (Sfax, Gabès et Médenine) entre 2025 et 2026. Confrontée à une pénurie chronique d'eau, avec des ressources en eau renouvelables inférieures à 450 m³ par habitant et par an, la Tunisie accélère le développement de ressources en eau non conventionnelles afin de garantir l'approvisionnement en eau des secteurs agricole, industriel et urbain. L'étude propose un modèle innovant et intégré reposant sur un opérateur unique couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur de la réutilisation polyvalente des eaux usées traitées (EUT), soutenu par une approche de financement mixte.

Un modèle économique original s'étalant sur 35 ans démontre que la viabilité économique à long terme de la réutilisation des eaux usées traitées dépend de trois conditions essentielles : la diversification des utilisateurs, une couverture géographique suffisante pour réaliser des économies d'échelle au niveau des infrastructures et des coûts d'exploitation, ainsi que

1 Sinople International, 30, Dernier Sol, 2543 Luxembourg, Grand-Duchy of Luxembourg, ols@sinople-international.com for Mediterranean Water Institute, Immeuble Le Schuman, 18/20 Avenue Robert Schuman, 13002 Marseille

2 Ecoviso, 30 allée du Printemps, 13012 Marseille, France, jean-marc.philip@ecoviso.fr, for Mediterranean Water Institute, Immeuble Le Schuman, 18/20 Avenue Robert Schuman, 13002 Marseille

l'engagement à long terme des parties prenantes. Les utilisations à forte valeur ajoutée, telles que l'industrie, le tourisme et les solutions environnementales et fondées sur la nature, apparaissent comme des compléments essentiels à la réutilisation agricole, garantissant à la fois la viabilité financière de l'opérateur et des tarifs d'irrigation abordables.

Ces résultats plaident en faveur d'un changement de paradigme, passant de l'évacuation des eaux usées à une économie circulaire de l'eau dans laquelle les eaux usées traitées deviennent un atout stratégique pour la sécurité hydrique, la résilience climatique et le développement durable dans le sud de la Tunisie.

Mots-clés : Réutilisation polyvalente des eaux usées traitées; Modèle économique; Coûts d'exploitation; Engagement à long terme des parties prenantes; Economie de l'eau.

ROAD RUNOFF WATER: INTEGRATED APPROACH TO OVERCOMING BARRIERS TO WATER REUSE

EAUX DE RUISSELLEMENT DES ROUTES: UNE APPROCHE INTÉGRÉE POUR SURMONTER LES OBSTACLES À LA RÉUTILISATION DE L'EAU

Juline Volpellière[1]

ABSTRACT

The reuse of non-conventional water resources represents a strategic lever for strengthening territorial resilience in response to increasing pressure on water resources. While the reuse of treated wastewater is now governed by a structured regulatory framework in France, Europe, and elsewhere, other potential resources remain largely underexploited, particularly road runoff water collected in stormwater management infrastructure. This road infrastructure network may also provide a complementary territorial framework to conventional urban water reuse systems, particularly in peri-urban, agricultural and wildfire-prone areas where decentralised water resources are increasingly needed.

This paper is based on a prospective study conducted for the Mediterranean Interdepartmental Road Authority (DIRMED) on the valorisation of runoff water collected along the national road no.106 between Nîmes and Alès (Gard, France). The study focuses more specifically on a recently rehabilitated multifunctional road basin, initially designed to treat chronic road-related pollution and contain accidental pollution events.

The originality of the project lies in its position at the interface between several fields that are generally addressed separately: road infrastructure, water policy, agricultural and non-agricultural uses, public health and civil protection. In the absence of a specific regulatory framework applicable to the reuse of road basin water, the study required an integrated approach based on the cross-analysis of existing regulations, consultation with State services and the evaluation of several use scenarios.

The methodology combines a quantitative analysis based on twenty years of climate data, a detailed qualitative characterisation of the water, an analysis of territorial needs (fire defence, urban uses and agricultural irrigation), as well as a techno-economic assessment of different development scenarios. A monitoring campaign initially planned over eight months was extended to a full twelve-month period in order to improve the seasonal representativeness of water quality dynamics. The results show that road runoff water can constitute, under certain technical and organisational conditions, a relevant complementary resource for non-food uses and potentially for agricultural uses. However, feasibility mainly depends on stakeholders' ability to reconcile regulatory requirements, infrastructure governance, territorial acceptability and health responsibilities. The study highlights the value of a territorial and interdisciplinary approach for exploring new water resources adapted to local challenges of water conservation, resilience and climate change adaptation.

Keywords: Non-conventional water resources; Road runoff water; Infrastructure governance; Water conservation; Water conservation.

RÉSUMÉ

La réutilisation des ressources en eau non conventionnelles constitue un levier stratégique pour renforcer la résilience territoriale face à la pression croissante exercée sur les ressources en eau. Alors que la réutilisation des eaux usées traitées est désormais régie par un cadre

1 BRL Ingénierie, Nîmes, France Email: juline.volpelliere@brl.fr

réglementaire structuré en France, en Europe et ailleurs, d'autres ressources potentielles restent largement sous-exploitées, notamment les eaux de ruissellement routier collectées dans les infrastructures de gestion des eaux pluviales. Ce réseau d'infrastructures routières peut également constituer un cadre territorial complémentaire aux systèmes conventionnels de réutilisation de l'eau en milieu urbain, notamment dans les zones périurbaines, agricoles et exposées aux feux de forêt, où le recours à des ressources en eau décentralisées est de plus en plus nécessaire.

Ce papier s'appuie sur une étude prospective menée pour la Direction interdépartementale des routes de la Méditerranée (DIRMED) sur la valorisation des eaux de ruissellement collectées le long de la route nationale n° 106 entre Nîmes et Alès (Gard, France). L'étude porte plus spécifiquement sur un bassin routier multifonctionnel récemment réhabilité, initialement conçu pour traiter la pollution routière chronique et contenir les incidents de pollution accidentels.

L'originalité du projet réside dans sa position à l'interface entre plusieurs domaines généralement traités séparément : les infrastructures routières, la politique de l'eau, les usages agricoles et non agricoles, la santé publique et la protection civile. En l'absence d'un cadre réglementaire spécifique applicable à la réutilisation des eaux des bassins routiers, l'étude a nécessité une approche intégrée reposant sur l'analyse croisée des réglementations existantes, la consultation des services de l'État et l'évaluation de plusieurs scénarios d'utilisation.

La méthodologie combine une analyse quantitative s'appuyant sur vingt ans de données climatiques, une caractérisation qualitative détaillée de l'eau, une analyse des besoins territoriaux (lutte contre les incendies, usages urbains et irrigation agricole), ainsi qu'une évaluation technico-économique de différents scénarios de développement. Une campagne de surveillance initialement prévue sur huit mois a été prolongée à une période complète de douze mois afin d'améliorer la représentativité saisonnière de la dynamique de la qualité de l'eau. Les résultats montrent que les eaux de ruissellement routier peuvent constituer, sous certaines conditions techniques et organisationnelles, une ressource complémentaire pertinente pour des usages non alimentaires et, potentiellement, pour des usages agricoles. Toutefois, la faisabilité dépend principalement de la capacité des parties prenantes à concilier les exigences réglementaires, la gouvernance des infrastructures, l'acceptabilité territoriale et les responsabilités en matière de santé. L'étude met en évidence l'intérêt d'une approche territoriale et interdisciplinaire pour explorer de nouvelles ressources en eau adaptées aux enjeux locaux de conservation de l'eau, de résilience et d'adaptation au changement climatique.

Mots-clés : Ressources en eau non conventionnelles; Eaux de ruissellement routier; Gouvernance des infrastructures; Conservation de l'eau; Adaptation au changement climatique.

AN INTEGRATED APPROACH FOR WEF NEXUS IMPLEMENTATION UNDER WATER REUSE IN TUNISIA

UNE APPROCHE INTÉGRÉE POUR LA MISE EN ŒUVRE DU NEXUS EAU-ÉNERGIE-ALIMENTATION-ENVIRONNEMENT DANS LE CADRE DE LA RÉUTILISATION DE L'EAU EN TUNISIE

A. Ben Slimane[1], O. Mahjoub[1], A. Zairi[1], H. Amami[1], R. Aouay[1] and M. Taghouti[2]

ABSTRACT

The WEFE Nexus is designed to enhance the security of water, energy and food without disrupting ecosystems services. Despite this concept has recently gained popularity in the international community, its practical implementation remains limited. The reuse of treated wastewater (TWW) is recognized as one of the possible solutions to address water resource pressures and specific territorial issues. Therefore, it is essential to simultaneously address the various challenges that arise from the optimization of TWW use in accordance with the various mutual dependencies between WEFE sectors. Thus, multidisciplinary approaches were applied in Ouardanine region (Tunisia) to jointly identify and resolve the encountered challenges related to the WEFE nexus. Following a first step of stakeholder analysis, the Participatory System Mapping approach resulted in the creation of Causals Loops Diagrams (allowing the identification of various issues, causes, and potential impacts) and the understanding of the WEFE framework in the perimeter. Three main problems were identified in relation to the TWW use, namely the limited availability of TWW, high energy cost, and energy accessibility issues. To address these problems, a combination of interventions promoting the WEFE Nexus was proposed and co-designed by stakeholders. The innovative solution, called "Smart Reuse", which optimizes TWW use in terms of quantity and quality by using IoT. The second intervention called "Solar Pumping" involves photovoltaic panels to mitigate energy constraints. Stakeholders discussed barriers and opportunities for implementing both interventions and then proposed potential alternatives to overcome obstacles as well as the key actors to support the technology adoption on the short, medium and long term and to promote their upscaling. The proposal of a multi-stage methodological framework based on a participatory and multidisciplinary approaches, is appropriate to analyze the complex intersectoral interactions within the WEFE Nexus process, and to facilitate intervention implementation and adoption.

Keywords: Ecosystems services; Smart Reuse; Solar Pumping ; Multidisciplinary approaches; Methodological framework.

RÉSUMÉ

Le « Nexus » eau-énergie-alimentation-environnement (EEAE) vise à renforcer la sécurité de l'eau, de l'énergie et de l'alimentation sans perturber les services écosystémiques. Bien que ce concept ait récemment gagné en popularité au sein de la communauté internationale, sa mise en œuvre concrète reste limitée. La réutilisation des eaux usées traitées (EUT) est reconnue comme l'une des solutions possibles pour faire face aux pressions sur les ressources en eau et aux enjeux territoriaux spécifiques. Il est donc essentiel de relever simultanément les différents défis découlant de l'optimisation de l'utilisation des EUT, en tenant compte des diverses interdépendances entre les secteurs de l'eau, de l'énergie et de

1 National Research Institute for Rural Engineering, Water and Forestry (INRGREF), University of Carthage, Tunisia. Email: abir.ben.slimane@gmail.com.
2 SmartLogger, Sousse, Tunisia.

l'alimentation. Ainsi, des approches multidisciplinaires ont été mises en œuvre dans la région d'Ouardanine (Tunisie) afin d'identifier et de résoudre conjointement les défis rencontrés liés au nexus EEAE. À l'issue d'une première étape d'analyse des parties prenantes, l'approche de cartographie participative des systèmes a permis de créer des diagrammes de boucles causales (permettant d'identifier divers enjeux, causes et impacts potentiels) et de comprendre le cadre EEAE au sein du périmètre. Trois problèmes principaux ont été identifiés en lien avec l'utilisation des EUT (eaux usées traitées), à savoir la disponibilité limitée des EUT, le coût énergétique élevé et les problèmes d'accessibilité à l'énergie. Pour remédier à ces problèmes, une combinaison d'interventions favorisant le nexus EEAE a été proposée et conçue en collaboration avec les parties prenantes. La solution innovante, baptisée « Smart Reuse » (réutilisation intelligente), optimise l'utilisation des eaux usées en termes de quantité et de qualité grâce à l'IoT. La deuxième intervention, appelée « Solar Pumping » (Pompage solaire), fait appel à des panneaux photovoltaïques pour atténuer les contraintes énergétiques. Les parties prenantes ont discuté des obstacles et des opportunités liés à la mise en œuvre de ces deux interventions, puis ont proposé des alternatives potentielles pour surmonter les obstacles, ainsi que les acteurs clés à mobiliser pour soutenir l'adoption de ces technologies à court, moyen et long terme et pour favoriser leur développement. La proposition d'un cadre méthodologique en plusieurs étapes, fondé sur des approches participatives et multidisciplinaires, est appropriée pour analyser les interactions intersectorielles complexes au sein du processus du Nexus EEAE, et pour faciliter la mise en œuvre et l'adoption des interventions.

Mots-clés : Services écosystémiques ; Réutilisation intelligente; Pompage solaire; Approches multidisciplinaires; Cadre méthodologique.

POLICY PRACTICES AND IMPLEMENTATION PATHWAYS OF UNCONVENTIONAL WATER SOURCE UTILIZATION IN CHINA —CONTRIBUTIONS TO SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOAL 6

PRATIQUES POLITIQUES ET VOIES DE MISE EN ŒUVRE DE L'UTILISATION DES RESSOURCES EN EAU NON CONVENTIONNELLES EN CHINE — CONTRIBUTIONS AU DÉVELOPPEMENT DURABLE OBJECTIF 6

Zheru Wu[1]

ABSTRACT

This paper systematically reviews China's policy practices and achievements in the utilization of unconventional water resources during the 14th Five-Year Plan period, analyzes the main existing challenges, and proposes future-oriented engineering pathways and policy recommendations, aiming to provide Chinese experience and reference for the achievement of United Nations Sustainable Development Goal 6 (SDG 6).

Keywords : Policy practices; Unconventional water resources; Sustainable development goal.

RÉSUMÉ

Cet article passe systématiquement en revue les pratiques politiques et les réalisations de la Chine en matière d'utilisation des ressources en eau non conventionnelles au cours de la période du 14e plan quinquennal, analyse les principaux défis actuels et propose des pistes d'ingénierie tournées vers l'avenir ainsi que des recommandations politiques, dans le but de partager l'expérience chinoise et de fournir des références pour la réalisation de l'Objectif de développement durable n° 6 (ODD 6) des Nations unies.

Mots-clés : Pratiques politiques; Ressources en eau non conventionnelles; Objectif de développement durable.

1 International Economic and Technical Cooperation and Exchange Center, Ministry of Water Resources N0.38, Yuyuantan South Street, Haidian District, Beijing, China Email :wuduizi@163.com

INTEGRATION OF TREATED WASTEWATER REUSE AND SOLAR-POWERED SPRINKLER IRRIGATION FOR CLIMATE-RESILIENT SMALLHOLDER

INTÉGRATION DE LA RÉUTILISATION DES EAUX USÉES TRAITÉES ET DE L'IRRIGATION PAR ASPERSION ALIMENTÉE À L'ÉNERGIE SOLAIRE POUR UNE AGRICULTURE DE PETITE EXPLOITATION RÉSILIENTE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Dr. Dilip Yewalekar[1] and Manisha Kinge[2]

ABSTRACT

Global agriculture consumes 70-80% of available water resources and drive high rural energy demands. However, depleting ground water, rising energy costs, climate variability, and untreated sewage disposal threaten agricultural sustainability, particularly for smallholders in developing countries. Utilizing Treated Wastewater (TWW) via solar-powered irrigation offers a viable solution to enhance water efficiency, curb pollution, and advance SDG 6.3.

This study designs, develops, and evaluates an integrated irrigation system that pairs TWW with a solar-powered, low-pressure Rainport Sprinkler Irrigation (RPSI) system. Tailored for small, fragmented landholdings, this configuration reduces reliance on freshwater and conventional energy. The engineering design integrates crop evapotranspiration (ET), solar radiation, soil water-holding capacity, sprinkler application rates, and distribution uniformity, targeting a Christiansen Coefficient of Uniformity (CDU) above 80%. Crucially, TWW quality—including BOD, COD, TSS, SAR, electrical conductivity, and fecal coliform—was benchmarked against irrigation standards to ensure safe application.

The system was implemented across 1,400 acres in Haryana, India, utilizing 8–13 MLD of effluent from a sewage treatment plant. Field evaluations demonstrated that combining solar micro-irrigation with TWW significantly slashed operational energy costs, enhanced water distribution uniformity, and boosted crop productivity. This translated into tangible economic gains, yielding a benefit-cost ratio of 1.63 for vegetable cultivation. Ultimately, integrating solar-powered micro-irrigation with TWW fosters circular water management, mitigates environmental pollution, and strengthens climate resilience in water-scarce zones. This scalable, adaptable model provides a sustainable blueprint for peri-urban, smallholder farming systems across arid and semi-arid regions in developing nations.

Keywords: Treated wastewater reuse; Solar-powered irrigation; Rainport sprinkler irrigation; Smallholder agriculture; Water-energy efficiency; Climate resilience.

RÉSUMÉ

L'agriculture mondiale consomme 70 à 80 % des ressources en eau disponibles et génère une forte demande énergétique en milieu rural. Cependant, l'épuisement des nappes phréatiques, la hausse des coûts énergétiques, la variabilité climatique et le rejet d'eaux usées non traitées menacent la durabilité de l'agriculture, en particulier pour les petits exploitants des pays en développement. L'utilisation des eaux usées traitées (EUT) via un système d'irrigation alimenté par l'énergie solaire offre une solution viable pour améliorer l'efficacité hydrique, réduire la pollution et contribuer à la réalisation de l'ODD 6.3.

1 Jain Irrigation Systems Ltd, PB # 72, National Highway # 6, Jalgaon 425001, India Email: Yewalekar.dilip@jains.com.

2 Jain Irrigation Systems Ltd, PB #72, National Highway # 6, Jalgaon 425001, India. Email: kinge.manisha@jains.com

Cette étude conçoit, développe et évalue un système d'irrigation intégré qui associe les eaux usées traitées à un système d'irrigation par aspersion Rainport (RPSI) à basse pression et alimenté par l'énergie solaire. Adaptée aux petites exploitations fragmentées, cette configuration réduit la dépendance à l'égard de l'eau douce et des énergies conventionnelles. La conception technique intègre l'évapotranspiration des cultures (ET), le rayonnement solaire, la capacité de rétention d'eau du sol, les débits d'application des arroseurs et l'uniformité de la distribution, en visant un coefficient d'uniformité de Christiansen (CDU) supérieur à 80 %. Il est essentiel de noter que la qualité des eaux usées traitées — notamment la DBO, la DCO, les TSS, le SAR, la conductivité électrique et les coliformes fécaux — a été comparée aux normes d'irrigation afin de garantir une utilisation sans risque.

Le système a été mis en œuvre sur 1 400 acres dans l'Haryana, en Inde, en utilisant 8 à 13 MLJ d'effluents provenant d'une station d'épuration. Les évaluations sur le terrain ont démontré que la combinaison de la micro-irrigation solaire et des eaux traitées réduisait considérablement les coûts énergétiques d'exploitation, améliorait l'uniformité de la distribution de l'eau et augmentait la productivité des cultures. Cela s'est traduit par des gains économiques tangibles, avec un rapport coûts-avantages de 1,63 pour la culture maraîchère.

En fin de compte, l'intégration de la micro-irrigation solaire à la réutilisation des eaux usées traitées favorise une gestion circulaire de l'eau, atténue la pollution environnementale et renforce la résilience climatique dans les zones souffrant de pénurie d'eau. Ce modèle évolutif et adaptable offre un schéma directeur durable pour les systèmes agricoles périurbains des petits exploitants dans les régions arides et semi-arides des pays en développement.

Mots-clés : Réutilisation des eaux usées traitées ; Irrigation solaire ; Irrigation par aspersion Rainport ; Agriculture paysanne ; Efficacité eau-énergie ; Résilience climatique.

COMPARATIVE REVIEW OF INTERNATIONAL WATER REUSE POLICIES FROM A RISK MANAGEMENT PERSPECRTIVE

ÉTUDE COMPARATIVE DES POLITIQUES INTERNATIONALES DE RÉUTILISATION DE L'EAU DU POINT DE VUE DE LA GESTION DES RISQUES

Ignacio Gómez-Lucena[1], Nassim Ait-Mouheb[2], Emilio Camacho[1] and Juan Antonio Rodríguez-Díaz[1]

ABSTRACT

Agricultural water reuse is increasingly promoted as a strategic response to water scarcity, population growth, and pressure on freshwater resources. Reclaimed wastewater for agricultural irrigation offers environmental, economic, and social benefits, including reduced abstraction from surface and groundwater bodies, improved drought resilience, and enhanced water security for agricultural production. However, agricultural water reuse also presents environmental and public health risks related to pathogen exposure, chemical contaminants, and long-term soil and ecosystem impacts. Managing these risks requires regulatory frameworks adapted to different socio-economic conditions in order to balance safety objectives with technical and economic feasibility.

As agricultural water reuse policies have expanded globally, regulatory approaches to risk management have evolved differently across countries. These differences reflect variations in water scarcity, institutional capacity, and economic development. Consequently, substantial diversity exists worldwide in treatment requirements, water quality standards, monitoring obligations, and restrictions on reuse practices. Understanding how underlying risk management paradigms shape regulatory design is therefore essential for evaluating the effectiveness and practicality of water reuse policies.

This review compares recent versions of nine internationally influential agricultural water reuse policies, including guidelines, standards, and regulations from organizations and jurisdictions such as the WHO, FAO, US EPA, ISO, the European Union, Jordan, Israel, and California. It examines how regulatory structures are shaped by hazard-based, risk-based, and hybrid approaches. Hazard-based frameworks rely on fixed treatment and quality thresholds, whereas risk-based approaches emphasize site-specific exposure assessment and multiple-barrier strategies. Hybrid frameworks combine baseline quality standards with flexible, risk-informed management measures.

The analysis shows that regulatory outcomes are shaped not only by scientific evidence, but also by prevailing risk management philosophies and socio-economic realities. Recent policies demonstrate a gradual convergence toward hybrid regulatory frameworks that seek to balance safety goals with practical implementation and local feasibility.

Keywords: Agricultural water reuse; Technical and economic feasibility; Water quality standards; Regulatory outcomes; Multiple-barrier strategies.

RÉSUMÉ

La réutilisation de l'eau agricole est de plus en plus encouragée comme réponse stratégique à la pénurie d'eau, à la croissance démographique et à la pression exercée sur les ressources

1 Department of Agronomy, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Spain Email: igomezlucena@uco.es

2 UMR G-EAU, INRAE, University of Montpellier, France Email: nassim.ait-mouheb@inrae.fr

en eau douce. L'utilisation d'eaux usées traitées pour l'irrigation agricole offre des avantages environnementaux, économiques et sociaux, notamment une réduction des prélèvements dans les eaux de surface et souterraines, une meilleure résilience face à la sécheresse et une sécurité hydrique renforcée pour la production agricole. Cependant, la réutilisation de l'eau agricole présente également des risques pour l'environnement et la santé publique liés à l'exposition aux agents pathogènes, aux contaminants chimiques et aux impacts à long terme sur les sols et les écosystèmes. La gestion de ces risques nécessite des cadres réglementaires adaptés aux différentes conditions socio-économiques afin de concilier les objectifs de sécurité avec la faisabilité technique et économique.

À mesure que les politiques de réutilisation de l'eau à des fins agricoles se sont développées à l'échelle mondiale, les approches réglementaires en matière de gestion des risques ont évolué différemment d'un pays à l'autre. Ces différences reflètent les variations en termes de pénurie d'eau, de capacités institutionnelles et de développement économique. Par conséquent, il existe une grande diversité à l'échelle mondiale en ce qui concerne les exigences de traitement, les normes de qualité de l'eau, les obligations de surveillance et les restrictions relatives aux pratiques de réutilisation. Il est donc essentiel de comprendre comment les paradigmes sous-jacents de gestion des risques façonnent la conception réglementaire pour évaluer l'efficacité et la faisabilité des politiques de réutilisation de l'eau.

Cette étude comparative examine les versions récentes de neuf politiques de réutilisation de l'eau à des fins agricoles ayant une influence internationale, notamment les lignes directrices, normes et réglementations émanant d'organisations et de juridictions telles que l'OMS, la FAO, l'EPA américaine, l'ISO, l'Union européenne, la Jordanie, Israël et la Californie. Elle examine comment les structures réglementaires sont façonnées par des approches fondées sur les dangers, sur les risques et hybrides. Les cadres fondés sur les aléas s'appuient sur des seuils fixes de traitement et de qualité, tandis que les approches fondées sur les risques mettent l'accent sur l'évaluation de l'exposition spécifique au site et sur des stratégies à barrières multiples. Les cadres hybrides combinent des normes de qualité de base avec des mesures de gestion flexibles et fondées sur les risques.

L'analyse montre que les résultats réglementaires sont façonnés non seulement par les preuves scientifiques, mais aussi par les philosophies dominantes en matière de gestion des risques et les réalités socio-économiques. Les politiques récentes témoignent d'une convergence progressive vers des cadres réglementaires hybrides qui cherchent à concilier les objectifs de sécurité avec la mise en œuvre pratique et la faisabilité locale.

Mots-clés : Réutilisation de l'eau agricole; Faisabilité technique et économique; Normes de qualité de l'eau; Résultats réglementaires; Stratégies à barrières multiples.

STORING TREATED WASTEWATER: (DE) LIMITING AND DEFINING POSSIBLE FUTURES FOR IRRIGATION IN AREAS WITH STRUCTURAL WATER SHORTAGES (SOUTH-WEST FRANCE)

STOCKAGE DES EAUX USEES TRAITEES : (DE) LIMITER ET DEFINIR LES AVENIRS POSSIBLES DE L'IRRIGATION DANS LES ZONES SOUFFRANT DE PENURIES HYDRIQUES STRUCTURELLES (SUD-OUEST DE LA FRANCE)

Romain Carrausse[1], and Selin Le Visage[2]

ABSTRACT

The construction of infrastructure to provide more water is ongoing, but this is becoming increasingly controversial. An increased supply can generate greater demand, thereby exacerbating the shortage, while new storage facilities can hinder the search for alternative solutions. Against this backdrop, the use of so-called unconventional water sources is increasing, particularly in regions experiencing chronic shortages linked to prevailing practices. In southwestern France (Mont-de-Marsan, Landes), a reuse project intends to irrigate 1,000 hectares with water from the Conte wastewater treatment plant. If the project goes ahead, five reservoirs will store the wastewater produced throughout the year, preventing its discharge into the river while ensuring a consistent water supply for those who withdraw water from the river for irrigation purposes. This article analyses the effects of defining water as "waste" or "resource" when negotiating and legitimising the project. The findings underscore a nuanced prioritisation of quantitative and qualitative concerns, despite their inherent interconnectedness. First, the debate surrounding authorised and withdrawn volumes for irrigation was feared, but anticipated and planned for. This illustrates how infrastructural imaginaries that aim to ensure a stable water supply influence the idea of water conservation or efficiency. Conversely, negotiating the local implementation of European and national regulations could raise issues of commensuration that are generally overlooked in France, particularly with regard to the quality of conventional irrigation water. Consequently, the visibility or invisibility of a potential public problem may become a source of tension within the irrigation sector with regard to these new infrastructures designed to secure agricultural production.

Keywords: Storing treated wastewater; Water supply; Wastewater treatment plant; Conventional irrigation water; Agricultural production.

RÉSUMÉ

La construction d'infrastructures visant à augmenter l'approvisionnement en eau se poursuit, mais elle fait l'objet de controverses croissantes. Une offre accrue peut générer une demande plus forte, aggravant ainsi la pénurie, tandis que de nouvelles installations de stockage peuvent entraver la recherche de solutions alternatives. Dans ce contexte, le recours à des sources d'eau dites « non conventionnelles » se développe, en particulier dans les régions confrontées à des pénuries chroniques liées aux pratiques en vigueur. Dans le sud-ouest de la France (Mont-de-Marsan, Landes), un projet de réutilisation vise à irriguer 1 000 hectares avec les eaux provenant de la station d'épuration de Conte. Si le projet voit le jour, cinq réservoirs stockeront les eaux usées produites tout au long de l'année, empêchant ainsi leur rejet dans la rivière tout en garantissant un approvisionnement en eau constant à ceux qui prélèvent

1 Researcher in geography, APESA, Research associate, UMR TREE, France: romain.carrausse@apesa.fr

2 Associate professor in geography, Université Paris 8, UMR LADYSS, France: selin.le- visage@univ-paris8.fr

l'eau de la rivière à des fins d'irrigation. Cet article analyse les effets de la définition de l'eau comme « déchet » ou « ressource » lors de la négociation et de la légitimation du projet. Les résultats mettent en évidence une hiérarchisation nuancée des préoccupations quantitatives et qualitatives, malgré leur interdépendance inhérente. D'une part, le débat autour des volumes autorisés et prélevés pour l'irrigation était redouté, mais anticipé et pris en compte. Cela illustre comment les imaginaires infrastructurels visant à garantir un approvisionnement stable en eau influencent la notion de conservation ou d'efficacité de l'eau. À l'inverse, la négociation de la mise en œuvre locale des réglementations européennes et nationales pourrait soulever des questions de proportionnalité qui sont généralement négligées en France, notamment en ce qui concerne la qualité de l'eau d'irrigation conventionnelle. Par conséquent, la visibilité ou l'invisibilité d'un problème public potentiel pourrait devenir une source de tension au sein du secteur de l'irrigation concernant ces nouvelles infrastructures destinées à garantir la production agricole.

Mots-clés : Stockage des eaux usées traitées; Approvisionnement en eau; Station d'épuration; Eau d'irrigation conventionnelle; production agricole.

AGRICULTURAL WATER REUSE IN CALIFORNIA: CLIMATE RESILIENCE LESSONS

LA RÉUTILISATION DE L'EAU DANS L'AGRICULTURE EN CALIFORNIE : LES ENSEIGNEMENTS EN MATIÈRE DE RÉSILIENCE CLIMATIQUE

Francisco Pedrero Salcedo[1], Michael Cahn[2], Belinda Platts[3] and Isaya Kisekka[4]

ABSTRACT

Agricultural water reuse is becoming an increasingly important strategy for improving water security in semi-arid regions facing recurrent droughts, groundwater depletion, seawater intrusion, and competition among users. California provides one of the most mature examples of agricultural recycled water implementation, with more than three decades of experience across coastal, inland valley, and desert farming systems. This paper synthesizes the evolution, agronomic relevance, economic constraints, and future direction of agricultural water reuse in California, with emphasis on practical lessons for climate-resilient irrigation management. The analysis is based on a comparative review of mature and emerging systems, including Monterey One Water, Pajaro Valley Water Management Agency, NapaSan, Del Puerto Water District, Eastern Municipal Water District, Coachella Valley Water District, Escondido MFRO/ AgX MFRO, and Harvest Water. Particular attention is given to the Monterey Wastewater Reclamation Study for Agriculture and the NapaSan vineyard studies, which provided long-term evidence on food-crop safety, salinity, ion toxicity, and grower confidence. The reviewed systems show that successful agricultural reuse depends not only on treatment capacity but also on basin-scale planning, conveyance infrastructure, cost-sharing, grower participation, water-quality monitoring, and agronomic management. Coastal systems demonstrate the role of reuse in reducing groundwater pumping and controlling seawater intrusion, whereas inland and desert systems highlight its value for supply reliability, groundwater protection, and nutrient management.

Emerging projects point toward crop-specific advanced treatment and reuse integrated with groundwater recharge and environmental co-benefits. California's experience demonstrates that agricultural reuse is no longer only a drought-response measure, but a structural component of diversified water portfolios. These lessons are relevant for Mediterranean and other semi-arid regions seeking to integrate recycled water, groundwater sustainability, advanced treatment, and resilient agricultural production under increasing climate uncertainty.

Keywords: Agricultural water reuse; groundwater protection; nutrient management; drought-response measure; climate uncertainty.

RÉSUMÉ

La réutilisation de l'eau agricole devient une stratégie de plus en plus importante pour améliorer la sécurité hydrique dans les régions semi-arides confrontées à des sécheresses récurrentes, à l'épuisement des nappes phréatiques, à l'intrusion d'eau de mer et à la concurrence entre les utilisateurs. La Californie offre l'un des exemples les plus aboutis de mise en œuvre de la réutilisation de l'eau agricole, avec plus de trois décennies d'expérience

1 Water and Plant Production Department, Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC), Murcia, Spain
2 University of California Cooperative Extension, Monterey County, California, USA
3 Agricultural Consultant, Central Coast, California, USA
4 Department of Land, Air and Water Resources and Department of Biological and Agricultural Engineering, University of California, Davis, California, USA

dans les systèmes agricoles côtiers, des vallées intérieures et des zones désertiques. Cet article synthétise l'évolution, la pertinence agronomique, les contraintes économiques et les perspectives de la réutilisation de l'eau agricole en Californie, en mettant l'accent sur les enseignements pratiques pour une gestion de l'irrigation résiliente au changement climatique. L'analyse repose sur une étude comparative de systèmes matures et émergents, notamment Monterey One Water, la Pajaro Valley Water Management Agency, NapaSan, le Del Puerto Water District, l'Eastern Municipal Water District, le Coachella Valley Water District, l'Escondido MFRO/AgX MFRO et Harvest Water.

Une attention particulière est accordée à l'étude de Monterey sur la récupération des eaux usées à des fins agricoles ainsi qu'aux études menées par NapaSan dans les vignobles, qui ont fourni des données à long terme sur la sécurité des cultures vivrières, la salinité, la toxicité ionique et la confiance des agriculteurs. Les systèmes examinés montrent que la réussite de la réutilisation agricole dépend non seulement de la capacité de traitement, mais aussi de la planification à l'échelle du bassin, des infrastructures de transport, du partage des coûts, de la participation des agriculteurs, de la surveillance de la qualité de l'eau et de la gestion agronomique. Les systèmes côtiers démontrent le rôle de la réutilisation dans la réduction du pompage des eaux souterraines et le contrôle de l'intrusion d'eau de mer, tandis que les systèmes de l'intérieur des terres et des zones désertiques soulignent son intérêt pour la fiabilité de l'approvisionnement, la protection des eaux souterraines et la gestion des nutriments.

Les projets émergents s'orientent vers des traitements avancés chaque culture et des solutions de réutilisation intégrée à la recharge des nappes phréatiques, avec des avantages collatéraux pour l'environnement. L'expérience californienne démontre que la réutilisation agricole n'est plus seulement une mesure de réponse à la sécheresse, mais une composante structurelle de portefeuilles hydriques diversifiés. Ces enseignements sont pertinents pour les régions méditerranéennes et autres régions semi-arides cherchant à intégrer l'eau recyclée, la durabilité des nappes phréatiques, les traitements avancés et une production agricole résiliente dans un contexte d'incertitude climatique croissante.

Mots-clés : Réutilisation de l'eau agricole; Protection des eaux souterraines; Gestion des nutriments; Mesure de réponse à la sécheresse; Incertitude climatique.

BEYOND TREATMENT: DESIGNING TREATED WASTEWATER REUSE AS AN INTEGRATED SYSTEM OF TERRITORIAL SERVICES

AU-DELÀ DU TRAITEMENT: CONCEVOIR LA RÉUTILISATION DES EAUX USÉES TRAITÉES COMME UN SYSTÈME INTÉGRÉ DE SERVICES TERRITORIAUX

M.T. Laaouimri[1], T. Ourbak[1], and H. Bilrha[2]

ABSTRACT

The reuse of treated wastewater is frequently presented as a technical upgrade of wastewater treatment plants. This interpretation overlooks what actually determines success at scale. In the Mediterranean basin and the Middle East, which are exposed to climate change, climate projections point to intensified water stress, and many countries are already below the scarcity threshold of 1,000 m³/capita/year (1). In these contexts, the reuse of treated wastewater must function as a public service: reliable, financed, regulated and operated on a daily basis.

Projects stagnate when stakeholders do not share the same definition of the service, when responsibilities remain unclear and when the cost structure ignores the last kilometer of transport and distribution to users. Under these conditions, social acceptability becomes a major constraint, not because of a communication deficit, but because the system fails to demonstrate its safety and reliability in a verifiable manner. Based on a comparative literature review of Mediterranean and arid contexts (2), the article identifies three minimum conditions for viable and replicable reuse of treated wastewater at large scale: (i) use-specific quality objectives translated into enforceable authorizations; (ii) a whole-chain economic model explicitly financing transport, distribution and long-term maintenance; and (iii) evidence-based acceptability mechanisms backed by transparent monitoring. These conditions are articulated through three service models: peri-urban non-food reuse, agricultural reuse and industrial reuse, forming a 3×3 decision matrix (Table 1).

Applied to Morocco (219 wastewater treatment plants, a treatment rate of 58%, and a reused volume increasing from 23.5 million cubic meters in 2019 to 52.6 million cubic meters in 2024), the framework reveals a country whose investment trajectory is strong but whose service architecture remains incomplete. Completing the regulatory framework, structuring agricultural financing, designating an institutional coordinator, and adapting service models to project sponsors' capacities are the four conditions still to be met before strategic objectives can be achieved.

Keywords: Reuse of treated wastewater; territorial services; institutional design; Morocco; Mediterranean.

RÉSUMÉ

La réutilisation des eaux usées traitées est souvent présentée comme une amélioration technique des stations d'épuration. Cette interprétation néglige ce qui détermine réellement la réussite à grande échelle. Dans le bassin méditerranéen et au Moyen-Orient, régions exposées au changement climatique, les projections climatiques laissent entrevoir une aggravation du stress hydrique, et de nombreux pays se situent déjà en dessous du seuil de pénurie de 1 000 m³ par habitant et par an. Dans ces contextes, la réutilisation des eaux

1 Agence Française de Développement (AFD), Rabat, Morocco
2 Ministry of Equipment and Water, Rabat, Morocco Corresponding author: laaouimrit@afd.fr

usées traitées doit fonctionner comme un service public : fiable, financé, réglementé et géré au quotidien.

Les projets stagnent lorsque les parties prenantes ne partagent pas la même définition du service, lorsque les responsabilités restent floues et lorsque la structure des coûts ne tient pas compte du « dernier kilomètre » de transport et de distribution vers les usagers. Dans ces conditions, l'acceptabilité sociale devient une contrainte majeure, non pas en raison d'un déficit de communication, mais parce que le système ne parvient pas à démontrer sa sécurité et sa fiabilité de manière vérifiable.

Sur la base d'une revue comparative de la littérature portant sur les contextes méditerranéens et arides (2), cet article identifie trois conditions minimales pour une réutilisation viable et reproductible des eaux usées traitées à grande échelle : (i) des objectifs de qualité spécifiques à chaque usage, traduits en autorisations exécutoires ; (ii) un modèle économique couvrant l'ensemble de la chaîne, finançant explicitement le transport, la distribution et l'entretien à long terme ; et (iii) des mécanismes d'acceptabilité fondés sur des données probantes et étayés par un suivi transparent. Ces conditions s'articulent autour de trois modèles de services : la réutilisation périurbaine à des fins non alimentaires, la réutilisation agricole et la réutilisation industrielle, formant une matrice de décision 3×3 (Tableau 1).

Appliqué au Maroc (219 stations d'épuration, un taux de traitement de 58 % et un volume réutilisé passant de 23,5 millions de mètres cubes en 2019 à 52,6 millions de mètres cubes en 2024), ce cadre met en évidence un pays dont la trajectoire d'investissement est solide, mais dont l'architecture des services reste incomplète. Parachever le cadre réglementaire, structurer le financement agricole, désigner un coordinateur institutionnel et adapter les modèles de services aux capacités des porteurs de projets sont les quatre conditions qui restent à remplir avant que les objectifs stratégiques puissent être atteints.

Mots-clés : Réutilisation des eaux usées traitées; Services territoriaux; Conception institutionnelle; Maroc ; Méditerranée.

AN INTEGRATED PLANNING AND RISK MANAGEMENT FRAMEWORK FOR SCALING UP AGRICULTURAL WATER REUSE IN LARGE-SCALE IRRIGATION DISTRICTS UNDER REGULATION (EU) 2020/741

UN CADRE INTÉGRÉ DE PLANIFICATION ET DE GESTION DES RISQUES POUR LA CROISSANCE DE LA RÉUTILISATION DE L'EAU AGRICOLE DANS LES DISTRICTS D'IRRIGATION À GRANDE ÉCHELLE AU TITRE DU RÈGLEMENT (UE) 2020/741

Pietro Drei[1*], Giuseppe Maistrello[1], Stevo Lavrnić[1], Giuseppe Mancuso[1], Francesca Valenti[1], and Attilio Toscano[1]

ABSTRACT

In Mediterranean regions, irrigation demand is increasing while conventional water resources are becoming less reliable due to recurrent droughts, competing uses, and environmental constraints. Treated urban wastewater (TWW) is increasingly recognised as a non-conventional resource that can supplement irrigation water and support climate-change adaptation. Scaling up from isolated pilots to large irrigation basins is complex, as reuse must be integrated into spatially distributed systems serving many fields with heterogeneous crops, irrigation methods, and multiple geographically dispersed wastewater treatment plants (WWTPs) of varying quality. Under Regulation (EU) 2020/741, the key challenge is to integrate TWW alongside conventional irrigation sources within a single allocation and operations framework. This paper presents an EU-aligned methodological package that operationalises the Regulation through three coordinated tools: (i) a basin-scale planning methodology that quantifies and prioritises reuse opportunities across multiple irrigation districts; (ii) Risk Management Plan (RMP) methodology that extends risk assessment beyond the WWTP outlet to the distribution network of a reuse-system; and (iii) a multi-barrier operational methodology that translates crop–irrigation heterogeneity and reclaimed-water quality classes into auditable compliance prescriptions. The package was applied in Northern Italy within the Consorzio della Bonifica Renana (CBR) multi-district irrigation system, in collaboration with the local water utility HERA. The plain basin covers approximately 140,222 ha and is served by approximately 1,572 km of open channels and 307 km of pressurised pipelines. Twenty-five WWTPs were screened for their potential contribution to irrigation supply. Basin-scale prioritisation identified the water reuse system U3 as the highest-priority site; a site-specific RMP was then developed for this system, and a multi-barrier irrigability analysis demonstrated that a treatment upgrade to class C provides the most cost-effective pathway to compliance, rendering virtually all non-root-crop plots irrigable. The application of the package to a real case study demonstrates an operational pathway to enable safe, EU-compliant reuse where hydraulic feasibility, storage, governance capacity, and risk-management measures must be aligned.

Keywords: Water reuse; Regulation (EU) 2020/741; risk management plan; multi-barrier approach; irrigation district; treated wastewater.

RÉSUMÉ

Dans les régions méditerranéennes, la demande en eau d'irrigation augmente, tandis que les ressources en eau conventionnelles deviennent de moins en moins fiables en raison de sécheresses récurrentes, d'utilisations concurrentes et de contraintes environnementales. Les eaux usées urbaines traitées (EUT) sont de plus en plus reconnues comme une ressource

1 Alma Mater Studiorum - University of Bologna, Department of Agricultural and Food Sciences, viale Giuseppe Fanin 50, Bologna, 40127, Italy *Corresponding author: pietro.drei2@unibo.it

non conventionnelle capable de compléter l'eau d'irrigation et de favoriser l'adaptation au changement climatique. Le passage de projets pilotes isolés à de grands bassins d'irrigation est complexe, car la réutilisation doit être intégrée dans des systèmes répartis dans l'espace desservant de nombreux champs présentant des cultures hétérogènes, des méthodes d'irrigation variées et de multiples stations d'épuration (STEP) géographiquement dispersées et de qualité variable. En vertu du règlement (UE) 2020/741, le principal défi consiste à intégrer les EUT aux sources d'irrigation conventionnelles au sein d'un cadre unique d'allocation et d'exploitation. Cet article présente un ensemble méthodologique conforme aux normes de l'UE qui met en œuvre le règlement grâce à trois outils coordonnés : (i) une méthodologie de planification à l'échelle du bassin qui quantifie et hiérarchise les possibilités de réutilisation dans plusieurs districts d'irrigation ; (ii) une méthodologie de plan de gestion des risques (PGR) qui étend l'évaluation des risques au-delà de la sortie de la STEP jusqu'au réseau de distribution d'un système de réutilisation ; et (iii) une méthodologie opérationnelle à barrières multiples qui traduit l'hétérogénéité des cultures et des modes d'irrigation ainsi que les classes de qualité des eaux réutilisées en directives de conformité vérifiables. Cet ensemble a été appliqué dans le nord de l'Italie au sein du système d'irrigation multi-districts du Consorzio della Bonifica Renana (CBR), en collaboration avec le service public local de l'eau HERA. Le bassin de plaine couvre environ 140 222 ha et est desservi par environ 1 572 km de canaux à ciel ouvert et 307 km de canalisations sous pression. Vingt-cinq stations d'épuration ont été évaluées quant à leur contribution potentielle à l'approvisionnement en eau d'irrigation. Une hiérarchisation à l'échelle du bassin a identifié le système de réutilisation de l'eau U3 comme le site le plus prioritaire ; un plan de gestion de la réutilisation (RMP) spécifique à ce site a ensuite été élaboré, et une analyse de la capacité d'irrigation à barrières multiples a démontré qu'une mise à niveau du traitement vers la classe C constituait la voie la plus rentable vers la conformité, rendant pratiquement toutes les parcelles non destinées aux cultures à racines irrigables. L'application de cet ensemble de mesures à une étude de cas réelle montre une voie opérationnelle permettant une réutilisation sûre et conforme à la réglementation de l'UE, dans laquelle la faisabilité hydraulique, le stockage, la capacité de gouvernance et les mesures de gestion des risques doivent être harmonisés.

Mots-clés : Réutilisation de l'eau ; Règlement (UE) 2020/741; Plan de gestion des risques; Approche à barrières multiples; District d'irrigation; Eaux usées traitées.

PARADOXES OF WATER REUSE: WHEN CIRCULARITY CONFLICTS WITH ENVIRONMENTAL AND GOVERNANCE PRINCIPLES

LES PARADOXES DE LA RÉUTILISATION DE L'EAU : QUAND LA CIRCULARITÉ ENTRE EN CONFLIT AVEC LES PRINCIPES ENVIRONNEMENTAUX ET DE GOUVERNANCE

Thomas Harmand[1], Vincent Kulesza[1], Barbara Howes[1], Frédéric Bouin[2], and Nicolas Roche[3]

ABSTRACT

Water reuse is increasingly promoted as a key instrument of circular water management, especially in response to climate change, drought, water scarcity, and growing pressure on freshwater resources (VOULVOULIS, 2018). By transforming treated wastewater into an alternative resource, reuse is commonly presented as an inherently sustainable practice capable of reducing freshwater withdrawals, limiting discharges, and improving territorial resilience. However, this paper argues that water reuse also embeds structural paradoxes that challenge a simplified understanding of circularity.

The first paradox concerns the relationship between reuse and wastewater discharges. While reducing treated effluent discharges may appear environmentally beneficial at the local scale, it can have unintended consequences at the river basin scale. In highly anthropised systems, treated wastewater often contributes to low flows, dilution capacity, hydrological continuity, and downstream ecological conditions. Maximising reuse may therefore weaken certain hydrological balances, particularly during low-flow periods.

The second paradox is regulatory. Direct reuse of treated wastewater is often subject to strict quality standards, monitoring obligations, risk management requirements, and authorisation procedures. By contrast, indirect reuse through discharge into the environment and subsequent downstream abstraction may be legally simpler, even though it can be functionally similar from a hydrological perspective. This asymmetry may create incentives to preserve linear discharge-and-abstraction pathways rather than formally organise circular water reuse.

The paper argues that these paradoxes reflect deeper governance issues. Water reuse is frequently promoted through sectoral objectives such as agricultural supply, urban resilience, industrial efficiency, etc. without sufficient integration into basin-scale water planning. A genuinely circular approach should therefore assess reuse not only by the volume of water reused, but also by its effects on downstream flows, ecological needs, allocation conflicts, and regulatory coherence. The paper concludes by calling for a systemic reuse strategy that aligns direct and indirect reuse regimes, integrates downstream impacts, and embeds reuse policies within river basin management planning.

Keywords: Water reuse; Structural paradoxes; Wastewater discharges; Downstream impacts; River basin management.

1 Société du Canal de Provence et d'Aménagement de la Région Provençale (SCP) - SCP CANAL DE PROVENCE - Le Tholonet - CS 70064 13182 Aix-en-Provence Cedex 05, France

2 Université de Perpignan Via Domitia (UPVD), Université de Perpignan Via Domitia, Université de Perpignan Via Domitia - 52 avenue Paul Alduy - 66860 Perpignan Cedex 9, France

3 Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement (CEREGE) - Institut de Recherche pour le Développement, Aix Marseille Université, Collège de France, Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement - Europôle Méditerranéen de l'Arbois - Avenue Louis Philibert - BP 80 - 13545 Aix-en-Provence cedex 4, France

RÉSUMÉ

La réutilisation de l'eau est de plus en plus encouragée comme un outil clé de la gestion circulaire de l'eau, notamment pour faire face au changement climatique, à la sécheresse, à la pénurie d'eau et à la pression croissante sur les ressources en eau douce (VOULVOULIS, 2018). En transformant les eaux usées traitées en une ressource alternative, la réutilisation est généralement présentée comme une pratique intrinsèquement durable, capable de réduire les prélèvements d'eau douce, de limiter les rejets et d'améliorer la résilience territoriale. Cependant, ce papier soutient que la réutilisation de l'eau comporte également des paradoxes structurels qui remettent en cause une conception simplifiée de la circularité.

Le premier paradoxe concerne la relation entre la réutilisation et les rejets d'eaux usées. Si la réduction des rejets d'effluents traités peut sembler bénéfique pour l'environnement à l'échelle locale, elle peut avoir des conséquences imprévues à l'échelle du bassin fluvial. Dans les systèmes fortement anthropisés, les eaux usées traitées contribuent souvent aux débits d'étiage, à la capacité de dilution, à la continuité hydrologique et aux conditions écologiques en aval. Maximiser la réutilisation peut donc affaiblir certains équilibres hydrologiques, en particulier pendant les périodes de faible débit.

Le deuxième paradoxe est d'ordre réglementaire. La réutilisation directe des eaux usées traitées est souvent soumise à des normes de qualité strictes, à des obligations de surveillance, à des exigences en matière de gestion des risques et à des procédures d'autorisation. En revanche, la réutilisation indirecte au moyen d'un rejet dans l'environnement suivi d'un prélèvement en aval peut s'avérer juridiquement plus simple, même si elle peut être fonctionnellement similaire d'un point de vue hydrologique. Cette asymétrie peut inciter à préserver les filières linéaires de rejet et de prélèvement plutôt qu'à organiser formellement une réutilisation circulaire de l'eau.

Le papier soutient que ces paradoxes reflètent des enjeux de gouvernance plus profonds. La réutilisation de l'eau est fréquemment encouragée par l'intermédiaire d'objectifs sectoriels, tels que l'approvisionnement agricole, la résilience urbaine, l'efficacité industrielle, etc., sans intégration suffisante dans la planification de l'eau à l'échelle du bassin. Une approche véritablement circulaire devrait donc évaluer la réutilisation non seulement en fonction du volume d'eau réutilisé, mais aussi en fonction de ses effets sur les débits en aval, les besoins écologiques, les conflits d'allocation et la cohérence réglementaire. Le papier conclut en appelant à une stratégie systémique de réutilisation qui harmonise les régimes de réutilisation directe et indirecte, intègre les impacts en aval et intégrer les politiques de réutilisation dans la planification de la gestion des bassins fluviaux.

Mots-clés : Réutilisation de l'eau; Paradoxes structurels; Rejets d'eaux usées; Impacts en aval; Gestion des bassins fluviaux.

SCALING UP WASTEWATER REUSE: LESSONS FROM REUT'O'SUD LIVING-LABS

ACCROÎTRE LA RÉUTILISATION DES EAUX USÉES : LES ENSEIGNEMENTS TIRÉS DES LIVING-LABS DE REUT'O'SUD

P. Lombard--Creisson[1] , N. Roche[2] , B. Howes[3] , P. Dewaele[4]
J. Cherel[5] , and A. Rotereau[6]

ABSTRACT

Water scarcity is a growing challenge in Mediterranean regions, driven by climate change, increasing drought frequency, population growth, and urbanisation. In the SUD–Provence–Alpes–Côte d'Azur region, these pressures are intensifying competition among domestic, agricultural, industrial, and environmental water uses, raising major concerns for sustainable water management. In this context, treated wastewater (TWW) reuse has emerged as a promising solution to diversify water resources, secure non-potable uses, and enhance territorial resilience (IPCC, 2023; UNESCO, 2024).

Despite its recognised potential and the support of public policies such as the regional "Or Bleu" strategy, the actual deployment of TWW reuse remains limited. This gap between political ambition, technical feasibility, and operational implementation highlights persistent barriers. The REUT'O'SUD project was developed to address this issue, combining territorial analysis with experimental approaches. Its initial phase identified significant potential for TWW reuse across various uses and locations, but also revealed recurring technical, regulatory, institutional, economic, and social constraints.To overcome these challenges, the project's second phase introduced thematic Living Labs focusing on agricultural, urban, and recreational uses. These collaborative platforms bring together researchers, public authorities, companies, and users to co-design and test solutions in real-life conditions. Their objectives include improving stakeholder cooperation, refining the understanding of barriers, supporting local engagement, and fostering the long-term adoption of solutions.

The first workshops held in 2024, dedicated to agricultural uses, played a key role in building a shared understanding and initiating regional cooperation. Although still at an early stage, the project highlights the relevance of Living Labs in addressing the complexity of TWW reuse. However, challenges remain, including sustaining stakeholder engagement, coordinating diverse interests, and integrating the approach into public policies. Overall, REUT'O'SUD demonstrates significant untapped potential for TWW reuse and contributes to ongoing discussions on adaptive water governance and sustainable resource management.

Keywords: Water scarcity; Treated wastewater reuse; Territorial analysis; Stakeholder cooperation; Sustainable resource management.

1 Project Manager: 'Wastewater Reuse' in the SUD Region; Aix-Marseille University (amU) / FR ECCOREV / CISAM+; pauline.lombard-creisson@univ-amu.fr
2 Professor and Researcher; Aix-Marseille University (amU) / CNRS/ FR ECCOREV / IRD / INRAE / Collège de France / CEREGE / International Water Research Institute/Mohammed VI Polytechnic University; nicolas.roche@univ-amu.fr
3 Project Manager; Société du Canal de Provence; barbara.howes@canal-de-provence.fr
4 TWWR Project Officer; Société du Canal de Provence; pacome.dewaele@canal-de-provence.fr
5 TWWR Project Manager; Société du Canal de Provence; johan.cherel@canal-de-provence.fr
6 Systems, Network and Multimedia Design Engineer; FR ECCOREV / CNRS ; armand.rotereau@univ-amu.fr

RÉSUMÉ

La pénurie d'eau constitue un défi croissant dans les régions méditerranéennes, sous l'effet du changement climatique, de la fréquence accrue des sécheresses, de la croissance démographique et de l'urbanisation. Dans la région SUD–Provence–Alpes–Côte d'Azur, ces pressions intensifient la concurrence entre les usages domestiques, agricoles, industriels et environnementaux de l'eau, suscitant de vives inquiétudes quant à la gestion durable de l'eau. Dans ce contexte, la réutilisation des eaux usées traitées (EUT) s'est imposée comme une solution prometteuse pour diversifier les ressources en eau, garantir les usages non potables et renforcer la résilience territoriale (GIEC, 2023 ; UNESCO, 2024).

Malgré son potentiel reconnu et le soutien de politiques publiques, telles que la stratégie régionale « Or Bleu », le déploiement effectif de la réutilisation des EUT reste limité. Cet écart entre l'ambition politique, la faisabilité technique et la mise en œuvre opérationnelle met en évidence des obstacles persistants. Le projet REUT'O'SUD a été développé pour répondre à cette problématique, en combinant analyse territoriale et approches expérimentales. Sa phase initiale a permis d'identifier un potentiel significatif de réutilisation des ETP pour divers usages et emplacements, mais a également révélé des contraintes récurrentes d'ordre technique, réglementaire, institutionnel, économique et social. Pour surmonter ces défis, la deuxième phase du projet a mis en place des « Living Labs » thématiques axés sur les usages agricoles, urbains et récréatifs. Ces plateformes collaboratives rassemblent des chercheurs, des pouvoirs publics, des entreprises et des usagers afin de coconcevoir et de tester des solutions en conditions réelles. Leurs objectifs consistent notamment à améliorer la coopération entre les parties prenantes, à affiner la compréhension des obstacles, à soutenir l'engagement local et à favoriser l'adoption à long terme de solutions.

Les premiers ateliers organisés en 2024, consacrés aux utilisations agricoles, ont joué un rôle clé dans l'établissement d'une vision commune et le lancement d'une coopération régionale. Bien qu'il n'en soit encore qu'à ses débuts, le projet souligne la pertinence des « Living Labs » pour appréhender la complexité de la réutilisation des eaux usées traitées. Toutefois, des défis subsistent, notamment le maintien de l'engagement des parties prenantes, la coordination d'intérêts divers et l'intégration de cette approche dans les politiques publiques. Dans l'ensemble, REUT'O'SUD démontre un potentiel inexploité significatif pour la réutilisation des eaux usées et contribue aux débats en cours sur la gouvernance adaptative de l'eau et la gestion durable des ressources.

Mots-clés : Pénurie d'eau; Réutilisation des eaux usées traitées; Analyse territoriale; Coopération entre les parties prenantes; Gestion durable des ressources.

EFFECT OF TRANSPIRATION ON THE ACCUMULATION AND TRANSPORT OF BISPHENOL A IN CROP UNDER RECLAIMED WATER IRRIGATION

EFFET DE LA TRANSPIRATION SUR L'ACCUMULATION ET LE TRANSPORT DU BISPHÉNOL A DANS LES CULTURES IRRIGUÉES AVEC DES EAUX RECYCLÉES

Panpan Zhao[1], Wenyong Wu[2], Yaqi Hu[3], and Ruoxi Li[4]

ABSTRACT

In light of the escalating water resource scarcity, the practice of reclaimed water irrigation has gained widespread adoption. Nevertheless, certain pollutants present in reclaimed water pose environmental health risks, particularly emerging contaminants for which the underlying mechanisms remain unclear. The role of transpiration, acting as the primary mechanism facilitating the uptake of organic pollutants by plants, and its impact on the fate of emerging pollutants within plants necessitate comprehensive exploration. An analysis was conducted of the relationship between transpiration and the concentrations of bisphenol A (BPA), bioconcentration factor (BCF), and translocation factor (TF) in each part of the pepper. Through regression analysis, significant correlations were identified between transpiration and the BPA concentration in the roots, leaves and stems of pepper, as well as significant correlations with the BCF, and TF in the stems, and leaves of the pepper. For the fruits and shoots of pepper, transpiration did not exhibit a significant correlation with BPA concentration, BCF, and TF. An in-depth elucidation of the impact of transpiration on the mechanisms underlying BPA accumulation and transport within colored peppers can contribute to informed decision-making regarding the agricultural reuse of reclaimed water, particularly in regions characterized by varying degrees of aridity.

Keywords: Reclaimed water irrigation, emerging contaminants; transpiration, accumulation and transport.

RÉSUMÉ

Face à la pénurie croissante des ressources en eau, la pratique de l'irrigation par eaux recyclées s'est largement généralisée. Néanmoins, certains polluants présents dans ces eaux posent des risques pour la santé environnementale, en particulier les contaminants émergents dont les mécanismes sous-jacents restent mal connus. Le rôle de la transpiration, qui constitue le principal mécanisme facilitant l'absorption des polluants organiques par les plantes, ainsi que son impact sur le devenir des contaminants émergents au sein des plantes, nécessite une étude approfondie. Une analyse a été menée sur la relation entre la transpiration et les concentrations de bisphénol A (BPA), le facteur de bioconcentration (FCB) et le facteur

1 Graduate student, State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 20 Chegongzhuang West Rd.; Beijing Engineering Research Center of Sustainable Urban Sewage System Construction and Risk Control, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 15 Yongyuan Rd., p2384696541@126.com.
2 Professor, State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 20 Chegongzhuang West Rd., wenyongwu@126.com.
3 Associate professor, State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 20 Chegongzhuang West Rd., huyq2011@126.com.
4 Associate professor, State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 20 Chegongzhuang West Rd., liruoxi@iwhr.com.

de translocation (FT) dans chaque partie du poivron. Grâce à une analyse de régression, des corrélations significatives ont été identifiées entre la transpiration et la concentration en BPA dans les racines, les feuilles et les tiges du poivron, ainsi que des corrélations significatives avec le BCF et le TF dans les tiges et les feuilles du poivron. En ce qui concerne les fruits et les pousses du poivron, la transpiration n'a pas montré de corrélation significative avec la concentration en BPA, le BCF et le TF. Une élucidation approfondie de l'impact de la transpiration sur les mécanismes sous-jacents à l'accumulation et au transport du BPA au sein des poivrons colorés peut contribuer à une prise de décision éclairée concernant la réutilisation agricole des eaux recyclées, en particulier dans les régions caractérisées par des degrés d'aridité variables.

Mots-clés : Irrigation par eaux recyclées; Contaminants émergents; Transpiration; Accumulation et transport.

THE KEY CHALLENGE WATER OCCITANIE: SIX LIVING LABS NETWORK FOR THE ASSESSMENT OF THE RELEVANCE OF LOCAL WATER REUSE SOLUTIONS AND THEIR CONSEQUENCES

LE DÉFI MAJEUR CHEZ « WATER OCCITANIE » : UN RÉSEAU DE SIX LABORATOIRES VIVANTS POUR ÉVALUER LA PERTINENCE DES SOLUTIONS LOCALES DE RÉUTILISATION DE L'EAU ET LEURS CONSÉQUENCES

Justine Bassoul[1], Claire Albasi[2], and Olivier Barreteau[3]

ABSTRACT

The Water Occitanie (WOc) initiative is a strategic five-year action-research program designed to address the severe hydro-climatic challenges facing the Occitanie region, such as recurring droughts and declining groundwater levels. While France currently recycles less than 1% of its wastewater compared to 90% in countries like Israel, the WOc program seeks to investigate this gap by implementing a hybrid methodology that merges Living Labs and Science Shops and foster co-research. This approach unfolds through a structured process where inaugural forums identify local water priorities, steering committees refine research questions, and collaborative projects provide evidence-based solutions across six diverse territories. From decentralized wastewater treatment in Montpellier to biochar-based decontamination in the Clermontais, these projects tackle specific regional needs while ensuring that research remains grounded in social learning and stakeholder validation. After four years of operation, the program has highlighted the critical importance of flexible governance in balancing diverse interests, such as those between farmers and policymakers, and has underscored the necessity of addressing technical barriers through institutional cooperation. The positive impacts of the program are evident in the development of contextualized, low-cost tools and the integration of research into local water management strategies, effectively bridging the gap between scientific innovation and public policy. By empowering stakeholders to co-design solutions and testing reuse scenarios under various global change projections, the WOc initiative demonstrates how Water-Oriented Living Labs can build resilience against environmental pressure. Ultimately, the program establishes a scalable model for inclusive water governance, proving that long-term, transdisciplinary engagement is essential for successful climate adaptation. Future efforts will focus on institutionalizing these platforms to ensure that the knowledge generated is fully appropriated by water managers, industries, and citizens alike, thereby offering a sustainable and equitable blueprint for regions worldwide facing increasing water scarcity.

Keywords: Local **water reuse solutions;** Action-research program; Scalable model; Environmental pressure; Water scarcity.

RÉSUMÉ

L'initiative Water Occitanie (WOc) est un programme stratégique de recherche-action d'une durée de cinq ans, conçu pour répondre aux défis hydroclimatiques majeurs auxquels est confrontée la région d'Occitanie, tels que les sécheresses récurrentes et la baisse du niveau des nappes phréatiques. Alors que la France recycle actuellement moins de 1 % de ses eaux

1 Université de Montpellier Justine.bassoul@umontpellier.fr
2 **Univ Toulouse, Toulouse INP, CNRS, LGC, Toulouse, France** Claire.albasi@toulouse-inp.fr
3 G-EAU, Univ. Montpellier, AgroParistech, BRGM, Cirad, INRAE, Institut Agro, IRD Olivier.barreteau@umontpellier.fr

usées, contre 90 % dans des pays comme Israël, le programme WOc cherche à combler cet écart en mettant en œuvre une méthodologie hybride qui associe les « laboratoires vivants » (Living Labs) et les « ateliers scientifiques » (Science Shops) et favorise la recherche collaborative. Cette approche se déploie à travers un processus structuré où des forums inauguraux identifient les priorités locales en matière d'eau, des comités de pilotage affinent les questions de recherche et des projets collaboratifs fournissent des solutions fondées sur des données probantes dans six territoires divers. Du traitement décentralisé des eaux usées à Montpellier à la décontamination à base de biochar dans le Clermontois, ces projets répondent à des besoins régionaux spécifiques tout en veillant à ce que la recherche reste ancrée dans l'apprentissage social et la validation par les parties prenantes. Après quatre ans de fonctionnement, le programme a mis en évidence l'importance cruciale d'une gouvernance flexible pour concilier des intérêts divers, tels que ceux des agriculteurs et des décideurs politiques, et a souligné la nécessité de surmonter les obstacles techniques grâce à la coopération institutionnelle. Les retombées positives du programme sont manifestes dans le développement d'outils contextualisés et peu coûteux, ainsi que dans l'intégration de la recherche dans les stratégies locales de gestion de l'eau, comblant ainsi efficacement le fossé entre innovation scientifique et politique publique. En donnant aux parties prenantes les moyens de concevoir ensemble des solutions et de tester des scénarios de réutilisation dans le cadre de diverses projections de changement global, l'initiative WOc démontre comment les laboratoires vivants axés sur l'eau peuvent renforcer la résilience face aux pressions environnementales. En fin de compte, le programme établit un modèle évolutif de gouvernance inclusive de l'eau, prouvant qu'un engagement transdisciplinaire à long terme est essentiel à la réussite de l'adaptation au changement climatique. Les efforts futurs se concentreront sur l'institutionnalisation de ces plateformes afin de garantir que les connaissances générées soient pleinement appropriées par les gestionnaires de l'eau, les industries et les citoyens, offrant ainsi un modèle durable et équitable aux régions du monde entier confrontées à une pénurie d'eau croissante.

Mots-clés : Solutions locales de réutilisation de l'eau; Programme de recherche-action; Modèle évolutif; Pressions environnementales; Pénurie d'eau.

Q.68.2: How can a desalination strategy be designed and developed to specifically meet agricultural needs, both in quantitative and qualitative terms?

Comment est-ce qu'une stratégie de dessalement peut être conçue et développée pour répondre spécifiquement aux besoins agricoles, tant sur le plan quantitatif que qualitatif?

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS — **Page No.**

R.68.2.01 **DESIGNING AND IMPLEMENTING A DESALINATION STRATEGY FOR AGRICULTURAL WATER REUSE: INSIGHTS FROM THE SALT'EAUX DEMONSTRATOR** — 617
CONCEPTION ET MISE EN ŒUVRE D'UNE STRATÉGIE DE DESSALEMENT POUR LA RÉUTILISATION DES EAUX AGRICOLES: ENSEIGNEMENTS DU DÉMONSTRATEUR SALT'EAUX
Marjorie B. Kreis, Rémi Declercq, Jacques Delagnes, Elisa Schwertz and Chantal Jacopin (FRANCE)

R.68.2.02 **DESALINATION FOR AGRICULTURE DEVELOPMENT: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES** — 619
DESSALEMENT ET DÉVELOPPEMENT AGRICOLE: PERSPECTIVES D'AVENIR ET DÉFIS
Abdourahman Maki, and Khouloud Trabelsi (North Africa)

R.68.2.03 **THRESHOLD OPTIMIZATION OF CULTIVATED WASTELAND PATTERNS UNDER SOIL SALINITY DYNAMICS BY INTEGRATING SALTMOD AND CLUE-S** — 621
OPTIMISATION DU SEUIL DES MODÈLES DE TERRES CULTIVÉES-TERRES EN FRICHE SOUS LA DYNAMIQUE DE LA SALINITÉ DU SOL EN INTÉGRANT SALTMOD ET CLUE-S
Xiaomin Chang, Haorui Chen, Xiaoyan Guan, and Yuan Tao (China)

R.68.2.04 **INTEGRATED PLANNING OF DESALINATED AND RECYCLED WATER IN ARID WATER SUPPLY SYSTEMS: A CASE STUDY FROM ABU DHABI** — 623
PLANIFICATION INTÉGRÉE DE L'EAU DESSALÉE ET RECYCLÉE DANS LES SYSTÈMES D'APPROVISIONNEMENT EN EAU DES ZONES ARIDES: UNE ÉTUDE DE CAS MENEE A ABU DHABI
Edda Kalbus, Najma Omar Ajaberi, Mohamed Abbas Ahmed, and Paul-Henri Leruth (United Arab Emirates)

R.68.2.05 **RECENT ADVANCES IN MANAGEMENT OF SALINE WATERLOGGED SOILS AND POOR QUALITY WATER IN INDIA** — 625
PROGRÈS RÉCENTS REALISES DANS LA GESTION DES SOLS DETREMPES D'EAU SALÉE ET DE L'EAU DE MAUVAISE QUALITÉ EN INDE
Gurbachan Singh (India)

R.68.2.06 **AGROFORESTRY AS DISPOSAL OPTION FOR DOMESTIC AND INDUSTRIAL EFFLUENTS** — 627
AGROFORESTERIE COMME OPTION D'ÉLIMINATION DES EFFLUENTS DOMESTIQUES ET INDUSTRIELS
Gurbachan Singh (India)

INDEX OF ABSTRACT / INDEX DES RÉSUMÉS **Page No.**

R.68.2.07 **SOCIO-TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF NON-CONVENTIONAL DESALINATION SYSTEMS IN COASTAL THAILAND: A STRATEGIC RESPONSE TO WATER SCARCITY CHALLENGES** **629**
ANALYSE SOCIO-TECHNIQUE ET ECONOMIQUE DES SYSTEMES DE DESSALEMENT NON CONVENTIONNELS DANS LES ZONES COTIERES DE THAÏLANDE: UNE REPONSE STRATEGIQUE AUX DEFIS LIES A LA PENURIE D'EAU
Aksara Putthividhya, Somkiat Prajamwong, and Sasin Jirasirirak (Thailand)

R.68.2.08 **A MULTI-SCALAR FRAMEWORK FOR AGRICULTURAL DESALINATION IN THE CHTOUKA-AIT BAHA WEF-NEXUS** **632**
UN CADRE À L'ÉCHELLE MULTIPLE POUR LE DESSALEMENT À DES FINS AGRICOLES DANS LE LIEN ENTRE EAU-ALIMENTATION-ENVIRONNEMENT DE CHTOUKA-AIT BAHA
Amouch S. Akhssas A. Talha S. Besbou O. Ouaniam A, and Haddoudi S (Morocco)

DESIGNING AND IMPLEMENTING A DESALINATION STRATEGY FOR AGRICULTURAL WATER REUSE: INSIGHTS FROM THE SALT'EAUX DEMONSTRATOR

CONCEPTION ET MISE EN ŒUVRE D'UNE STRATÉGIE DE DESSALEMENT POUR LA RÉUTILISATION DES EAUX AGRICOLES : ENSEIGNEMENTS DU DÉMONSTRATEUR SALT'EAUX

Marjorie B. Kreis[1], Rémi Declercq[1], Jacques Delagnes[2]
Elisa Schwertz[3] and Chantal Jacopin[4]

ABSTRACT

Coastal agriculture is increasingly affected by water scarcity and soil salinization, requiring innovative strategies capable of meeting both the quantitative and qualitative requirements of irrigation water. The SALT'EAUX project, implemented in the Sète Agglopôle Méditerranée (SAM) region in southern France, develops an integrated approach to desalination and agricultural water reuse in coastal environments exposed to saline groundwater intrusions and the influence of the Thau Lagoon. Initiated in 2023 as one of the territorial demonstrators of the France 2030 Call for Expressions of Interest programme, the project combines treated wastewater reuse with upstream and downstream salinity management for vineyards and diversification crops.

The strategy is based on fit-for-purpose desalination adapted to local agronomic and hydrological conditions. At the Mèze site, sewer network rehabilitation and selective demineralization reduce treated wastewater salinity to approximately 1.5 dS/m, enabling the irrigation of 90 hectares of vineyards and diversification crops such as olives and onions. At Marseillan, where soils and groundwater are already saline, treated wastewater with salinity levels between 1.5 and 3.5 dS/m is combined with hydraulic drainage rehabilitation, controlled irrigation, and adaptive salinity management over 70 hectares of vineyards.

The methodology integrates continuous salinity monitoring, predictive modelling, adaptive irrigation management, and high-resolution soil salinity mapping using geophysical surveys and machine-learning-based inversion methods. These tools support the optimization of irrigation volumes, water quality, and drainage practices according to crop tolerance and seasonal variability.

Preliminary results from the maturation phase demonstrate that targeted desalination strategies can achieve both quantitative irrigation objectives and qualitative soil preservation goals. The SALT'EAUX project highlights the importance of combining technological solutions with agronomic and hydrological understanding to develop operational, economically realistic, and transferable desalination strategies for sustainable coastal agriculture.

Keywords: Water scarcity and soil salinization; geophysical surveys; controlled irrigation; desalination strategies; sustainable coastal agriculture.

RESUME

La pénurie d'eau et la salinisation des sols touchent de plus en plus l'agriculture côtière, exigeant des stratégies innovantes capables de répondre à la fois aux exigences quantitatives

1 ECOFILAE, Montpellier, France Email: marjorie.kreis@ecofilae.fr
2 Sète Agglopôle Méditerranée, Sète, France
3 Grands Domaines du Littoral, Aigues-Mortes, France
4 SUEZ Eau France Occitanie, Béziers, France

et qualitatives de l'eau d'irrigation. Le projet SALE'EAUX, mis en œuvre dans la région de Sète Agglopôle Méditerranée (SAM) au sud de la France, développe une approche qui intègre le dessalement et la réutilisation des eaux agricole dans les environnements côtiers exposés aux intrusions d›eaux souterraines salines et à l'influence de la lagune de Thau. Lancé en 2023 comme l'un des démonstrateurs territoriaux du programme d'appel à manifestation d'intérêt France 2030, le projet unit la réutilisation des eaux usées traitées avec une gestion de la salinité en amont et en aval pour les vignobles et les cultures de diversification.

La stratégie s'appuie sur un dessalement adapté aux conditions agronomiques et hydrologiques locales. Sur le site de Mèze, la réhabilitation du réseau égout et la déminéralisation sélective réduisent la salinité des eaux usées traitées à environ 1,5 dS/m, permettant l'irrigation de 90 hectares de vignobles et la diversification des cultures telles que les olives et les oignons. À Marseillan, où les sols et les eaux souterraines sont déjà salins, des eaux usées traitées avec des niveaux de salinité compris entre 1,5 et 3,5 dS/m sont combinées à une réhabilitation du drainage hydraulique, une irrigation contrôlée et une gestion adaptative de la salinité sur plus de 70 hectares de vignobles.

La méthodologie intègre une surveillance continue de la salinité, une modélisation prédictive, une gestion adaptative de l'irrigation et une cartographie à haute résolution de la salinité des sols à l'aide d'études géophysiques et de méthodes d'inversion basées sur l'apprentissage automatique. Ces outils soutiennent l'optimisation des volumes d'irrigation, de la qualité de l'eau et des pratiques de drainage selon la tolérance des cultures et de la variabilité saisonnière.

Les résultats préliminaires de la phase de maturation démontrent que des stratégies ciblées de dessalement peuvent realiser à la fois les objectifs quantitatifs d'irrigation et les objectifs qualitatifs de préservation des sols. Le projet SALE'EAUX souligne l'importance de combiner des solutions technologiques avec une compréhension agronomique et hydrologique afin de développer des stratégies de dessalement opérationnelles, économiquement réalistes et transmissibles en ce qui concerne l'agriculture côtière durable.

Mots-clés : Pénurie d›eau et salinisation des sols; Enquêtes géophysiques; Irrigation maîtrisée; Stratégies de dessalement; Agriculture côtière durable.

DESALINATION FOR AGRICULTURE DEVELOPMENT: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES

DESSALEMENT ET DÉVELOPPEMENT AGRICOLE: PERSPECTIVES D'AVENIR ET DÉFIS

Abdourahman Maki[1], and Khouloud Trabelsi[2]

ABSTRACT

Increasing water scarcity, climate change, and rising food demand are intensifying pressure on conventional freshwater resources and accelerating interest in non-conventional water solutions for agriculture. This paper examines the practical application of desalination in agricultural systems, with particular emphasis on technological performance, agronomic implications, economic feasibility, environmental sustainability, social acceptance and governance challenges.

The study is based on a synthesis of international experiences, scientific literature, and operational case studies from water-scarce regions including the Middle East, North Africa, and Mediterranean countries. Particular attention is given to reverse osmosis technologies, which currently dominate agricultural desalination due to lower energy requirements compared with thermal processes. Recent technological developments have improved energy efficiency and water recovery rates, while emerging approaches such as renewable-energy integration, brine mining, and zero liquid discharge systems are increasingly explored to enhance sustainability.

The analysis explores the influence of global agricultural commodity markets on the adoption of desalinated water, noting that high-value crops often justify this investment especially in arid and coastal regions where conventional water resources are insufficient or degraded. However, several technical constraints remain in desalination for agriculture development, including high energy consumption, elevated production costs, boron toxicity risks, nutrient deficiencies, and long-term soil salinization concerns. Blending desalinated water with groundwater or reclaimed wastewater appears to improve irrigation performance and reduce economic and environmental pressures.

The paper further demonstrates that the viability of desalination in agriculture depends not only on technological progress, but also on supportive governance frameworks, economic incentives, institutional coordination, social acceptance and stakeholder engagement. Successful experiences in countries such as Spain, Israel, and Morocco illustrate the importance of integrating desalination within broader water–energy–food strategies. Overall, desalination can contribute significantly to agricultural water security and climate resilience when implemented as part of an integrated and diversified water management approach.

Keywords: Energy efficiency; nutrient deficiencies; long-term soil salinization concerns; irrigation performance; agricultural water security.

RESUME

La croissance de la pénurie d'eau, le changement climatique et la croissance de la demande alimentaire exercent des pressions intenses sur les ressources en eau douce conventionnelles et accélèrent l'intérêt pour rechercher des solutions non conventionnelles d'approvisionnement

1 Land and Water Officer at the FAO Subregional Office for North Africa (FAO-SNE). Lac Winnipeg Street, Lac 1, Tunis, Tunisia, E-mail: Abdourahman.Maki@fao.org.
2 Rural Engineering specialist at the FA O Subregional Office for North Africa (FAO-SNE). Lac Winnipeg Street, Lac 1, Tunis, Tunisia, E-mail: Khouloud.Trabelsi@fao.org

en eau pour l'agriculture. Cet article examine l'application pratique du dessalement dans les systèmes agricoles, en mettant l'accent sur la performance technologique, les implications agronomiques, la faisabilité économique, la durabilité environnementale, l'acceptation sociale et les défis liés à la gouvernance.

L'étude se base sur une synthèse des expériences internationales, de la littérature scientifique et des études de cas opérationnelles menées dans les régions confrontées à la pénurie d'eau, y compris le Moyen-Orient, l'Afrique du Nord et les pays méditerranéens. Une attention particulière est accordée aux technologies d'osmose inverse, qui dominent actuellement le dessalement agricole en raison de besoins énergétiques plus faibles par rapport aux procédés thermiques. Les développements technologiques récents ont amélioré l'efficacité énergétique et les taux de récupération de l'eau, tandis que des approches émergentes telles que l'intégration des énergies renouvelables, l'extraction des matières utiles des eaux salées et les systèmes à zéro déchage liquide sont de plus en plus explorées pour renforcer la durabilité.

L'analyse explore l'influence exercée par des marchés mondiaux de matières premières agricoles sur l'adoption de l'eau dessalée, en notant que les cultures à haute valeur justifient souvent cet investissement, en particulier dans les régions arides et côtières où les ressources en eau conventionnelles sont insuffisantes ou dégradées. Cependant, plusieurs contraintes techniques existent dans le dessalement pour le développement de l'agriculture, notamment une forte consommation d'énergie, des coûts de production élevés, des préoccupations concernant la toxicité du bore, des carences en nutriments et des préoccupations à long terme concernant la salinisation des sols. Le mélange d'eau dessalée avec des eaux souterraines ou des eaux usées mises en valeur semble améliorer les performances d'irrigation et réduire les pressions économiques et environnementales.

En outre, le document démontre que la viabilité du dessalement dans l'agriculture dépend non seulement du progrès technologique, mais aussi de cadres de gouvernance favorables, d'incitations économiques, de coordination institutionnelle, d'acceptation sociale et d'implication des parties prenantes. Des expériences menée dans lpays tels que l'Espagne, l'Israël et le Maroc illustrent l'importance de l''intégration de dessalement au sein de stratégies plus larges en matière d'eau–énergie–alimentaire. En général, le dessalement peut contribuer de manière significative à la sécurité hydrique agricole et à la résistance climatique lorsqu'il s'inscrit dans le cadre d'une approche intégrée et diversifiée de gestion de l'eau.

Mots-clés : Efficacité énergétique; Carences en nutriments; Préoccupations concernant la salinisation des sols à long terme; Performance de l'irrigation; sécurité hydrique agricole.

THRESHOLD OPTIMIZATION OF CULTIVATED-WASTELAND PATTERNS UNDER SOIL SALINITY DYNAMICS BY INTEGRATING SALTMOD AND CLUE-S

OPTIMISATION DU SEUIL DES MODÈLES DE TERRES CULTIVÉES-TERRES EN FRICHE SOUS LA DYNAMIQUE DE LA SALINITÉ DU SOL EN INTÉGRANT SALTMOD ET CLUE-S

Xiaomin Chang[1], Haorui Chen[2], Xiaoyan Guan[3], and Yuan Tao[4]

ABSTRACT

Soil salinization threatens sustainable agriculture, and treating salt wastelands is crucial for maintaining soil productivity and ecological balance. However, excessive reclamation of these wastelands through land consolidation may exacerbate salinization, highlighting the need for optimized allocation. Although previous studies have mainly focused on field-scale water-salt transport, the integration of land-use spatial configuration with soil salinity redistribution remains insufficiently explored. To address this gap, this study developed a coupled SaltMod-CLUE-S framework to quantify interactions between land-use change and soil salinity in the Jiefangzha Irrigation Scheme of the Hetao Irrigation District. Remote-sensing data from 1996 to 2016 were integrated with the SaltMod water-salt balance model and the CLUE-S land-use simulation model to investigate cultivated-wasteland dynamics, spatiotemporal transfer patterns, and soil salinity responses under natural development, current irrigation, and water-saving scenarios.

The critical cultivation-to-salt wasteland ratio threshold (CSWR-T) was defined as the maximum cultivated land-to-salt wasteland ratio that can be sustained without persistent long-term root-zone salinity accumulation. Higher CSWR-T values indicate greater capacity for cultivated-land expansion while maintaining long-term salinity stability, whereas lower values reflect more restrictive salinity constraints. The optimal CSWR-T range of 7.5–8.5 balances food production with ecological safety, while excessive values above 9.0 reduce salt drainage capacity. Soil salinity showed threshold-dependent and nonlinear responses to irrigation management. Autumn irrigation promoted leaching, growing-season irrigation secured crop water supply, and total diversion determined the overall water-salt balance. Increased water-saving intensity reduced the CSWR-T, requiring larger salt wastelands to maintain ecological functions. These findings provide a quantitative basis for targeted, period-specific irrigation management and spatial optimization of salt wastelands, supporting sustainable land use, salinity control, and ecological security in arid and semi-arid irrigation districts.

Keyword: Sustainable; Soil salinity; Irrigation District; crop water supply; ecological security.

RESUME

La salinisation des sols menace l'agriculture durable, et le traitement des terres en friche salines est crucial pour maintenir la productivité des sols et l'équilibre écologique. Cependant, la mise en valeur excessive de ces terres en friche par le remembrement peut aggraver la salinisation,

1 Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, China, Email: changxm@iwhr.com
2 Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, China, Email: chenhr@iwhr.com
3 Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, China, Email: guanxy@iwhr.com
4 Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, China, Email:taoyuan@iwhr.com

soulignant la nécessité d'une allocation optimisée. Bien que les études précédentes se soient principalement concentrées sur le transport du sel d'eau à l'échelle de terrain, l'intégration de la configuration spatiale de l'usage des sols avec la redistribution de la salinité des sols reste insuffisamment explorée. Pour combler cette lacune, cette étude a développé un cadre couplant les modèles SaltMod et CLUE-S afin de quantifier les interactions entre le changement d'usage des sols et la salinité du sol dans le projet d'irrigation de Jiefangzha du périmètre irrigué de Hetao. Les données de télédétection recueillies de 1996 à 2016 ont été intégrées au modèle d'équilibre eau-sel SaltMod et au modèle de simulation d'usage des terres CLUE-S afin d'étudier la dynamique des terres cultivées et les terres en friche, les schémas de transfert spatiotemporel et les réponses de la salinité des sols dans le cadre du développement naturel, l'irrigation actuelle et les scénarios d'économie d'eau.

Le seuil critique du rapport terre cultivée/terre en friche saline (CSWR-T) a été défini comme le rapport terre cultivée/terre en friche saline maximal qui peut être maintenu sans accumulation persistante à long terme de la salinité dans la zone racinaire. Des valeurs plus élevées de CSWR-T indiquent une plus grande capacité d'expansion des terres cultivées tout en maintenant la stabilité de la salinité à long terme, tandis que des valeurs plus faibles reflètent des contraintes de salinité plus restrictives. L'éventail optimal CSWR-T de 7,5–8,5 équilibre la production alimentaire avec la sécurité écologique, tandis que des valeurs supérieures à 9,0 réduisent la capacité de drainage du sel. La salinité du sol a montré des réponses dépendantes du seuil et non linéaires à la gestion de l'irrigation. L'irrigation d'automne a favorisé le lessivage, l'irrigation de la saison de croissance a assuré l'approvisionnement en eau des cultures et la dérivation totale a déterminé l'équilibre global eau-sel. L'augmentation de l'intensité des économies d'eau a réduit le CSWR-T, nécessitant de plus grandes terres en friche salines pour maintenir les fonctions écologiques. Ces résultats fournissent une base quantitative pour la gestion ciblée de l'irrigation sur des périodes spécifiques et l'optimisation spatiale des terres en friche salines, soutenant ainsi l'usage durable des sols, le contrôle de la salinité et la sécurité écologique dans les périmètres irrigués arides et semi-arides.

Mots-clés : Durable; Salinité des sols; Périmètre irrigué; Approvisionnement en eau des cultures; Sécurité écologique.

INTEGRATED PLANNING OF DESALINATED AND RECYCLED WATER IN ARID WATER SUPPLY SYSTEMS: A CASE STUDY FROM ABU DHABI

PLANIFICATION INTÉGRÉE DE L'EAU DESSALÉE ET RECYCLÉE DANS LES SYSTÈMES D'APPROVISIONNEMENT EN EAU DES ZONES ARIDES : UNE ÉTUDE DE CAS MENEE A ABU DHABI

Edda Kalbus[1], Najma Omar Ajaberi[2], Mohamed Abbas Ahmed[3], and Paul-Henri Leruth[4]

ABSTRACT

Abu Dhabi's water supply system is characterized by extreme aridity, negligible natural freshwater resources, and a strong dependence on non-renewable groundwater. At present, approximately 57% of total water use is supplied by groundwater, primarily for agriculture and forestry, with the remainder provided by desalinated seawater and recycled wastewater. Continued groundwater abstraction has led to declining groundwater levels, prompting the Government of Abu Dhabi to set a strategic target of net-zero groundwater abstraction by 2035. Achieving this target requires coordinated expansion of alternative water sources while maintaining security of supply for all users, including agriculture and landscaping.

This paper presents an analysis of the interdependencies between urban water supply, wastewater reuse, and agricultural irrigation demand. Desalinated water supplied to urban areas generates wastewater, which is treated and returned as recycled water for irrigation, creating a feedback loop in which urban demand patterns directly influence recycled water availability, and any shortfall between recycled water production and irrigation demand must be met by additional desalinated water. Quantifying this feedback and its seasonal dynamics is essential for accurate sizing of desalination capacity and for evaluating the benefits of coordinated planning across the two supply systems.

Comparison of independent and integrated planning approaches, using observed daily data, demonstrates that integrated planning, in which full recycled water production is delivered to irrigation and desalinated water provides a flexible top-up for any residual demand, requires materially lower desalination production capacity than an approach in which the two supply systems are planned in isolation.

The findings provide a transferable framework for arid regions seeking to reduce reliance on non-renewable groundwater while safeguarding agricultural productivity, and underscore the need for coordinated planning across desalinated and recycled water supply systems. An integrated water planning model currently under development will operationalise this framework for capacity planning in Abu Dhabi.

Keywords : Natural freshwater resources; groundwater abstraction; Desalinated water; non-renewable groundwater; recycled water production.

RESUME

Le système d'approvisionnement en eau d'Abou Dhabi se caractérise par une aridité extrême, des ressources naturelles en eau douce négligeables et une forte dépendance à l'égard des eaux souterraines non renouvelables. À l'heure actuelle, environ 57% de la consommation

1 Emirates Water and Electricity Company, Abu Dhabi, United Arab Emirates. <edda.kalbus@ewec.ae>
2 TAQA Distribution, Abu Dhabi, United Arab Emirates. <najma.aljaberi@taqadistribution.com>
3 TAQA Water Solutions, Abu Dhabi, United Arab Emirates. <mohamed.ahmed@taqa-ws.com>
4 Emirates Water and Electricity Company, Abu Dhabi, United Arab Emirates. <paul.leruth@ewec.ae>

totale d'eau provient des eaux souterraines, principalement pour l'agriculture et la foresterie, le reste étant fourni par l'eau de mer dessalée et les eaux usées recyclées. Le prélèvement continu des eaux souterraines a entraîné une baisse des niveaux d'eau souterraine, ce qui a incité le gouvernement d'Abou Dhabi à fixer un objectif stratégique de prélèvement net zéro d'ici 2035. Pour atteindre cet objectif, il faut développer de manière coordonnée des sources d'eau alternatives tout en maintenant la sécurité d'approvisionnement pour tous les usagers, y compris l'agriculture et l'aménagement paysager.

Cet article présente une analyse des interdépendances entre l'approvisionnement en eau en milieu urbain, la réutilisation des eaux usées et la demande en eau pour l'irrigation agricole. L'eau dessalée fournie aux zones urbaines donne lieu aux eaux usées, qui sont traitées et renvoyées sous forme d'eau recyclée pour but d'irrigation, créant ainsi une boucle de réactions dans laquelle les modèles de demande urbaine influencent directement la disponibilité de l'eau recyclée, et tout écart entre la production d'eau recyclée et la demande en irrigation doit être comblé par apport supplémentaire d'eau dessalée. La quantification de cette réaction et de sa dynamique saisonnière est essentielle pour dimensionner correctement la capacité de dessalement et pour évaluer les avantages d'une planification coordonnée des deux systèmes d'approvisionnement.

La comparaison des approches de planification indépendantes et intégrées, à l'aide de données quotidiennes observées, indique que la planification intégrée, dans laquelle la production totale d'eau recyclée est fournie à l'irrigation et l'eau dessalée offre un complément flexible à toute demande résiduelle, nécessite une capacité de production de dessalement sensiblement inférieure à celle d'une approche dans laquelle les deux systèmes d'approvisionnement sont planifiés de manière isolée.

Les résultats fournissent un cadre transmissible aux régions arides qui cherchent à réduire la dépendance aux eaux souterraines non renouvelables tout en préservant la productivité agricole, et soulignent la nécessité d'avoir une planification coordonnée des systèmes d'approvisionnement en eau dessalée et recyclée. Un modèle de planification intégrée de l'eau en cours d'élaboration permettra de rendre opérationnel ce cadre pour la planification des capacités à Abou Dhabi.

Mots-clés : Ressources naturelles en eau douce; Prélèvement d'eau souterraine; Eau dessalée; Eaux souterraines non renouvelables; Production d'eau recyclée.

RECENT ADVANCES IN MANAGEMENT OF SALINE WATERLOGGED SOILS AND POOR QUALITY WATER IN INDIA

PROGRÈS RÉCENTS REALISES DANS LA GESTION DES SOLS DETREMPES D'EAU SALÉE ET DE L'EAU DE MAUVAISE QUALITÉ EN INDE

Gurbachan Singh[1]

ABSTRACT

As per recent estimates nearly 953 million ha area is affected by salinity and sodicity in the world. Australia followed by north and central Asia and South America have the maximum problem of high salt concentration in the root zone soil. The climate change triggered frequency of weather related events like floods, droughts, frost, cold and heat waves has considerably increased during last two decades in India. Continuation of such trends associated with rise in temperature is expected to melt ice, glaciers, re-distribute water flow in rivers, raise sea levels, sub-merge coastal habitats, islands, generate tsunamis and dislocate human and livestock settlements. About 6.73 million ha otherwise productive area is constituted by salty lands in India. Gujarat state followed by UP has maximum area affected by salinity and sodicity. It has been further projected that about 12 million ha area will be affected by 2030. Similarly, about 25% of the ground water resources in India are saline and/or brakish. Continuous use of such water for irrigation is bound to increase soil salinity/sodicity. States like Rajasthan and Haryana have 84% and 62%, respectively ground water as saline/sodic. Introduction of irrigation in canal command areas coupled with over use of water has resulted in rise in ground water. In some of the canal commands water table is rising @ 0.3 to 1.2 meter/annum. Nearly 3.55 million ha is already water logged and gone out of cultivation. Losses in productivity due to water logging are reported 42% in paddy, 38% in wheat, 77% in cotton and 61% in sugarcane compared to productivity of these crops in normal soils. After the establishment of Central Soil Salinity Research Institute in 1969 at Karnal, several site specific technologies have been developed for reclamation and management of saline water logged lands, alkali soils and for efficient use of poor quality water. A gist of the relevant technological options is discussed in this paper. The Topics covered included : (i) extent, distribution and nature of salt-affected soils and poor quality water in different regions of India; (ii) surface, sub-surface, vertical drainage and bio-drainage technologies for management of water logged areas; (iii) salt tolerant crops, varieties and halophytes; (iv) Dourov technology for skimming floating good quality rainwater over saline water in coastal areas; (v) consumptive and mixed use of poor quality water with good quality water and (vi) future research and development need for management of salt-affected soils and poor quality water.

Keywords: Water Logging, Salinity, Sub-surface drainage, Biodrainage, Salt tolerant crops, Poor quality water.

RESUME

D'après des estimations récentes, près de 953 millions d'hectares de terre est affectée par la salinité et la sodicité dans le monde. L'Australie, suivie de l'Asie du Nord et centrale, ainsi que l'Amérique du Sud sont confrontés au plus grand problème de concentration élevée de sel dans le sol de la zone racinaire. Au cours des deux dernières décennies, l'Inde a connu

1 Gurbachan Singh Foundation for Research, Education and Development (GSFRED), Karnal, India, Former Director, CSSRI, Karnal, E-mail: dr.gurbachan@gmail.com, Website: www.gsfred.org

une augmentation considérable de la fréquence des événements météorologiques extrêmes — tels que les inondations, les sécheresses, les gelées ainsi que les vagues de froid et de chaleur — induits par le changement climatique. La poursuite de ces tendances associées à l'augmentation de la température devrait faire fondre la glace, les glaciers, redistribuer le débit fluviaux, provoquer une élévation du niveau de la mer, immerger les habitats côtiers et les îles dans la mer, générer des tsunamis et déstabiliser les établissements humains et d'élevage. Environ 6,73 millions d'hectares de terres par ailleurs productives sont transformées dans les terres salées en Inde. L'État du Gujarat, suivi par l'UP, a une superficie maximale affectée par la salinité et la sodicité. On prévoit en outre qu'environ 12 millions d'hectares de terre seront touchés d'ici 2030. De même, environ 25% des ressources en eau souterraine en Inde sont salines et/ou saumâtres. L'utilisation continue de cette eau pour l'irrigation donne lieu à l'augmentation de la salinité/sodicité du sol. Des États tels que le Rajasthan et l'Haryana possèdent 84% et 62% respectivement d'eau souterraine sous forme saline/sodique. L'introduction de l'irrigation dans les zones desservies par des canaux, associée à une utilisation excessive de l'eau, a entraîné une augmentation des eaux souterraines. Dans certains de ces zones, la surface de la nappe phréatique augmente de 0,3 à 1,2 mètre par an. Près de 3,55 millions d'hectares de terre sont déjà détrempés et ne sont plus cultivés. Les pertes de productivité dues à l'engorgement sont signalées à 42% pour le paddy, 38% pour le blé, 77% pour le coton et 61 % pour la canne à sucre par rapport à la productivité de ces cultures dans des sols normaux. Après la création de l'Institut central de recherche sur la salinité des sols en 1969 à Karnal, plusieurs technologies spécifiques au site ont été développées pour la remise en état et la gestion des **terres** détrempées salées, les sols alcalins et pour une utilisation efficace de l'eau de mauvaise qualité. Les principales options technologiques pertinentes sont examinées dans le présent document. Les thèmes abordés étaient les suivants : i) l'étendue, la distribution et la nature des sols salins et de l'eau de mauvaise qualité dans différentes régions de l'Inde; ii) les technologies de drainage de surface, souterrain, vertical et de biodrainage pour la gestion des zones détrempées; iii) les cultures et les variétés tolérantes au sel ainsi que les halophytes; (iv) la technologie «Dourov» permettant de prélever, par écrémage, les eaux de pluie de bonne qualité flottant au-dessus des eaux saline dans les zones côtières ; (v) la consommation et l'utilisation mixte de l'eau de mauvaise qualité avec l›eau de bonne qualité et (vi) les besoins futurs en matière de recherche et de développement pour la gestion des sols affectés par la salinité et des eaux de mauvaise qualité.

Mots-clés : Engorgement; Salinité; Drainage souterrain; Biodrainage; Cultures tolérantes au sel; Eau de mauvaise qualité.

AGROFORESTRY AS DISPOSAL OPTION FOR DOMESTIC AND INDUSTRIAL EFFLUENTS

AGROFORESTERIE COMME OPTION D'ÉLIMINATION DES EFFLUENTS DOMESTIQUES ET INDUSTRIELS

Gurbachan Singh[1]

ABSTRACT

Large volume of domestic and industrial effluents are produced daily and is dumped in-situ/ ex-situ and/ or released in village ponds, open abandoned spaces in cities, sewage systems and canals etc. Such effluents are many times loaded with heavy metals and other toxic cations and anions. Sewage water without treatment around cities is used for peri –urban agriculture, particularly for cultivation of vegetables and fodder. The heavy metals associated (Plate 1) with sewage water irrigation either gets accumulated in the soil, leached into the ground water and / or accumulate in root zone soil/ plant system. Several cases of heavy metal accumulation in vegetables and fodder and their subsequent cycling in food chain (soil – plant – animal – human – atmosphere) in peri – urban areas have been raised by environmentalists and civil society organizations. In Several parts of India heavy metal accumulation such as arsenic, cadmium, selenium, fluoride etc. is detected in the soil and affecting the human and livestock populations Sustainable water recycling and waste water reuse are important now a days considering water scarcity and increased water consumption through human activities. Trees based land use system where end product is not associated with the human and animal food / feed system for livestock seems an option of great promise for disposal and credit worthy option for safe disposal of industrial effluents. There seems strong case to reserve some abandoned / wasteland in or near big cities to be planted with trees to create green belt using industrial effluents. Research to identify a list of trees tolerant to specific and multiple heavy metal stresses and different submergence regimes following different planting geometry, planting technique and management practices seems need of the hour. The three-phase strategy mentioned below for safe use of water will be discussed in this paper.

Planning for separation of domestic waste water from industrial effluents loaded with heavy metals and toxins needs to be strategized. The domestic waste water mainly comprising of human and livestock excreta can be used in agriculture by mixing with fresh water. However, close monitoring of such water on yearly basis will be needed to check nitrate leaching in soil, ground water and edible portion of the crops. Close watch on micro-organisms build-up in general and *E- coli* in particular has to be exercised.

In cases where domestic sewerage and industrial effluents are draining at one point, such water should not be used to irrigate edible crops. A part of such sewerage effluent can be used for raising green belts using high transpiration trees such as eucalyptus, dalbergia, bamboo, pongamia, casuarinas, silver oak etc. In this case, trees are raised on bunds of about one meter height and one meter width. The sewerage effluents are disposed in the furrows between tree rows**.** It may also be useful for rehabilitation of unused waste land areas in periphery of big cities and also along roads, railway tracks and canals. However, careful monitoring of soil, ground water and air pollution will be required to incorporate timely corrections. The most effective and practical way to deal with waste water is to establish waste water treatment plants.

Keywords: Waste water, Agroforestry, Domestic waste water, Industrial effluents, Heavy metals, Human health.

1 Foundation for Research, Education and Development (GSFRED), Karnal-132001, India, Former Director, CSSRI, Karnal-132001 E-mail: dr.gurbachan@gmail.com, Website: www.gsfred.org

RESUME

Un grand volume d'effluents domestiques et industriels se produit quotidiennement et est déversé sur place ou ailleurs, ou rejeté dans les étangs de village, les espaces ouverts abandonnés dans les villes, les systèmes d'égouts et les canaux, etc. Ces effluents sont souvent chargés de métaux lourds et d'autres cations et anions toxiques. Aux abords des villes, les eaux d'égout sans traitement sont utilisées pour l'agriculture périurbaine, en particulier pour la culture de légumes et de fourrage. Les métaux lourds associés (plaque 1) à l'irrigation des eaux d'égout s'accumulent dans le sol, lessivent dans les nappes phréatiques et / ou s'accumulent dans la zone racinaire du système sol/plante. Des écologistes et des organisations de la société civile ont signalé plusieurs cas d'accumulation de métaux lourds dans les légumes et le fourrage, ainsi que leur recyclage ultérieur dans la chaîne alimentaire (sol – plante – animal – humain – atmosphère) en zone périurbaine. Dans plusieurs régions de l'Inde, une accumulation de métaux lourds tels que l'arsenic, le cadmium, le sélénium, le fluorure, etc., est détectée dans le sol et affecte le bétail et la population humaine. Le recyclage durable de l'eau et la réutilisation des eaux usées sont désormais importants compte tenu de la pénurie d'eau et de l'augmentation de la consommation d'eau due aux activités humaines. Le système d'usage des sols basé sur les arbres, où le produit définitif n'est pas associé au système alimentaire humain / fourrager pour le bétail, semble une option très prometteuse et digne de crédit pour l'élimination sûre des effluents industriels. Il semble tout à fait pertinent de réserver certains terrains en friche ou abandonnés, situés dans ou près de grandes villes, de planter d'arbres afin de créer des ceintures vertes irriguées par des effluents industriels. Il est urgent de mener des recherches pour identifier des arbres tolérantes à des stress spécifiques ou multiples liés aux métaux lourds ainsi qu'à divers régimes de submersion, tout en étudiant les géométries de plantation, les techniques de plantation et les pratiques de gestion appropriées. Cet article présentera une stratégie en trois phases pour une utilisation sûre de ces eaux.

Il est nécessaire d'élaborer une stratégie pour séparer les eaux usées domestiques des effluents industriels chargés de métaux lourds et de substances toxiques. Les eaux usées domestiques, composées principalement d'excréments humains et du bétail, peuvent être utilisées dans l'agriculture en étant mélangées avec l'eau douce. Cependant, une surveillance annuelle étroite de ces eaux sera nécessaire pour vérifier le lessivage des nitrates dans le sol, les eaux souterraines et la partie comestible des cultures. Une surveillance étroite de l'accumulation des micro-organismes en général et de *l'E-coli* en particulier doit être exercée.

Dans les cas où les égouts domestiques et les effluents industriels sont évacués en un point, cette eau ne doit pas être utilisée pour irriguer les cultures comestibles. Une partie de ces effluents d'égouts peut être utilisée pour créer des ceintures vertes en utilisant des arbres à haute transpiration tels que l'eucalyptus, le dalbergia, le bambou, la pongamia, les casuarinas, le chêne argenté, etc. Dans ce cas, les arbres sont élevés sur des digues d'environ un mètre de hauteur et un mètre de largeur. Les effluents des égouts sont déversés dans les sillons entre les rayons d'arbres. Il peut également être utile pour la réhabilitation des terrains en friche inutilisés en périphérie des grandes villes et aussi le long des routes, des voies ferrées et des canaux. Cependant, une surveillance attentive de la pollution des sols, des eaux souterraines et de l'air sera nécessaire pour intégrer des mesures correctives appropriées en temps utile.

La mise en place des stations d'épuration sera le moyen le plus efficace et le plus pratique de traiter les eaux usées.

Mots-clés : Eaux usées; Agroforesterie; Eaux usées domestiques; Effluents industriels; Métaux lourds; Santé humaine.

SOCIO-TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF NON-CONVENTIONAL DESALINATION SYSTEMS IN COASTAL THAILAND: A STRATEGIC RESPONSE TO WATER SCARCITY CHALLENGES

ANALYSE SOCIO-TECHNIQUE ET ECONOMIQUE DES SYSTEMES DE DESSALEMENT NON CONVENTIONNELS DANS LES ZONES COTIERES DE THAÏLANDE: UNE REPONSE STRATEGIQUE AUX DEFIS LIES A LA PENURIE D'EAU

Aksara Putthividhya[1], Somkiat Prajamwong, and Sasin Jirasirirak

ABSTRACT

Thailand's dominant agricultural water consumption, rapid urbanization, industrial growth, and tourism-driven development are placing pressure on its blue- and green-freshwater resources. At the same time, climate variability and seasonal droughts are making traditional water sources less reliable. In this changing climate, increasing water use efficiency and desalination are no longer optional – these technologies are reshaping how the country secures water for the future and becoming central to sustainable water management. Current trend in shifting from linear water use to circular systems marks a significant water evolution for longer-term sustainability in Thailand's water management, starting with modern industrial water sector. Seawater desalination employing various salt removal technologies (thermal, membrane, etc.) is gaining interests in Thailand as a strategic response to water stress in tourism hubs, industrial corridors, and urban developments. While re-using/up-cycling addresses internal water efficiency, desalination provides an external source of supply—particularly for coastal regions and island communities. Thus, the socio-technical and economic analysis of seawater desalination project is conducted to address water scarcity challenges. Various desalination technological performance is investigated and compared using multi criteria decision analysis based on preliminary feed (sea) water characteristics. Since, the financial and operational sustainability of desalination systems in coastal Thailand is shaped by a complex interplay of socio-economic, technical, and environmental factors, findings from this study suggest that integration of desalination to support regional productivity and economic development requires balancing technological, economic, and environmental trade-offs. Modern practical desalination systems for Thailand should be readily designed for (i) high energy efficiency through optimized performance of reverse osmosis (RO) systems; (ii) integration with renewable energy sources; (iii) blending with reclaimed water to reduce overall treatment costs; (iv) water trading mechanisms among water sectors (e.g., trading water between agricultural sector and industrial sector) for economic viability; and (v) government subsidies, shared water infrastructure (e.g., direct pipelines from desalination plants to users), public-private partnerships investment can lead to cost effectiveness for desalination systems. Further analysis provides macro- and micro-level insights to inform policy and strengthen the sustainability of desalination systems in climate-vulnerable coastal regions of Thailand. By combining desalination with reclaimed water, Thailand can build a diversified and resilient water portfolio along the EEC coastline. Future research should examine the environmental impacts of brine disposal and the feasibility of zero-waste desalination systems and integrating remineralization technologies to address health risks from demineralized water. This study offers actionable insights for policymakers and practitioners to strengthen resilient, equitable,

1 Chulalongkorn University, Water Resources Engineering, Bangkok, Thailand

and sustainable water supply systems in climate-vulnerable coastal regions, contributing to Sustainable Development Goal 6 (target 6.1). By leveraging innovation, policy support, and international cooperation, desalination can become a sustainable and transformative solution for water security.

Keywords: Socio-Technical and Economic Analysis; desalination technological performance; Seawater desalination; sustainable water management; economic development.

RESUME

La prédominance de la consommation d'eau agricole en Thaïlande, conjuguée à l'urbanisation rapide, à la croissance industrielle et au développement dominé par le tourisme exerce une pression sur ses ressources en eau douce bleue et verte. Parallèlement, la variabilité du climat et les sécheresses saisonnières rendent les sources d'eau traditionnelles moins fiables. Dans ce contexte de changement climatique, l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et le recours au dessalement ne sont plus facultatifs – ces technologies transforment la façon dont le pays assure l'approvisionnement en eau pour l'avenir et deviennent essentielles à une gestion durable de l'eau. La tendance actuelle de passage d'une utilisation linéaire de l'eau à des systèmes circulaires marque une évolution significative de l'eau pour la durabilité à long terme de la gestion de l'eau en Thaïlande, à commencer par le secteur industriel moderne de l'eau. Le dessalement de l'eau de mer utilisant diverses technologies d'élimination du sel (thermique, membrane, etc.) suscite un intérêt croissant en Thaïlande en tant que réponse stratégique au stress hydrique dans les centres touristiques, les couloirs industriels et les développements urbains. Bien que la réutilisation et le recyclage des eaux répondent à une question d'efficacité interne, le dessalement constitue une source externe d'approvisionnement — en particulier dans les régions côtières et les communautés insulaires. Ainsi, l'analyse socio-technique et économique du projet de dessalement d'eau de mer est menée pour relever les défis liés à la pénurie d'eau. Diverses performances technologiques de dessalement sont étudiées et comparées à l'aide d'une analyse décisionnelle multicritères basée sur les caractéristiques préliminaires de l'eau de mer. Puisque la durabilité financière et opérationnelle des systèmes de dessalement dans les zones côtières thaïlandaises est façonnée par une interaction complexe de facteurs socio-économiques, techniques et environnementaux, les résultats de cette étude suggèrent que l'intégration du dessalement pour soutenir la productivité régionale et le développement économique nécessite de rechercher un équilibre entre les compromis technologiques, économiques et environnementaux. Les systèmes de dessalement modernes et pratiques pour la Thaïlande devraient être facilement conçus pour garantir (i) une efficacité énergétique élevée grâce à des performances optimisées des systèmes d'osmose inverse (RO); (ii) une intégration avec des sources d'énergie renouvelables; (iii) un mélange avec l'eau mise en valeur afin de réduire les coûts globaux de traitement; (iv) des mécanismes d'échange d'eau entre les secteurs de l'eau (par exemple, l'échange d'eau entre le secteur agricole et le secteur industriel) pour assurer la viabilité économique; et (v) des subventions gouvernementales, une infrastructure d'eau partagée (par exemple, des pipelines directs reliant les usines de dessalement aux utilisateurs), des investissements dans des partenariats public-privé peuvent conduire à une rentabilité des systèmes de dessalement. Une analyse plus approfondie apporte des perspectives aux niveaux macro et micro pour éclairer les politiques et renforcer la durabilité des systèmes de dessalement dans les régions côtières vulnérables au climat de la Thaïlande. En combinant le dessalement avec l'eau mise en valeur, la Thaïlande peut créer un portefeuille d'eau diversifié et résistant le long du littoral de la zone économique orientale (EEC). Les recherches menées à l'avenir devraient examiner les impacts environnementaux de l'élimination des eaux salées et la faisabilité des systèmes de dessalement avec zéro déchet, ainsi que l'intégration des technologies

de reminéralisation pour répondre aux risques sanitaires liés à l'eau déminéralisée. Cette étude offre des perspectives concrètes aux décideurs et aux praticiens afin de renforcer les systèmes d'approvisionnement en eau résistants, équitables et durables dans les régions côtières vulnérables au climat, contribuant ainsi à l'Objectif de développement durable 6 (cible 6.1). En optimisant l'innovation, le soutien politique et la coopération internationale, le dessalement peut devenir une solution durable et transformatrice pour assurer la sécurité de l'eau.

Mots-clés : Analyse socio-technique et économique; Performance technologique de dessalement; Dessalement d'eau de mer; Gestion durable de l'eau; Développement économique.

A MULTI-SCALAR FRAMEWORK FOR AGRICULTURAL DESALINATION IN THE CHTOUKA-AIT BAHA WEF-NEXUS

UN CADRE À L'ÉCHELLE MULTIPLE POUR LE DESSALEMENT À DES FINS AGRICOLES DANS LE LIEN ENTRE EAU-ALIMENTATION-ENVIRONNEMENT DE CHTOUKA-AIT BAHA

Amouch S[1]. Akhssas A[1]. Talha S[1]. Besbou O[2]. Ouaniam A[3], and Haddoudi S[4]

ABSTRACT

In the Souss-Massa basin of southwestern Morocco—a critical horticultural center contributing 9% to the national agricultural GDP—systemic overexploitation has resulted in an annual groundwater deficit of 270 million m³. This study introduces a comprehensive multi-scalar framework to evaluate the structural transition from historical phreatic water to sustainable, non-conventional agricultural desalination. By integrating the Macro-scale (Water-Energy-Food-Ecosystems [WEF] Nexus and regional hyper-drought trends), the Meso-scale (Infrastructural network reliability and Public-Private Partnership [PPP] economic assessment), and the Micro-scale (Qualitative nutrient precision, soil physics, and circular brine valorization). It is a framework that reanalyses water security by proving that agricultural survival in arid regions requires moving beyond localized field interventions toward a cohesive, multi-scalar paradigm. By decoupling vital food systems from climate volatility, this model alters the agricultural desalination narrative from municipal "absolute purity" to an optimized, "fit-for-purpose" qualitative model. Furthermore, the integration of a circular bioeconomy reclaims the environmental liability of reverse osmosis brine, converting a hazardous waste stream into a productive engine for aquaculture and halophytic biomass production. As groundwater reserves reach global bankruptcy, this multi-scalar blueprint bridges the critical gaps between macro policy, infrastructure reliability, and micro-level soil chemistry. It stands as an essential, scalable global benchmark for engineering long-term climate resilience and securing national water sovereignty.

Keywords: Agricultural desalination; annual groundwater deficit; water security; biomass production.

RESUME

Dans le bassin du Souss-Massa, situé au sud-ouest du Maroc — un centre horticole essentiel contribuant à l'ordre de 9% au PIB agricole national — la surexploitation systémique a donné lieu à un déficit annuel des eaux souterraines de 270 millions de m³. Cette étude présente un cadre global à l'échelle multiple visant à évaluer la transition structurelle de l'utilisation historique des eaux phréatiques au recours à un dessalement agricole durable et non conventionnel. Il intègre l'échelle macro (lien entre eau-énergie-alimentation-écosystèmes [WEF] et tendances régionales en matière d'hyper-sécheresse), l'échelle méso (fiabilité du réseau d'infrastructures et évaluation économique des partenariats public-privé [PPP])

1 Mohammadia School of Engineers Mohmmed V University in Rabat, mineral engineering, Rabat, Morocco, Civil Engineering and Environment Laboratory. Email: saidmch@gmail.com Civil Engineering and Environment Laboratory

2 (LGCE); Materials, Water and Environment Team; Higher School of Technology of Salé; Mohammed V University in Rabat, Morocco, Salé, Morocco,Oualid.besbou@gmail.com

3 Laboratory of Applied Geology and Geo-Environment Faculty of Sciences Ibn Zohr University

4 Master in applied and environmental Geology, Rabat, Morocco, Email: haddoudisaadia@gmail.com

et l'échelle micro (précision qualitative des nutriments, physique des sols et valorisation circulaire des eaux salées). Il s'agit d'un cadre qui analyse de nouveau la sécurité hydrique en démontrant que la survie de l'agriculture dans les régions arides nécessite d'aller au-delà des interventions localisées sur le terrain vers un paradigme cohérent à l'échelle multiple. En dissociant les systèmes alimentaires vitaux de la volatilité climatique, ce modèle réoriente le discours sur le dessalement agricole, passant d'une «pureté absolue» municipale à un modèle qualitatif optimisé et «adapté à l'usage». De plus, l'intégration d'une bioéconomie circulaire reprend la contrainte environnementale liée à l'eau salée issue de l'osmose inverse, en transformant un flux de déchets dangereux en une force productive pour l'aquaculture et la production de biomasse halophyte. Alors que les réserves d'eaux souterraines arrivent à un état de faillite à l'échelle mondiale, ce plan d'action à l'échelle multiple comble les lacunes critiques entre la politique macroéconomique, la fiabilité des infrastructures et la chimie des sols au niveau micro. Il constitue une référence mondiale essentielle et évolutive pour garantir la résistance au climat à long terme et assurer la souveraineté nationale en matière d'eau.

Mots-clés : Dessalement agricole; Déficit annuel des eaux souterraines; Sécurité hydrique; Production de biomasse.

QUESTION 66: IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE HOW CAN IRRIGATION AND DRAINAGE CONTRIBUTE TO THE AGRO-ECOLOGICAL TRANSITION?

GENERAL REPORTER Q.66

Dr. Vinay Nangia (ICARDA)



Dr. Vinay Nangia is a Principal Scientist and Research Team Leader - Soil, Water, and Agronomy at ICARDA, a professor at Tottori University in Japan, a global fellow at the Daugherty water for Food Institute at University of Nebraska (USA) and an adjunct faculty at Texas A&M University (USA). Dr. Nangia has a Ph.D. degree in Water Resources Management and two master's degrees - first in Biosystems & Agricultural Engineering and the second in Geographic Information Science – all from the University of Minnesota, USA. His leadership and team building skills have helped solve complex challenges to water resource management posed by climate change. His work has been supported by US$ 40 million of grant support from various donors such as the AFESD, CFC, FAO, GIZ, IFAD, OFID, USAID World Bank and bilateral funding from governments of China, Egypt, GCC countries, Iran, India and Morocco. Dr. Nangia has published over 300 publications including over 125 peer reviewed scientific articles in high impact journals and 40 book chapter/conference proceedings. Over the years, he has trained more than 50 graduate students, post-doctoral fellows and visiting scientists from all over the world. He is recipient of several scientific awards and honours. He serves on FAO WASAG, UNCCD IWG on Drought, UNFCCC focal point for ICARDA and other high-level expert bodies. Dr. Nangia is an advisory board member of GIWEH (a Geneva-based water think tank), E-mail: <v.nangia@cgiar.org>.

QUESTION 67: INNOVATIVE TECHNOLOGY AND PRACTICES FOR INCREASING WATER USE EFFICIENCY. IRRIGATION MANAGEMENT AND SERVICES REMOTE SENSING IRRIGATION EQUIPMENT WHERE DO WE STAND?

GENERAL REPORTER Q.67

Mr. Maher Salman (FAO)



Mr. Maher Salman has nearly 30 years of experience in international assistance and technical and policy development in agricultural water resource management that geographically extends to all regions.

Currently, he is the Senior Land and Water Officer and the Team Lead of Agricultural Water Management at the UN Food and Agriculture Organization (FAO), leading programs and engagements on irrigation modernization, crop water productivity, water use efficiency, transboundary water management, water policy, natural resource-driven fragility, and integrated drought management. He leads the transitioning into the digital era of FAO's tools and norms in Agricultural Water Management.

Mr. Salman also acts as the Coordinator of Adaptation Fund at FAO as well as the focal point to a number of organizations, including ICID, UNCCD, and multilateral development banks.

He received his graduate studies from Syria and the UK in civil and water engineering, E-mail: <maher.salman@fao.org>.

QUESTION 68: NON-CONVENTIONAL WATER (REUSE. DESALINATION): CAN WE REALLY LOOSEN THE GRIP ON THE RESOURCE AND FOR WHAT USES?

GENERAL REPORTER Q.68

Prof. Juan Antonio Rodríguez Díaz (Spain)



Juan Antonio Rodríguez Díaz is a Full Professor of Hydraulic Engineering at University of Córdoba. He has held a PhD in Agricultural Engineering since 2004, and his doctoral thesis focused on the use of benchmarking techniques and the development of management indicators for the sustainable use of resources in Spanish irrigated agriculture. His current research focuses on optimizing the water– energy nexus in irrigation networks, the use of renewable energy for irrigation water supply, the application of artificial intelligence and big data to water management, and the adoption of precision irrigation systems.

He has led and participated in more than 50 research and technology-transfer projects, with a particular impact on water–energy optimization, the integration of renewable energy in irrigated agriculture, and the development of innovative technological solutions such as applications for efficient water management. He has authored over 100 publications in scientific journals, as well as 60 additional outputs including book chapters, outreach magazines, and technical reports, and has contributed extensively to national and international conferences.

Work on Reclaimed Water Reuse for Agricultural Irrigation (Water Reuse)

He is the Principal Investigator at the University of Córdoba for the I-ReWater project, which focuses on the use of reclaimed water for agricultural irrigation in the SUDOE region. Within this project, UCO leads pilot actions in woody and horticultural crops and collaborates on developing a digital platform/decision-support system to improve decision-making and fertigation management when using reclaimed water.

Also in line with the efficient and sustainable use of reclaimed water for irrigation, he has been the principal investigator at the University of Córdoba of the projects Reutivar (https://reutivar.eu/), Reutivar 2.0 (https://reutivar2.eu/), and Hagro (https://hagro.es/). These projects belong to the call for Operational Groups (OG) within the CAP Strategic Plan (PEPAC) and are funded through the European Agricultural Fund for Rural Development (EAFRD). OG projects are associations of rural stakeholders with diverse profiles (farmers, stakeholders, private companies, research centers, etc.) that temporarily join forces to develop an innovative project aimed at solving a problem or taking advantage of an opportunity in the agri-food and forestry sector.

In addition, he has co-authored applied research and tools aimed at precision fertigation and nutrient management under reclaimed-water irrigation, particularly in olive orchards. This includes an open-source application designed to support farmers and technicians in optimizing irrigation and fertilization when irrigating with reclaimed water.

His work also addresses how reclaimed water quality can change along pressurised irrigation distribution networks, affecting nutrient forms and fertilization needs. He co-authored studies on the spatio-temporal variability of nitrogen in a reclaimed-water irrigation network for olive trees, highlighting nitrification processes from pumping stations to farms and implications for fertilizer requirements.

More recently, he is co-author of NITRINET, a predictive model developed to simulate nitrification processes in pressurised irrigation networks fed with reclaimed water, applied to a real irrigation district case study in southern Spain. This line of work supports more accurate estimation of nutrient loads delivered to farms and better fertigation planning under reclaimed-water reuse schemes.

Among his most important achievements is receiving the WatSave Award from the International Commission on Irrigation and Drainage in 2004, in recognition of his contributions to water saving and efficient water use. He was a Ramón y Cajal Programme researcher (2008 call) and was also one of the guarantor researchers supporting the University of Córdoba's Department of Agronomy in obtaining the María de Maeztu Unit of Excellence distinction. He has supervised more than 10 PhD theses, E-mail: <ma2rodij@uco.es>.

International Panel of Experts / Groupe d'experts international

QUESTION 66: IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE HOW CAN IRRIGATION AND DRAINAGE CONTRIBUTE TO THE AGRO-ECOLOGICAL TRANSITION?

Delphine Leenhardt (France) [INRAE UMR G EAU – Research Director]



Delphine Leenhardt is an INRAE Research Director at UMR G EAU in Montpellier. After completing a PhD in soil science at INRA Montpellier (1991), she joined UMR AGIR in Toulouse in 1994, where she conducted research in agronomic engineering focused on the quantitative management of water at the territorial scale. She mobilised and developed agronomic knowledge, methods and tools to adapt them to the concerns of water managers and to support their decision making. Her work, often carried out at the interface of biotech, biophysics and the social sciences and humanities, aims to study and take into account the relationships between agricultural land use (cropping systems) and water resources, with the overarching goal of "spatial water management" based on the hypothesis that land use practices can be regulated to achieve water management objectives. Her research covers the design and evaluation of scenarios by linking territorial modelling, modelling of biodecisional processes at the territorial level, participatory approaches and evaluation methods. Since joining UMR G EAU in 2021, she has coordinated projects related to the agro ecological transition of irrigated territories.

She has held several responsibilities within INRAE's ACT department: member of the scientific council, "water" correspondent and then Deputy Head of Department. She co leads the inter departmental network "agricultural systems and water". She coordinated a publication on water in agricultural environments (QUAE, 2020). She is also a member of the Scientific Council of the Adour Garonne Water Agency. Email : <delphine.burger-leenhardt@inrae.fr>

Prof. Fuqiang Tian (China)



Prof. Fuqiang Tian is a tenured full professor in the Department of Hydraulic Engineering at Tsinghua University and Deputy Director of the State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering. He also directs the Center for International Transboundary Water and Eco-Security (CITWES). His research focuses on hydrological processes and prediction, agricultural water management, and transboundary river governance under climate and environmental change, with particular emphasis on arid and semi-arid regions, high-mountain catchments, and international river basins. He has proposed new runoff-generation mechanisms for semi-humid and semi-arid regions, developed tracer-aided hydrological models, advanced intelligent flood monitoring and forecasting technologies, established integrated water-salt regulation schemes for irrigated oases, and contributed to cooperative frameworks for transboundary river management.

Prof. Tian has led more than 20 national research projects and over 30 consulting projects for government agencies and international institutions, including China's Ministry of Water Resources, Ministry of Foreign Affairs, and the World Bank. He has published more than 300 peer-reviewed papers in journals including Nature, Nature Climate Change, Nature Communications, Water Resources Research, and Hydrology and Earth System Sciences; his work has received more than 12,000 citations. His honors include the ICID WatSave Technology Award and first-prize awards from the Da Yu Water Science and Technology Award and China's Ministry of Education. He currently serves as Vice President of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID) and Vice President of the International Association of Hydrological Sciences (IAHS), as well as Editor of Hydrology and Earth System Sciences and Associate Editor of Water Resources Research. E-mail: <tianfq@tsinghua.edu.cn>.

Dr. Keigo Noda (Japan)



Dr. Keigo Noda is an Associate Professor in the Department of Biological and Environmental Engineering at The University of Tokyo. He holds a Ph.D. in Agricultural Water Management from The University of Tokyo and specializes in agricultural water management, hydrology, and data-driven smart irrigation. In addition to his research, Dr. Noda is an active member of the academic community, serving as an Associate Editor for Irrigation and Drainage and an Editor for Paddy and Water Environment. He also holds key leadership positions, including Board Member of the Japan Society of Hydrology and Water Resources, and Councilor for both the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering and the Japan Rainwater Catchment Systems Association. He also contributes to global water management efforts as a member of JNCID and the International Network for Water and Ecosystem in Paddy Fields (INWEPF). E-mail: <nodakeigo@g.ecc.u-tokyo.ac.jp>.

Dr. Vasudha Sharma (India)



Dr. Vasudha Sharma is an Assistant Professor and Extension Irrigation Specialist in the Department of Soil, Water, and Climate at the University of Minnesota, USA, and serves as Associate Director of the Precision Agriculture Center. Her research and extension program focuses on precision irrigation, agricultural water management, remote sensing, soil moisture monitoring, and digital agriculture to improve water and nutrient use efficiency in cropping systems.

Dr. Sharma has over a decade of experience in irrigation engineering, precision agriculture, and agricultural water management. She works closely with producers, industry, and government agencies to develop and evaluate innovative irrigation and nutrient management strategies. She currently serves as Vice Chair of the American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) NRES-24 Irrigation Group and has previously served as Chair of the ASABE NRES-244 Irrigation Management Committee and the American Society of Agronomy (ASA) Evapotranspiration Measurement and Modeling Community. E-mail : <vasudha@umn.edu>.

Dr. Vaishali Sharda (India)

Dr. Vaishali Sharda is an Associate Professor in the Carl and Melinda Helwig Department of Biological and Agricultural Engineering at Kansas State University, where she has been on faculty since 2019. Dr. Sharda holds a Ph.D. in Biosystems Engineering from Auburn University and completed postdoctoral research at Washington State University's AgWeather Net and the Nebraska Water Center at the University of Nebraska-Lincoln. She began her career as a Research Fellow at Punjab Agricultural University in India, where she also earned her B.Tech. and M.Tech. degrees in Agricultural Engineering.



Dr. Sharda's research centers on agricultural water sustainability and climate resilience, with a particular focus on the Ogallala Aquifer region of the U.S. Great Plains. She leads a research program integrating remote sensing, machine learning, and crop simulation modeling to address water scarcity challenges facing irrigated and rainfed agriculture. She currently serves as PI on a $6 million NSF EPSCoR-funded project (BioWRAP) developing spray-on biodegradable bioplastics for sustainable crop production, and holds a National Science Foundation CAREER Award supporting her work on climate resilience in agroecosystems. Over the past five years, she has secured over $6.7 million in funding as PI and contributed to research totaling nearly $28 million.

Dr. Sharda has authored 20 peer-reviewed journal articles since 2020 and mentors an active research group of PhD and MS students, several of whom have received national research awards. She teaches courses in hydrology, water management, and irrigation systems, and has received the Carl R. Ice College of Engineering Outstanding Assistant Professor Award (2023) and the Steve Hsu Keystone Research Faculty Scholar honor (2025). She is also Kansas State University Outstanding Scholar. Dr. Sharda is active in the American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) and regularly serves as a grant panelist for NSF and USDA. E-mail: <vsharda@ksu.edu>.

Dr. Meetpal Singh Kukal (India)



Dr. Meetpal Singh Kukal is an Assistant Professor of Hydrologic Science and Water Management at University of Idaho-Boise. His research and education programs focus on agricultural hydrology and water accounting, evapotranspiration science, irrigation science and engineering, pore to continental-scale soil plant atmospheric exchanges, and hydroclimatic variability and change. He employs ground observations including high frequency biometeorological measurements, satellite remote sensing, and physically-based and data-driven models to quantify and understand response of water budgets to global change in both managed and natural landscapes. His scientific products are used to improve operational water management at the regional level as well as field-to-farm level grower-led water management.

Dr. Kukal is the leader of the Evapotranspiration Measurement and Modeling Community in Agronomy Society of America and Secretary of the Evapotranspiration in Irrigation and Hydrology Committee in American Society of Civil Engineers. He is also an Associate Editor for American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) journals and Agronomy Journal. E-mail: <mkukal@uidaho.edu>.

Prof. Surat Irmak (USA)



Professor Irmak received his Ph.D. degree from the Agricultural and Biological Engineering Department at the University of Florida with the emphasis on Land and Water Resources Engineering. After joining University of Nebraska-Lincoln in 2004 as an Assistant professor, he received his Full Professorship in 2012 and Harold W. Eberhard Distinguished Professorship in 2013. He joined Penn State on July 1, 2021, to serve as a Professor and Department Head of Agricultural and Biological Engineering. By his peers, he is considered as a worldwide renowned scientist/researcher and passionate educator and a servant leader in soil and water resources engineering who is nationally and internationally recognized for his dedication of learning through research and science and sharing his knowledge and teaching others, including through his large-scale impactful research and signature Extension/outreach programs. He has made significant contributions and exhibited exemplary accomplishments in soil and water resources and irrigation engineering, soil and water conservation, agricultural water management, evapotranspiration, impact of climate change on water resources and agricultural productivity, and environmental biophysics. Professor Irmak has made contributions to science, engineering and education through measurement and modeling of surface energy balance variables, including evapotranspiration, evaporation and transpiration, for various agro-ecosystems; climate science; coupling soil, water and microclimate and plant stomatal response relationships to develop more robust evaporative losses estimates; developing extensive crop response to irrigation and evapotranspiration functions for various cropping systems under different irrigation, soil and crop management practices.

The products of Professor Irmak's research programs and projects are extensively used in the regional, national and international platforms. Some of his research products have been implemented into the USDA-NRCS and EPA national incentive programs and into operational handbooks. He is regarded as a reputable authority in his discipline and made contributions

to the advancement of agricultural science and engineering through extensive research and education/teaching and implementing scientifically based management tools in production fields to enhance production efficiency and conservation of natural resources. Some of his innovative research and education activities in soil and water resources and agricultural engineering have been used by the USDA Undersecretary for Research, Education, and Economics as an example of signature programs in the U.S. Congressional Discussions at U.S. Congress on continuation of Hatch and Smith Lever Federal Support Funds for Research and Extension in Land Grant Universities. Professor Irmak also had the honor of delivering two presentations at the US Congress (one hour at the US Senate and one hour at the US House of Representatives) on Capitol Hill on "Future Potential Challenges of US Agriculture," "Technology Implementation in Agriculture for Enhancing Crop Water Productivity," and "Climate Change Impacts on US Agricultural Productivity and Water Resources."

Irmak serves in numerous leadership positions. He served in over 15 national and international professional and scientific committees as a leader and a member. Because of his exemplary research and scientific accomplishments, Professor Irmak was selected to serve as a scientific and technical member of the National Water Resources Working Group, which developed a report titled "National Initiative on the Improvement of U.S. Water Security" that was approved by the National Association of State Universities and Land-Grant Colleges Research Directors. Irmak was selected to serve as a scientific expert in the U.S. Supreme Court litigation case between two states related to soil and water resources, agricultural production and climate interactions issues.

Professor Irmak has mentored over 67 Ph.D. and MS students as an advisor (30) and committee member (35); numerous national and international intern students and undergraduate students (25), and numerous post-docs and research professors (13) and research technologists (4). A significant number (16) of his former graduate students are now faculty members, and all of his former students and post-docs are employed by state and federal agencies or private industry. He encourages his students and post-docs for critical and theoretical thinking in terms of developing research methodologies and practical solutions to solve real-world problems and teach them to others. Throughout his career, Professor Irmak recruited and retrained students from underrepresented minority groups, including Native Americans.

Professor Irmak has been often recognized by his peers and various professional institutions and has been fortunate to have received an impressive number of national and international (71) and local and regional (38) awards and recognitions for his excellence in research accomplishments. , including: American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) John Deere Gold Medal Award (highest honor in soil-water resources engineering and Professor Irmak is the youngest recipient of the award); ASABE Heermann Sprinkler Irrigation Award (youngest recipient); ASABE ADS/Hancor Soil and Water Engineering Award; ASABE Netafim Award for Advancement in Microirrigation Award; ASABE Young Extension Professional Award; ASABE New Holland Young Researcher Award (the first and only researcher to receive both awards in the ASABE history since 1907); NASA Certificate of Service Appreciation for contribution and outstanding support to the Advanced Information Systems Technology Program in the NASA Earth Science Technology Office; USDA-NIFA National Water and Energy Conservation Award; NE-ASABE Engineer of the Year Award; American Society of Civil Engineers-Environmental and Water Resources Institute Excellence in Service Award; numerous Research and Creative Activity Awards; and numerous Teaching Awards; and a significant number of best and honorable publication awards.

Professor Irmak has an impressive record of publications/scholarly output with over 400 publications in prestigious and high impact journals. His detailed publications record include almost 300 refereed journal articles (287 published; 1 in press; 9 in review); 5 book chapters; 1 book; 60 technical and scientific conference proceedings; 63 peer-reviewed Extension/

outreach/education publications; 2 soil and water resources/irrigation engineering smart phone apps; 45 regional/national popular magazine articles; over 150 technical research reports; numerous TV and radio interviews on soil and water resources engineering; and unprecedented over 500 technical/scientific/educational presentations (over 200 invited keynotes) in local, regional, national, and international conferences]. He has obtained over $13+ million external grants to support his research and education programs. His scholarly productivities have been heavily cited by other scientists and researchers with h Index = 71; i10 Index = 236 with 17,243 citations; a total of 67,000 downloads with 5,860 metadata page hits by 5,343 national and international institutions in 181 countries with 3,343 referrers for only those listed in Google Scholar with 15,858 citations. E-mail: <sfi5068@psu.edu>

Eng. Rafat Nael AbdulGhani (Iraq)



Eng. Rafat Nael AbdulGhani Al-Intaki is a Senior Chief Engineer at the Iraqi Ministry of Water Resources with more than 20 years of experience in irrigation engineering, water resources management, remote sensing, and Geographic Information Systems (GIS). He holds a Higher Diploma in Remote Sensing and GIS from the University of Technology and a Bachelor's Degree in Irrigation and Drainage Engineering from the University of Baghdad.

He has extensive expertise in satellite-based monitoring of dam reservoirs, floods, agricultural irrigation operations, and water resources management. He has also led the establishment of Water Users Associations (WUAs) in Iraq and contributed to improving irrigation efficiency and sustainable agricultural water management.

Eng. Rafat serves as Honorary Vice President of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID) and is an active member of the Iraqi National Committee on Irrigation and Drainage (IRQCID). He served as Chair of ICID's Working Group on Water Saving in Irrigated Areas (WG-WATS) (2020–2023), He currently serves as a member of the ICID Working Group on Use of Non-Conventional Water Resources for Irrigation (WG-NCWRI), contributing to international initiatives on sustainable water resource management.

He has represented Iraq in numerous international congresses, technical panels, and working groups, and has authored and presented several research papers on irrigation management, remote sensing applications, and water resources management. He has also delivered professional training programs and technical lectures in GIS, remote sensing, and irrigation modernization. E-mail: <rafatnael@yahoo.com>.

István, Szamosvári (Hungary) – Assistant head of Division for Drainage and Irrigation, General Directorate of Water Management



MSc. Environmental Engineer; member of the Hungarian Chamber of Engineers (Reg. nr.: 07-01522) and Hungarian Association of Hydrology.

He worked in environmental and water management (both governmental and private) sector throughout his professional career, and gathered experience at legal aspects of environmental protection, environmental consultancy and water management. He participated many projects concerning protection of water and restoration of natural wetland habitats.

He has extensive experience in protection of waters, and territorial water management and water engineering

The main focus of his work is drainage and territorial/lowland water management, but has a good insight in irrigation too. Focuses on enhancing of water supplies for agriculture and ecology. The cornerstones of his work are the “Old-Drava ecological water supply system” and the “Danube-Tisza Sand-ridge water supply system”, but also works on other projects considering water retention and water arrangement. Had a role in outlining and execution of “Drought Mitigation Action Plan” in 2025 and still ongoing “Water to landscape!” project. Also a Phd. of Universíty of Public Service student in field of adaptive water management. E-mail: <szamosvari.istvan@ovf.hu>.

Dr. Giulio Castelli (Italy)



Dr. Giulio Castelli is an environmental engineer and Assistant Professor in Agricultural Hydraulics and Watershed Protection at the University of Florence. He holds a PhD with honors in Sustainable Management of Agricultural Forestry and Food Resources from the University of Florence (2018). His research topics include water harvesting, water resource management, participatory approaches, and knowledge co-creation.

He is part of multiple research projects spanning the Mediterranean, Sub-Saharan Africa, and Central and South America. Throughout his career, he has collaborated with global organizations, including the Italian Agency for Development Cooperation (AICS), the World Bank, Mercy Corps, and the FAO. Among other roles, he is a member of the Working Group on Non-conventional Water Resources and Environment Protection (WG-NWREP) of the International Commission for Irrigation and Drainage (ICID). Scientific webpage: https://waridotblog.com/ and E-mail: <giulio.castelli@unifi.it>.

QUESTION 67: INNOVATIVE TECHNOLOGY AND PRACTICES FOR INCREASING WATER USE EFFICIENCY: IRRIGATION MANAGEMENT AND SERVICES, REMOTE SENSING, IRRIGATION EQUIPMENT,... WHERE DO WE STAND?

Prof. Burno Cheviron (France)



Bruno Cheviron is a physicist who obtained a PhD in geophysics from the University of Paris in 2004 and a specialist in modelling environmental flows (water, heat, solutes, sediments). He joined INRAE and the Joint Research Unit G-EAU in Montpellier in 2012 to work on irrigation and associated biophysical processes, from the elementary scale to the plot scale, then was appointed Research Director in 2023. He oversees the development of the Optirrig model (generation, analysis and optimisation of crop irrigation scenarios), leads the OPTIMISTE team (Optimisation of Irrigation Management and Technologies, Minimisation of InputS, Transfers in the Environment), co-leads the “Agricultural Systems and Water” scientific network of INRAE and sits on the Scientific Council of the Rhône-Mediterranean-Corsica

Water Agency. The common thread running through his work is the improvement of irrigation decision-making rules to identify better resource management strategies, either informed by metrology or modelling of the soil-plant-atmosphere continuum, with associated uncertainties. Applications at local scales cover conventional contexts as well as innovative ones tackled with technical entries, e.g. agri-photovoltaics, urban heat islands, optimal control theories, coupling of irrigation and soil erosion models, or data assimilation. Territorial scales are rather addressed by systemic views of the direct and indirect levers for action, in regional water management projects, via the integration of hydrological and agronomic models, aiming at supporting public policy. His most recent contributions focus on the identification of a proper and contextual definition of "water need" as jointly governed by the selected crop, local soil properties possibly acted upon, local climate, co-constructed yield objectives, well-chosen multi-purpose irrigation strategies, and use constraints of regulatory and operational nature. E-mail: <bruno.cheviron@inrae.fr>.

Dr. Zhen Wang (China)



Dr. Zhen Wang is a professor at the Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR), and also serves as the Deputy Director of the National Center for Quality Inspection and Testing of Irrigation and Drainage Equipment. He has over 12 years of experience in agricultural water engineering, with a primary focus on pressurized irrigation technologies, agricultural water and nutrient management, and the safe utilization of reclaimed water for drip fertigation systems.

Dr. Wang possesses a distinctive integration of theoretical research and practical engineering application. Early in his career, he conducted doctoral and postdoctoral research on drip irrigation uniformity, nitrate leaching, and soil water-solute transport at IWHR, establishing a strong academic foundation. Over the past decade, he has systematically led a research team to address the critical technical bottlenecks in large-scale drip fertigation—namely performance evaluation, system enhancement, and multi-element regulation. His innovations include a multi-scale, multi-dimensional performance evaluation method using genetic algorithms, clogging control technologies (chlorine/acid injection with optimized parameters), and a three-stage fertigation mode (“pre-wetting – sequential fertilization – redistribution control”) that significantly improves water and fertilizer use efficiency.

Currently, Dr. Wang serves as Associate Editor and Editorial Board Secretary of Irrigation and Drainage (the official journal of ICID), and as a Youth Editorial Board Member of Agricultural Research in the Arid Areas. Dr. Wang has published 27 SCI/EI papers as first or corresponding author, been granted 5 national invention patents as the first inventor, and co-authored 2 monographs and 6 technical standards (including group and national standards). His research achievements have been recognized with multiple first-prize awards, including the Awards for Science and Technology in Water Saving Agriculture (2021, 2025) and the Dayu Award for Water Conservancy Science and Technology (2018). His technologies have been demonstrated over more than 15,700 hectares across Xinjiang, Hebei, and Beijing, and have been included in the mature applicable technology catalogues of China’s Ministry of Water Resources and other national ministries. E-mail: <wangzhen686@iwhr.com>.

Dr Eva Pek (FAO)



Agricultural and Rural Development Engineer and Agricultural Economist with over 12 years of experience in integrated and agricultural water management. I design and coordinate irrigation and water projects and guide relevant policy and strategy across Sub-Saharan Africa, North Africa and the Near East, and Central Asia. At the United Nations, I provide technical coordination on water infrastructure, water efficiency measures at system and farm levels, drought management, and relevant policy-making processes while ensuring alignment with national development priorities. I also support FAO's mandate as a knowledge organisation by producing policy papers, technical reports, and field guides that align with international best practices. E-mail: <eva.pek@fao.org>.

Dr. Vivek Kapadia (India)



Vivek Kapadia, former secretary to the Government of Gujarat, India has been working in the field of Water Resource Engineering and Management for last 29 years. At present, he is a Professor of Practice at IIT, Gandhinagar, and at IIT, Roorkee, India. His focus areas have been water resource planning, design, execution, repairs and benchmarking of large irrigation projects, Dam Engineering, environmental and ecological aspects, policy making, techno-legal solutions and dispute resolution related to trans-boundary water disputes. He has also done extensive work in participatory irrigation management, rejuvenation of ancient Indian water conservation systems and in making productive use of problematic soils. He has a long experience of application of geosynthetics in hydraulic structures. E-mail: <vivekpkapadia@gmail.com>.

Prof. Kuo-Wei Liao (Chinese Taipei)

Prof. Miguel Angel Moreno Hidalgo (Spain)

Engr. Prof. Henry Igbadun (Nigeria)



Professor Henry Evonameh Igbadun is a leading authority in Agricultural Engineering, specializing in Irrigation Engineering and Agricultural Water Management. Since achieving full professorship in 2012, he has made significant contributions to research and education at Ahmadu Bello University, Nigeria. He earned his PhD from Sokoine University of Agriculture, Tanzania, where he developed ISIAMod, a innovative computer model for simulating crop yield and water productivity. He is a registered/certified Engineer by the Council for Regulation of Engineering in Nigeria (COREN).

Professor Igbadun has held key leadership roles, including Leader of the Irrigation Research Programme (2017-2021) and Head of the Department of Agricultural and Bioresources

Engineering (2023-2025). He serves on the University Senate and is Vice Chairman (Academic) of the Nigerian National Committee on Irrigation and Drainage. Notably, he led the Technical Committee for the African Regional Conference on Irrigation and Drainage in 2025. He facilitated and anchored the interministerial and multi-institutional High Level Policy Dialogue which took place during the Conference.

His consultancy experience spans major international organizations such as IWMI, FAO, ICRC, AfDB, World Bank, and Sasakawa Africa Association. Major project involvement includes Transforming Irrigation Management in Nigeria (TRIMING), Technologies for African Agricultural Transformation-Water Enabler Compact (TAAT-WEC), and the Ghana Agricultural Sector Investment Programme (GASIP). In December 2023, he led an international team to The Gambia to assess irrigation infrastructure on behalf of the African Development Bank.

Currently, his research focuses on the intersection of agricultural water management and climate change, emphasizing sustainable agrifood systems. He is also actively involved in designs and management of micro-irrigation systems, driving agricultural productivity and resilience across Africa. E-mail : <igbadun20@yahoo.com>.

Prof. Mykhailo Romashchenko (Ukraine)

Prof. Nutchanart Sriwongsitanon (Thailand)



Professor Nutchanart Sriwongsitanon is Professor of Water Resources Engineering at the Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand, and Chief of the Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management (SENSWAT). She has more than 30 years of experience in hydrology, water resources engineering, remote sensing, and integrated water resources management.

Throughout her academic career, Professor Sriwongsitanon has been actively engaged in teaching, research, and the supervision of master's and doctoral students in hydrology and water resources engineering. In parallel with her academic responsibilities, she has participated in and led numerous research and consultancy projects covering flood forecasting and warning, river basin management, irrigation water management, and water resources planning. Her work has involved collaboration with government agencies, international organizations, and the private sector on a wide range of water resources studies.

Professor Sriwongsitanon's research interests focus on the application of remote sensing and geospatial technologies for water resources management, including satellite-based precipitation estimation, evapotranspiration assessment, drought and flood monitoring, irrigation performance assessment, land use analysis, and water accounting. She has also conducted research on hydrological modelling and the integration of Earth observation data to improve water resources assessment.

In addition to her academic and research activities, Professor Sriwongsitanon serves as an advisor and technical expert to several national organizations involved in water resources management and is an active member of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID). She has published extensively in the fields of hydrology, remote sensing, and water resources engineering. E-mail: <fengnns@ku.ac.th>.

Prof. Ing. Guido D'Urso, PhD (Italy)



Prof. Ing. Guido D'Urso, PhD (https://orcid.org/0000-0002-0251-4668) earned his Civil Hydraulic Engineering degree cum laude at University of Naples (Italy) and the Phd in Environmental Sciences at Wageningen Agricultural University. Since 2006 is Full Professor of Water Management and Remote Sensing at Dept. of Agricultural Sciences at the University of Naples Federico II. He's Member of the Academic Senate and President of the Commission for Research of the University of Naples Federico II, and Delegate of Rector for International Cooperation and Development. From 2011-2020 he has coordinated the PhD Course on "Agricultural Sciences".

He has been working since early '90s in the field of Agricultural Engineering, developing new methodologies for Earth Observation data interpretation for water management in agriculture and related hydrological processes. He has coordinated several international research projects in this field, as documented by more than 120 publications on international scientific journals. His research activities, carried out in several countries, including U.S.A., Australia, Near East, have also interested the development of agro-hydrological models for irrigation management and the estimation of soil water content by means of in-situ and remote active microwaves. He has started in 2006 the first "spin-off" company of the University of Naples Federico II, called "Ariespace" with the mission of developing operative applications of satellite remote sensing for land and water management and environmental monitoring. E-mail: <guido.durso@unina.it>.

QUESTION 68: NON-CONVENTIONAL WATER (REUSE, DESALINATION): CAN WE REALLY LOOSEN THE GRIP ON THE RESOURCE AND FOR WHAT USES?

Prof. Nicolas ROCHE (France)



Nicolas ROCHE is a Professor of Chemical Engineering at Aix-Marseille University. He is currently Director of the ECCOREV Research Federation, Scientific Advisor for the High Council for the Evaluation of Research and Higher Education, member of the National Academy of Technologies of France and the High Council for Public Health, in charge of AMU's interdisciplinary mission on the SDGs, Affiliate Professor at the UM6P (Morocco) and co-president of the scientific committee of ICID26 congress. He was the Academic Vice-President of the French Chemical Engineering Society from 2017 to 2025. He is currently Vice-President of the competitiveness cluster AQUAVALLEY and of the Scientific and Technical Council of the Mediterranean Institute of Water (IME). and a member of the board of the "Eau, Agriculture et Territoires" association

For 40 years, he has been working on designing, improving, and optimizing wastewater treatment processes. Initially (1986-2000), to limit the impact of urban and industrial wastewater discharges into the environment. Since 2000, in the integration of wastewater treatment into a circular economy approach, the reuse of treated wastewater, and the "smart use" of water in its use cycle, particularly adapted to the problems of emerging countries regarding access to water and energy. It is within this framework that he has always tried to develop and implement a global and integrated approach to water treatment. This has required continuous work on multi-scale, multi-process, multi-kinetic approaches based on experimental aspects coupled with modelling and simulation aspects. His scientific expertise is in the field of Chemical

Engineering applied to wastewater treatment and reuse and to sludge and waste treatment and recovery, characterized by numerous national and international, academic and industrial collaborations, by 95 publications, more than 150 communications, the co-supervision of 26 PhD theses (2 in progress). E-mail: <nicolas.roche@univ-amu.fr>.

Dr. WU Wenyong (China)



Dr. WU Wenyong, born on Feb 28, 1977, is a Professor at China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR) in Beijing, China. He currently serves as Secretary General of China national Committee on Irrigation and Drainage (CNCID) and Deputy Director of the Irrigation and Drainage Department (IWHR). Since 2015, he has been actively engaged with the International Committee on Irrigation and Drainage (ICID), participating in all ICID meetings through the present. His notable contributions include serving as a member of the Use of Poor Quality Water for Irrigation in 2015. In 2017, he drafted and proposed the scope document for the Working Group on Use of Non-Conventional Water Resources for Irrigation (WG-NCWRI). Since 2020, he has served as Chair of WG-NCWRI (later evolved into WG-NWREP), demonstrating leadership in advancing sustainable water resource management.

Dr. Wu specializes in reclaimed water irrigation and smart irrigation. Since 2002, his team has conducted multi-scale field experiments investigating the environmental behaviors, contamination risks and safe reuse technologies associated with RWI. He has established the data-driven smart irrigation framework including phenotype, sensing, decision-making and control, and developed a serial of innovative intelligent irrigation devices and software. He actively participated in developing FAO and ICID guidelines on reclaimed water irrigation, and leads the international standardization plan on smart irrigation as the convenor of ISO/TC347/AHG 12 and technical expert of ISO Technical Committee on Smart Agriculture. E-mail: <wenyongwu@126.com>.

Dr. Emilio Camacho (Spain)



I started my research work in 1990 when I was awarded a university faculty training (FPU) grant in hydraulic engineering at the University of Córdoba, where I have continued to pursue my research career to the present day. In 1997, I was awarded a fellowship and spent one year at the USDA Agricultural Research Service's Water Conservation Laboratory in Phoenix. In 2007, I qualified as a full professor, coming first in the national qualification process for permanent university teaching positions, and took up the post in 2008. I have been Assistant Director of Academic Planning, School of Agricultural and Forest Engineering (ETSIAM) from 2008 to April 2016 and Head of the Agronomy Department of the University of Córdoba from June 2016 to present. I have devoted my career to research and teaching, becoming actively involved in recent years in management tasks. My main areas of research are the optimization of water and energy, water footprint as an indicator of sustainability and precisión irrigation. Impact of modernization of irrigation, application of digital technologies in irrigation. We have successfully transferred the results of our research to industry with the creation of a technology-based company called Innovative Water & Energy Solutions (IWES).

I have been Director scientific guarantors of the Department of Agronomy to achieve the recognition as María Maeztu excellence unit (2020-2024). E-mail : <ag1capoe@uco.es>.

Dr. Victoriano Martínez-Álvarez (Spain)



Dr. Victoriano Martínez-Álvarez holds a degree in Agricultural Engineering (1996), an M.Sc. in Applied Hydrology (1998), and a Ph.D. in Agricultural Engineering (1999). He is currently a Full Professor at the Technical University of Cartagena (Spain). He has over 30 years of teaching and research experience, focusing on: (1) agronomy and irrigation engineering using desalinated seawater, (2) agricultural water management, and (3) evaporation processes in water bodies and their mitigation techniques. He has conducted research stays at the University of Missouri–Columbia (USA, 3 months), the University of Calgary (Canada, 3 months), and the National Centre for Engineering in Agriculture (Australia, 6 months). He has participated in 9 regional, 10 national, and 6 European competitive research projects, serving as Principal Investigator (PI) in 6 regional and 5 national projects. In addition, he has been involved in approximately 70 innovation and technology transfer contracts. As a result of his research activity, he has published 66 articles in JCR-indexed journals, is co-author of 22 book chapters published by international editorials and has an h-index of 29 in Scopus. He has supervised more than 50 undergraduate and M.Sc. theses, as well as 7 Ph.D. dissertations. He has also served as an expert evaluator in several national and international research assessment processes.

Over the last decade, Dr. Victoriano Martínez-Álvarez has focused his research on the multidisciplinary study of desalinated seawater irrigation in southeastern Spain, addressing its technical characterization, the analysis of its agronomic implications, and its environmental and economic sustainability. E-mail : <victoriano.martinez@upct.es>.

Dr. Javier J. Cancela (Spain)



Javier J. Cancela is an Associate Professor at the Agroforestry Department (University of Santiago de Compostela). The study of water management has been the main line of research since the beginning of his career in 2000, directly related to his PhD thesis defended in 2004: Integrated Water Management in the upper Miño River basin. From then, continuity was given to the line of research on irrigation management and determination of crop water requirements, for which several post-doctoral stays were carried out at the Higher Institute of Agronomy in Lisbon, in collaboration with Prof. Luis S. Pereira, co-author of the FAO monograph on the calculation of crop water requirements. During this stage, he published his first works related to irrigation management and water needs in the cultivation of forage maize and silage grasslands. In 2006, a new line of work about studying vineyards in Galicia began, which continues until today, in which several works in relation to irrigation management, nutrition, fertigation and precision viticulture have been published for the main Galician varieties. Several national and regional competitive projects have been obtained, as well as several contracts with relevant companies within the Galician Viticulture Sector.

He actually led the following Project: I-ReWater (Interreg SUDOE). He has published more than 30 papers in various journals, and serves as a Vice President of AERYD, as well as main research of several national and autonomous projects. His teaching disciplines include irrigation systems, hydraulics, and wastewater treatment plans, and his interests include crop water requirements, reclaimed water, fertigation, and remote sensing applications. Moreover, he is an active member of PROePLA research group and Leader of the Associate Unit of Instituto de Ciencias de la Vid y el Vino (ICVV-CSIC) in the University of Santiago de Compostela. E-mail: <javierjose.cancela@usc.es>.

Eng. Ignacio Gómez-Lucena (Spain)



Ignacio Gómez Lucena, agricultural engineer, FPU-grant pre-doctoral researcher in the area of Hydraulic Engineering and Irrigation (Department of Agronomy) at the University of Córdoba. His thesis takes a multidisciplinary approach to the use of reclaimed water for agricultural irrigation, focusing on the quality of reclaimed water, its impact on soils and crops, and the analysis of the regulatory framework governing its use. Teaching experience in Agricultural Engineering, Civil Engineering and Mining Engineering degrees (subjects: Hydraulics, Hydrology and Irrigation, Hydraulic Works and Installations, Water Resource Planning and Management). Advanced course - Reuse of wastewater in agriculture (CIHEAM Zaragoza). Participation in projects focused on the sustainable use of reclaimed water for agricultural irrigation: I-ReWater, Reutivar 2.0, HAGRO. LinkedIn: https://www.linkedin.com/in/ignaciogomezlucena/ Email : <g72golui@uco.es>.

Dr. Pilar Montesinos (Spain)



Dr. Pilar Montesinos is a Full Professor of Hydraulic Engineering at the University of Cordoba (Spain), where she earned her PhD in Agricultural Engineering. Her teaching spans undergraduate and postgraduate courses in hydraulics and water resources management. Her research focuses on optimizing the water-energy nexus in irrigation distribution systems, water reuse for agricultural purposes, developing digital twins for water and energy management, integrating renewable sources and operating smart urban water supply networks. She holds an h-index of 28, with over 50 JCR-indexed publications. Dr. Montesinos has participated in more than 40 competitive projects and 30 R&D contracts, serving as Principal Investigator for 12 of them, and has supervised 5 PhD dissertations. Additionally, she acts as an expert evaluator for national and international research bodies.

She is an active member of both the Spanish Association of Irrigation and Drainage (AERYD) and the Spanish National Committee of the International Commission on Irrigation and Drainage (CE-ICID). E-mail: <pmontesinos@uco.es>.

Eng. Al Mansoor (Saudi Arabia)

Dr. Elena Bresci (Italy)



Dr. Elena Bresci is a hydraulic engineer and Full Professor in Agricultural Hydraulics and Watershed Protection at the University of Florence. She holds a PhD in Agricultural Engineering from the University of Florence (1999). She is the University of Florence Rector Delegate for Cooperation and Development. Her main research areas are Water Harvesting and Nature-based Solutions for climate change adaptation, use of non-conventional waters for agriculture. She has focused on research using different methods, including modeling and experimental tests, participatory approaches, and remote sensing.

She is the coordinator of the Water Harvesting Lab (https://www.dagri.unifi.it/vp-261-wh-lab.html), established in 2017 and active in inter-disciplinary research on Water Harvesting, in particular in arid and semi-arid areas and fragile regions.

She participated in several international projects both as Coordinator and Partner, in the Mediterranean area, Sub-Saharan Africa, Central and South America, funded by EU, World Bank, FAO and AICS.

She is Member of the Working Group on Rain Water Harvesting (WG-RWG) – International Commission for Irrigation and Drainage (ICID). Email: <elena.bresci@unifi.it>.

Author Index / Index des auteurs

A

A. Arif 575
A. Ben Slimane 591
A. Escriva-Bou 569
A. Jridi 575
A. Mashakeni 88
A. Namarneh 337
A. Ouasli 575
A. Ract-Madoux 90
A. Rotereau 608
A. Zairi 591
Aaditeshwar Seth 256
Aarish Maqsood 463
Abbas Sadrianfar 330
Abdelkader Chehlaoui 583
Abdourahman Maki 619
Abdul Qayyum 281
Abror Gafurov 256
Adeline Bouvard 93
Adisa Hammed Akinsoji 473
Agata Sferratore 397
Aguylan Bernanos 254
Aike Guo 320
Aiten Alava 391
Aksara Putthividhya 492, 629
Alain Rapaport 252
Alfyan Amar Pratama 414
Ali Hammani 428
Ali Raza 114
Ali Shahbazi 330
Ali Sharifi 330
Ali Torabi Haghighi 478
Aliasghar Montazar 237, 243
Alifia Nuraini Sugiartoputr 414
Alireza Gohari 478
Allan A. Andales 333
Alletto Lionel 134
Alok Sikka 112, 352
Amin Ketabi 292
Amouch S. Akhssas A 632
Anatoly Zeyliger 480
Andre Daccache 237
Andrea, Setti 347
Andrés Pérez 364
Angelo Barrientos 364
Angura L. 354
Anil Khanal 391
Anna Pinnarelli 443
Anne-Laure Collard 574
Anthony Blache 254
Antini P. 228
António Capelo 368
Arash Mahjobi 330
Arbaaz Shaikh 487
Ariane Degroote 93
Arianna Facchi 441
Arief Dhiaksa 414
Arnaud T. Ouedraogo 278, 437
Arno Benadie 577
Ashebir Godebo 314
Asmare Belay Nigussie 70
Asnake Enawgaw Amognehegn 70
Atsushi Ishii 294
Attilio Toscano 604
Audouin Elise 134
Audrey Gabbay 391
Aymen Chaaben 252
Azazkhan Pathan 487
Aziz Abouabdillah 583

B

B. Cheviron 298
B. Howes 608
B. Kassambara 393
B. Koné 393
B. Noury 581
B. R. Thapa 81
B. Vennat 138
Bancha Kwanyuen 461
Baolin Yao 312
Baozhong Zhang 420
Barbara Howes 606
Bart Schultz 577
Bazin F. 401

Behzad Nasri 86
Behzad Navidi Nassaj 449
Belinda Platts 600
Ben Abdallah Ma 356
Benjamin Seux 397
Benoît Nigon 391
Bérard A. 454
Besbou O 632
Bezzel Chitsungo 471
Bing Li 144
Bing-Chen Jhong 322
Birendra KC 577
Boyu Mi 118,420
Bresci 347
Bruce Lankford 133, 256
Brunet-Lefevre D. 95
Burgaud 585
Buss P 228

C

C. Campillo Torres 270
C. Colliot 90
C. Hello 138
C. K. Park 575
C. Laurent 284
C. Leauthaud 290, 433, 158
C. Leroy 72
C. Mapumulo 88
C. Papin. 581
C. Richert 475
C. Villacorta Ranera 569
C. Wijaya 282
C.J. Cherel 608
C.-J. Lin 370
C.J. van der Sande 393
C.N. Qwabe 88
C.W. Wu 360
Cameira MR. 174
Candera Wijaya 430
Carlo De Michele 496
Castelli 347
Catarina Bochechas 368
Cathal O Donoghue 129
Ce Wang 264
Cédat S. 401
Cesaretti T. 228
Chainarong Ophaphaibun 489
Chaiwat Prechawit 489
Chaiyapong Thepprasit 461
Changkun Shin 142
Chanphit Kaprom 489
Chantal Jacopin 617
Chaowiwat W. 395
Chapelet A. 454
Charrière S 454
Chaumont Cédric 92
Cheng-Hsun Wu 430
Cheviron B. 356
Chia Min Ho 424
Christina Orieschnig 439
Ci-Jyun Liao 579
Claire Albasi 612
Claire Richert 247
Claire Wittling 74, 99
Claudio Balbontín 364
Costa G. 228
Courault D. 454
Cristián Barrera 364
Crystele Leauthaud 136
Curtis, A. 228
Cuthbert Taguta 65, 232
Cyril Dejean 74

D

D. Calmant 72
D. Dorchies 475
D. Franco 245
D. Gutíerrez 245
D. Leenhardt 158
D. Martínez-Porro 245
D. Rey 245
Dalton M. 228
Damir Matić 296
Daniel Garcia 318
Daniel H. Putnam 237
Daniela Vanella 380
Daniele Pedretti 441
Dario Morganti 380

Darren Hughes 422
Darya Tkachenko 441
David Tang 74
Delos Reyes 345
Delphine Leenhardt 136
Deram Malerbe F. 401
Derviş Durmaz 252
Di Wu 316
Diana Le Berre 571
Diana Valente 286
Dilip Yewalekar 594
Dinda Dwi Oktavianingtiyas 414
Dongho Jo 142
Dong-Hyun Yoon 324
Doussan C 454
Dutertre A. 95
Dyton Sakanya 260

E

E. Buisson 412
E. Dressayre 138
E. Guillot 72
E. H. Lee 575
Edda Kalbus 623
Ehssan El Meknassi Youssoufi 428
Ekkarin Maekan 489
Elena, Bresci 347
Elisa Schwertz 617
Emilio Camacho 596
Emmanuel Patenotre 397, 437
Erick Ruiz 364
Erin Karppinen 314
Esther Mendoza 567
Ethan Hunter 481
Eunmi Hong 101
Evan Derdall 314
Evelyne Tepinier 437

F

F. Abu Seif 581
F. Bustamante 284
F. Chinarro 72
F. Pascual Bernardo 270
F. Salmaso 268
F.C Boogaard 456
Fabian Acuna 481
Faith Chikunda 260
Fanélie Meyer 397
Fatemeh Zakerihosseini 330
Fatma Aribi 180
Fehér Zs. Zs. 354
Feng Wen Chen 249, 579
Fergus Sinclair 170
Ferreira A. 174
Flamain F. 454
Florent Tivet 176
Francesca Valenti 604
Francisco Meza 364, 378
Francisco Pedrero Salcedo 600
Franck Bellet 439
François Bernier 343
François Charron 350
Freddy Saavedra 378
Frédéric Bonnadier 437
Frédéric Bouin 606
Frédéric Grelot 247

G

G. Belaud 475
G. Ingersoll 158, 290, 433
G.L. Maboa 88
Gaël Hermet 74
Gan Chun 445
Gendre Sophie. 167, 302
Gianluigi Buttiglieri 567
Gilles Belaud 343, 350
Gilles Boulet 439
Giriraj Amarnath 112
Giulio L.C. Gilardi 441
Giulio, Castelli 347
Giuseppe Longo-Minnolo 380
Giuseppe Maistrello 604
Giuseppe Mancuso 604
Giuseppina Las Casas 380
Goden Mabaya 260
Gokmen Dedemen 258

Grace Martin 481
Grové B. 476
Gu Nan 116, 300
Guérin Tristan 405
Guichet Eva 134
Guido D'urso 496
Guillaume Dallard 437
Guillaume Thirel 439
Gurbachan Singh 625, 627
Guy R. 228

H

H. Amami 591
H. Bilrha 602
H. Lamouchi 158
H. Raynal 72
H.C. Ho 360
H.-H. Chan 282
H.-Y. Shih 282
Habib Ullah Bodla 341, 376
Haddoudi S 632
Hafiz Qaisar Yasin 234
Hafsa Aeman 374, 463, 341
Häggblom O. 146, 165
Haho A. 165
Hamidreza Noorbakhsh 230
Hanna Audran 397
Hao-Che Ho 358
Haorui Chen 118, 420, 621
Harri Koivusalo 114
Harsh Shah 487
Haruyuki Fujimaki 178
He Yupu 116, 272, 300
Hector Mussillon 74
Hee-Jin Lee 101
Heidi Salo 114
Hélène Tribouillois 247
Henry Jordaan 163
Hermassi T 356
Hernwook Lim 142
Hichem Amichi 93
Hsueh-Yen Shih 430
Huang Richa 300
Hubert H.G. Savenije 489
Hugo Charoud 168
Hugo Tricou 391
Hui Sheng 420
Huihui Zhang 333
Hyunuk An 142

I

I. Atallah 581
I. Blanco Gutiérrez 569
I. Bondarik 120
I. Dababat 581
Ignacio Gómez-Lucena 596
Ihab Alazzam 372
Intervera M. 228
Iraj Heydarian 107
Irina G. Bondarik 417
Isabel Maria Duarte 424
Isaya Kisekka 600
Iván Kleiman 364
Ivana Radošević 296

J

J. Beraud 284
J. Cancela 245
J. Girard 284
J. Iskhakov 362
J. L. Ullman 527
J. Lecollinet 138
J. Martínez-Barbera 245
J. Yuste 245
J.J. Anderson 88, 156
J.S Kau 88
Jacques Delagnes 617
Jaime Nivala 571
Jael Montecinos 364, 378
James A. Williams 489
Jayanta Bhattacharya 352
Jean-Marc Philip 587
Jean-Marie Lopez 74
Jean-Philippe Luc 485
Jean-Philippe Venot 176, 439
Jehanzaib Cheema 341

Jeongwoo Son....160
Jérémie Hédoin....180
Jeremy Fain....391
Jérôme Harmand....252
Ji Renjing....272
Jiangang Liu....152
Jianxin Mu....150
Ji-Hyeon....288
Jing Fu....241, 403
Jing Liu....103
Jinyang Li....453
Jinyang Ye....264
Jin-Yong Choi....160
Jiusheng Li....326
Jo Hamaguchi....339
João Rolim....318
João Santos....318
Joaquim Comas....567
John W. Shields....237
Jorge, Alvar-Beltrán....347
José L. Chávez....333
José Manuel Gonçalves....286, 424
Juan Manuel Sánchez....286
José Sasso....378
Joseph Rwothumio....172
Josephine Vosse....567
Joy Bhattacharjee....114
József Richter....422
Juabih Wang....79
Juan Antonio Rodríguez Díaz....308
Juan David Dominguez Bohorquez....99
Juan Antonio Rodríguez Díaz....529, 596
Juan Pablo Pacheco....364
Jui-Min Hsu....79
Jui-Yun Hsieh....266
Jukyoung Park....142
Jules Wijting....426
Julien Lecollinet....278, 439
Juline Volpellière....589
Jun Deng....152
Justine Bassoul....612
Jutithep Vongphet....461
JV. Heckenroth....284

K

Kai-Yu Cheng....322
Kaleem Ullah....341, 376
Kaprom C.....451
Keigo Noda....140, 339, 435
Kentaro Otsuka....435
Ketvara Sitichok....461
Khoshnaz Payandeh....443
Khouloud Trabelsi....619
Kieri Karpa....333
Kohei Suzuki....435
Kosinyawong R.....451
Kowsuvon N.....451
Krishna Prasad....577
Kwangsik Yoon....399
Kwangya Lee....142, 399
Kyung Sook Choi....473

L

L. Auger....158
L. Bortolini....268
L. Guppy....575
L. Pares....72
Larsonneau Pierre....302
Latifah Omar....86
Laure-Elise Mayard....180
Laurence....585
Leenhardt D....148
Leenhardt Delphine....134
Lhuissier L....148
Li Guangxuan....445
Li Wei....445
Li Yunling....445
Li-Chi Chiang....579
Lihui Gao....103, 144
Lionel Alletto....74
Liu Cuishan....116
Liudmila N. Medvedeva....417
Loïc Duffar....397
Long Xiaoxu....445
Lorenzo Sangalli....441

Lorenzo, Villani 347
Lucas Alonso 567
Lúcia Helena Santos 567
Luis Flores 481
Luoma T. 165
Luxon Nhamo 65, 232

M

M. Ashraf 376
M. Ben Salah 131
M. del Toro Peters 270
M. Dembélé 393
M. El Fakraoui 412
M. Fairbairn 433
M. Fandiño 245
M. Fedko 276
M. Frimat 158
M. Montginoul 131
M. Mukhlisin 456
M. Qadir 575
M. Ramnuth 581
M. Rodríguez-Febereiro 245
M. Romashchenko 276
M. Sauveur 412
M. Taghouti 591
M.A.A. Jamaari 306, 447
M.T. Laaouimri 602
Madhuri Rampalli 407
Maekan E. 451
Maga Kim 160
Magali Odi 364
Mai Zijun 272
Mäkelä M. 146, 165
Mamadou Diarra 278, 397
Maneephai S. 451
Manisha Kinge 594
Marcel Kuper 168
Marco Masetti 441
Marco Romani 441
Marguerie M. 167
Marguerie Mathieu 97
María Belén Pedoja Balparda 308
María Consuelo Arias 364
Maria Do Rosário Cameira 368
Maria João Calejo 368
María Pilar Montesinos Barrios 308
Marie Lefranc 485
Marie-José Makhoul 86
Marielle Montginoul 168
Mario Nohra 343
Marjorie B. Kreis 617
Mark Dubois 170
Markus Monteiro 163
Masoud Asadi 330
Matthew Mccartney 170
Matthews N. 476
Mehdi Forouzanfar 443
Mehdi Khouadja 129
Mesmin X. 95
Michael Cahn 600
Michael D. Dukes 127
Michael Valtorta 441
Michaela Lo 170
Michele Rienzner 441
Miguel Silva 378
Miho Hamano 294
Mi-Hye Yang 328, 399
Milad Rezaei 467
Minna Mäkelä 114, 478
Mira Haddad 347
Mirza Waseem Abbas 281
Mohamad Hamze 391
Mohamed Abbas Ahmed 623
Mohamed Bourioug 583
Mohamed-Dhia Turki 391
Mohammad Alomair 469
Mohammad Ashraf 341
Mohammad Faiz Alam 112
Mohammad Javad Monem 292, 467
Mohammad Nouri 107
Mohsin Hafeez 341, 352, 374, 376, 463
Mojtaba Saboori 478
Molle François 405
Mona Liza F. 345
Mónica Musalem 378
Montginoul Mariell 405, 585
Moynier Jean-Louis 302
Muhamad Aliif Aimran Jamaari 105
Muhamad Khoiru Zaki 339
Muhammad Fawad 333

Muhammad Naufal Al Hafizh 414
Myllys M. 146
Myriam Adam 176

N

N. Ferjani 575
N. Hamrouni 575
N. Roche 608
N. Urruty 138
Nafn Amdar 256
Nagy A. Szabó A. 354
Najma Omar Ajaberi 623
Nan Gu 366
Narayan Lal Gurjar 303
Narges Zohrabi 330, 449,465
Nassim Ait-Mouheb 372, 596
Nattakorn Prasertthonggorn 489
Naveed Iqbal 341
Niccolò, Renzi.....347
Nicolas Baghdadi.....391
Nicolas Courtin 180
Nicolas Roche 606
Nicolas Rogy 397
Nicolas Urruty..... 99, 278, 397
Nikhilesh Kumar 407
Nimit Cherdchanpipat 335
Noha Salah 225
Noicharoen T. 451
Nooroddin Bazgir 330
Noppadon Kowsuvon 67, 489
Nozar Ghahreman 230
Nurminen J. 146
Nutchanart Sriwongsitanon 489
Nxumalo G.S. 354

O

O. Mahjoub 527, 575, 591
O. Sebai.....575
O. Stintzy 587
Octavio Lagos 364, 378
Olga Ermolaeva.....480
Olivier Barreteau 612
Olivier Boiron 372
Olivier Fouché-Grobla 86
Olle Häggblom 478
Oludare S. Durodola 347
Oscar Rosario Belfiore 496
Ouaniam A 632
Oulaya Zoui 583

P

P. Dewaele 608
P. Esteve.....569
P. Giquel 412
P. Lombard—Creisson 608
P. Rouault 475
P. Schmitter 393
P.C. Tharaga 88
Pacôme Dewaele 397
Panpan Zhao 610
Pascal Auzier 495
Pasquier D. 167
Paul Abudulai Yelinje 79, 154, 274
Paul Vandôme 343, 350
Paula Paredes 318
Paul-Henri Leruth 623
Peng Shaoming 445
Peter P. Mollinga.....349
Petra Baják 441
Phatchareeya Waiphara 335
Phirum Or 176
Pierre Savey 254
Pietro Drei 604
Pilar M. Gil 364, 378
Piotr Stepnicki 391
Piquemal B. 95
Polpech Samanmit 461
Pouget G. 454
Pouget L. 356
Pranjal Deekshit 349
Praveen Prakash 305
Prechawit C. 451
Pronmongkol Chidchob 67
Pureun Yoon 160
Puttrawutichai S. 395

Q

Qi Wei 116, 272, 300
Qiameng Du 312
Qingfeng Miao 424
Qinghong Yan 420
Qiubo Song 459

R

R. Aouay 591
R. Cvejić 298
R. Ferrer-Gallego C. Rey 245
R. Pérez-Añón 245
R. Saidak 276
R. Vallée 412
Rafael González Perea 308
Raj Khadka 577
Raja Muhamad Muslim 414
Rasu Suepsahakar 489
Novaira Junaid 374, 376
Rémi Declercq 617
Rémi Lombard-Latune 571
Rémy Dutto 252
Renjing Ji 366, 403
Ritu Panwar 303
Roland Gross 481
Rolim J. 174
Romain Carrausse 598
Romain Vidal 426
Ruangrassamee P. 395
Ruoxi Li 103, 610

S

S. Coly 412
S. Demech 280
S. Guéry 270
S. Harigua 572
S. Jafarzadeh 575
S. Konare 393
S. Morardet 131
S. Saleh 337
S. Sauviat 138
S. Soedarsono 110
S. Talozi 337
S. Walker 88, 156
S.C. Acharya 81
S.H. Husain 483
S.H.A. Mohd Yusof 76
S.I. Wahyudi 110, 456
S.J. Zwart 393
S.P. Lim 483
S.-Y. Hsu 370
Sabrina Toscano 380
Sachin Oza 349
Saelo W. 451
Sakdeethanaporn Aekkasit 83
Salman Siddiqui 341, 374, 376
Salvador Peña-Haro 256
Salvatore Falanga Bolognesi 496
Sam Schaefer P.E 481
Sandra Ruecksthul 374
Sandrine Pignard 495
Sanidhya Nika Purnomo 414
Sanjeeb Baral 310
Sansarith Thianpopirug 489
Sara Ruivo Santos 368
Sarah Freed 170
Sarfraz Munir 463
Habibullah Bodla 463
Saroj Karki 310
Sasin Jirasirirak 492, 629
Sasiwimol Khawkomol 461
Satit Maneepai 67, 489
Selin Le Visage 598
Sentani 456
Seungjin Maeng 142
Seungoh Hur 160
Seyyed Hossein Mousavi 330
Shahbaz Khan 150
Shaoming Peng 459
Sharad Jain 112
Shien Hasebe 294
Shih-Hao Wang 79
Shivani Mehta 256
Simona Consoli 380
Singh A. 228

Sittichok K. 395
Siyanan S. 451
Slatni A 356
Smaranika Mahapatra 352
So Imuta 435
Sofia Semitsoglou Tsiapou 567
Somchai Donjadee 335
Somkiat Prajamwong 492, 629
Somnath Jadhav 565
Somphasith Douangsavanah 170
Song Qiubo 445
Songsak Puttrawutichai 461
Sophia Tobar 378
Sophiatobar 364
Sophie Martin 247
Sriwongsitanon N. 451
Stanley Liphadzi 65, 232
Stefan Strohmeier 347
Stéphane Delichère 426
Stevo Lavrnić 604
Strydom J.D. 476
Suchana Acharya 310
Su-Chin Chen 79, 154
Suepsahakarn R. 451
Suiadee W. 451
Sun Suyan 445
Susana Ferreir 286
Susheel C Acharya 77
Suttigran Arthon 83
Suyan Sun 459
Sylvain Blayac 343
Sylvester Mpandeli 65, 232

T

T. Andersen 110
T. Cazalis 581
T. Guérin 131
T. Matiash 276
T. Ourbak 602
T. Scholasch 284
T.A.B. Koatla 88
Tafadzwanashe Mabhaudhi 65, 232
Talha S 632
Tamás J. 354
Tamás Szatmári 422
Tarek Bouregaa 409
Tasuku Kato 339
Thatheva Saphangthong 170
Thepprasit C. 395
Thirasak Saion 461
Thomas Harmand 606
Tikaram Baral 310
Timothy K. Gates 333
Tinashe Dirwai 65,232
Titouan Filloux 176
Tournebize Julien 92
Tsu-Chuan Lee 154, 274
Tung Yeh 430
Tzu-Ying Lee 430

U

U. N. Parajuli 81
Umair Rabbani 374, 376
Umar Liaquat 463

V

V. Bohaienko 276
V. Shabanov 120
V. Knysh 276
Varawoot Vudhivanich 335
Varun Ravi 305
Venkata Kowshik 305
Venkata Ramamohan Ramachandrula 239
Víctor García 378
Vidya Mandave 349
Vinay Nangia (ICARDA) 21, 39
Vincent Kulesza 606
Vivek Kapadia 487
Vongphet J. 395

W

Wahyu Widiyant 414
Waleed Khan 376

Wang Guoqing 116
Watchara Suiadee 489
Wei Liu 453
Wei Qi 366, 264
Wei Zhang 241, 366
Weiying Feng 424
Wentong Bi 241, 366
Wenyong Wu 320, 610
Wilberforce Okongo 172
Williams J. 451
Wilson Okaka 172
Wim Bastiaanssen 489
Wittling C 356
Wongsa Sanit 83
Won-Ho Nam .. 101, 262, 288, 324, 328,399

X

Xiaomin Chang 621
Xiaoxu Long 459
Xiaoyan Guan 118,420, 621
Xinggang Liu 420

Y

Y. Hj Mohd Sani 306, 447
Y. Indriani 110
Y.-C. Liao 370
Yacoubi S. 356
Yamna Arshad 376
Yan Mo 312
Yannick Knapp 372
Yanyu Lin 453
Yaqi Hu 320, 610
Yassine Khardi 350
Yen-Cheng Lin 358
Yi-Tai Liao 579
Yizhi Wang. 316
Yohei Asada 294
Yonas T. Bahta 163
Yongjae Lee 142
Yongju Moon 142
Yosr Abid 129
Young-Sik Mun 262
Yuan Tao..... 118, 420, 621
Yuan-Chien Lin 266
Yuanyuan Zha 366
Yun Wei Tan. Ming-Che Hu 249
Yunling Li 459
Yupu He 241,366, 403
Yuri. G Yanko 458
Yuslina Hj Mohd Sani 105

Z

Z.-Y. Lee 282
Zahra Soltani 465
Zain Akbar 376
Zha Yuanyuan 272
Zhang Wei 116, 272, 300
Zhanghao Sun 326
Zhao XY..... 454
Zhen Wang 326
Zhengyu Duan..... 264
Zheru Wu..... 593
Zhuangzhuang Feng 424
Zijun Mai 241,366
Ziming Li 320
Zohaib Shahid 341,376, 374
Zor Hafizah Mohd Suhadis 105

ICID•CIID

Invitation to Join ICID *As* Direct Member

Invitation to Join!

The International Commission on Irrigation and Drainage (ICID) is a leading scientific, technical, and professional not-for-profit international organization established in 1950 with headquarters in New Delhi, India; working in the field of irrigation, drainage, and flood management to promote and achieve 'sustainable agriculture water management' through its vision "A water secure world free of poverty and hunger through sustainable rural development".

ICID's Membership is open to Private Companies, Institutions, and Individuals involved in agriculture water management to join as a 'Direct Member'. By joining ICID as a "**DIRECT MEMBER",** companies, institutions, and individuals working or dealing with irrigation, drainage, flood-related issues, and other allied fields would be part of an international network that offers opportunities to exchange knowledge and experience, establish partnerships; stay informed on recent irrigation, drainage and flood management news and events through Commission's publications; make their voice heard and contribute to improved understanding among stakeholders, enabling new ideas on water policy; benefit from worldwide exposure of their organization's activities by using the Commission's communication tools and by participating in the Commission's activities; and influence policymakers to develop sound irrigation-related policies and give it higher priority in the political agenda.

ICID organizes triennial International Congress on Irrigation and Drainage – addressing specific questions; World Irrigation Forum, Regional Conferences, International Drainage Workshops, International Micro Irrigation Conferences, etc. regularly. The Commission brings together experts from different parts of the world to share their experiences and knowledge on specific issues through the ICID technical workbodies. The workbodies bring out manuals, guidelines, and special publications from time-to-time.

For more information related to Direct Membership, please visit: **https://icid-ciid.org/member/direct_member**

Apply Online for Direct Membership: **https://icid-ciid.org/member/dm_membership_form**

Contact:

The Secretary General, ICID, 48 Nyaya Marg, Chanakyapuri, New Delhi 110 021, India,
Tel: +91-11-41510420, E-mail: icid@icid.org
*Website: http://www.**icid.**org*



ICID•CIID

26E CONGRÈS INTERNATIONAL DES IRRIGATIONS ET DU DRAINAGE DE LA CIID

12-17 October 2026, Marseille, France

Hosted by:

Eau, Agriculture et Territoires

Association française pour l'eau agricole, une irrigation et un drainage durables, 500 rue Jean-François Breton, 34093 Montpellier Cedex 5, France, E-mail: afeid@inrae.fr
Website: https://www.eau-agriculture-et-territoires.com/

QR Code for 26th ICID Congress Proceedings



ICID Central Office:
48 Nyaya Marg, Chanakyapuri, New Delhi 110021, India
Tel: +91-11-41510420, E-mail: icid@icid.org
Website: www.icid.org

Follow ICID on :

ISBN: 978-81-89610-55-5

/in/icid-ciid-1544819

/icidonline

/icidonline

/icidorg