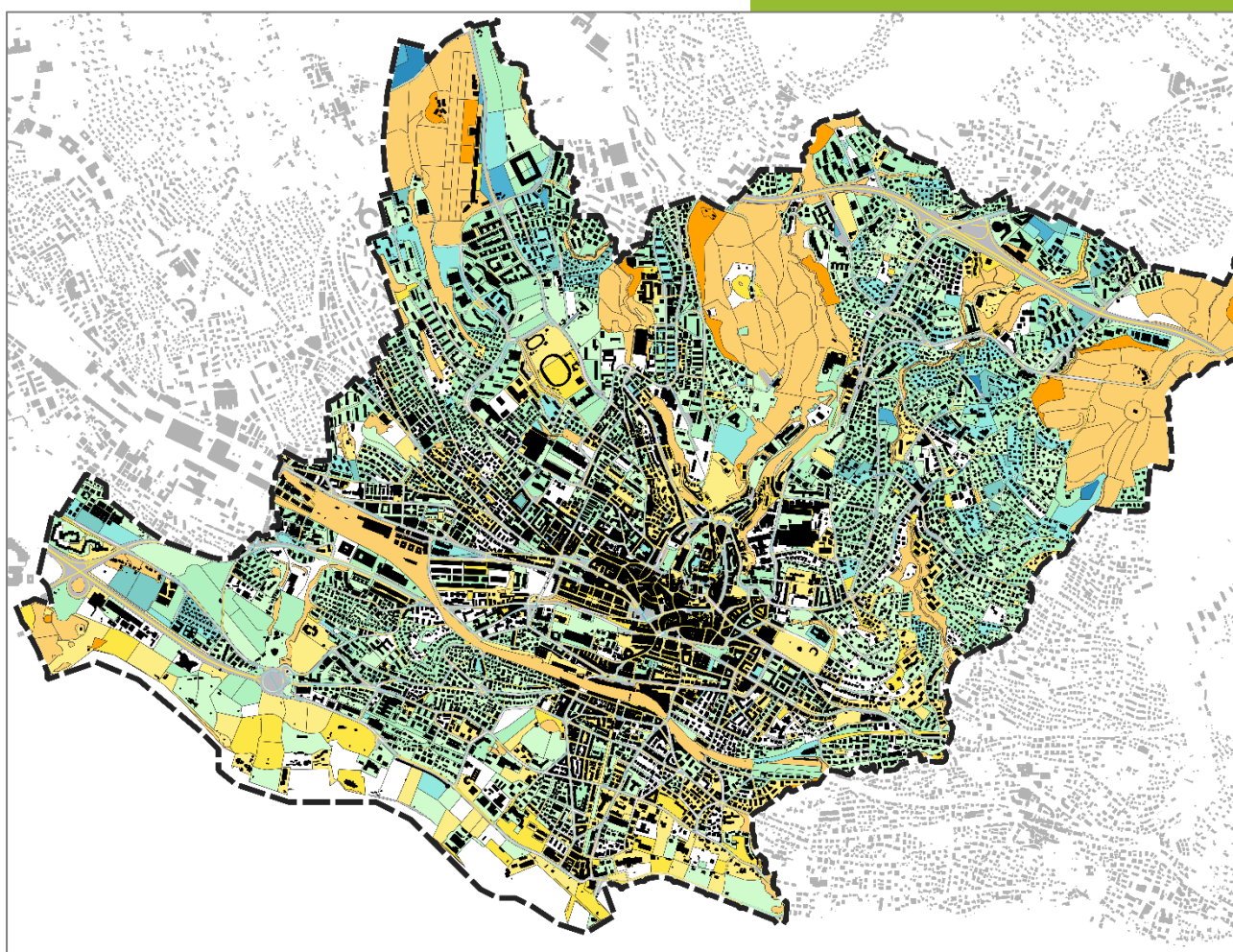




Modélisation de scénarios de mesures pour la ville de Lausanne



Elaboré par :
GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hanovre



Au nom de la
Ville de Lausanne
Direction du logement,
de l'environnement
et de l'architecture
Bureau climat et durabilité



Avril 2024



Sommaire

LISTE DES ILLUSTRATIONS	III
LISTE DES TABLEAUX	III
1. INTRODUCTION	4
2. BASES TECHNIQUES	5
3. MÉTHODE	7
3.1 Le modèle FITNAH-3D	7
3.2 Conditions météorologiques et calculs effectués	7
3.3 Données d'entrée	8
3.4 Scénario Conversion de Places de Parc (Désimperméabilisation)	11
3.5 Scénario Arborisation	11
3.6 Géométrie de Base	12
4. RÉSULTATS	14
4.1 Situation nocturne	14
4.2 Situation diurne	17
4.3 Cartes	20
5. ÉTUDES DE CAS ET CONSEILS DE PLANIFICATION	22
5.1 Mesure : Désimperméabilisation	22
5.2 Mesure : Arborisation	28
5.3 Indications concernant l'échange d'air	34
5.4 Cartes	35
6. RÉSUMÉ	38
BIBLIOGRAPHIE	39



Liste des illustrations

Fig. 1: Modèle numérique de terrain	9
Fig. 2: Classification de l'occupation des sols pour une partie de Lausanne	10
Fig. 3: Nombre de points de grille par classe d'utilisation du modèle pour l'état actuel ainsi que pour le scénario de désimperméabilisation et d'arborisation.	11
Fig. 4: À gauche, la grille de départ et à droite, le résultat du calcul de la moyenne spatiale au niveau de la géométrie de base.	13
Fig. 5: Champ de température nocturne près du sol à Lausanne	15
Fig. 6: Future température de l'air à 4 heures, scénario P1.	16
Fig. 7: Charge thermique (PET) en journée à Lausanne	18
Fig. 8: Charge thermique future (PET) en journée à Lausanne, scénario P1.	19
Fig. 9: Un bon exemple : une surface désimperméabilisée à Lüneburg. (Photo : Elke Hipler)	23
Fig. 10: Exemple de bonnes pratiques. Résultats : Scénario « Désimperméabilisation » (situation nocturne).....	25
Fig. 11: Différence entre les températures nocturnes du scénario « Désimperméabilisation » (SD) et futur sans change de l'occupation de sols (P1).....	25
Fig. 12: Exemple de bonnes pratiques. Résultats : Scénario « Désimperméabilisation » (situation diurne).....	27
Fig. 13: Exemple de bonnes pratiques. Résultats : Scénario « Arborisation » (situation nocturne)	30
Fig. 14: Exemple de bonnes pratiques. Résultats : Scénario « Arborisation » (situation diurne)	32
Fig. 15: Différence entre la PET du scénario « Arborisation » (SA) et futur sans change de l'occupation de sols (P1). ...	33

Liste des tableaux

Tab. 1 : Aperçu des états modélisés pour la ville de Lausanne	8
Tab. 2: Attribution de valeurs seuils de l'indice d'évaluation PET pendant les heures de jour (selon VDI 2004)	17
Tab. 3: Cartes transmises pour l'état actuel (P0) et l'avenir avec le changement climatique (P1).....	20
Tab. 4: Cartes transmises pour les scénarios de mesures Désimperméabilisation (SD) et Arborisation (SA).	35



1. Introduction

Dans le cadre de son Plan climat (RP 2020/54), la Ville de Lausanne a énoncé les grands principes concernant l'adaptation aux changements climatiques. Dans ce cadre ont été cités les axes de travail ainsi que des études et diagnostics à initier pour élaborer un plan d'actions à ce sujet.

A ce stade déjà, une modélisation climatique des états actuel et futur ainsi que de scénarios de mesures était identifiée comme constituant un des diagnostics nécessaires à l'élaboration d'une telle stratégie. En effet, ce document permet d'identifier les parties du territoire les plus exposées aux fortes températures aux états actuel et futur, ainsi que d'autres effets climatiques liés au rafraîchissement par les mouvements d'air nocturnes, mais également de tester les effets de deux mesures d'adaptation aux changements climatiques. Ces deux mesures ont débouché sur des scénarios climatiques, présentés ci-après.

SCENARIO ARBORISATION

Le Plan climat a initié l'élaboration du rapport-préavis « Objectif canopée ». Ce dernier a pour objectif d'atteindre 30% de couverture foliaire d'ici 2040 et 40% à long terme sur le territoire urbain de la ville et décrit les mesures et moyens pour y arriver.

Cette politique est en cours de mise en œuvre et de mise à jour. Une modélisation des effets de cette mesure sur le climat urbain permet de valider son bien-fondé et d'en estimer l'ampleur. Par ailleurs, avoir une vue illustrée de ce que cela représente en termes d'effort de mise en œuvre permet de soutenir les démarches en cours.

SCÉNARIO CONVERSION DE PLACES DE PARC

Dans le Plan climat, il est mentionné que, lors de la conversion de places de parc, des espaces verts peuvent être créés. De plus, lors d'une analyse du recensement 2019 réalisée conjointement par les services de l'urbanisme et de la mobilité et aménagement des espaces publics, il est apparu que la surface de la totalité des places de parc en territoire urbain représente un carré d'environ 1.5 km de côté. Cela constitue une opportunité non-négligeable de désimperméabilisation du territoire.

Aussi, dans son second scénario, la Ville de Lausanne a souhaité innover et tester l'efficacité de la désimperméabilisation des places de parc privées en remplaçant le revêtement bitumineux par de la végétation, de l'arborisation ou un revêtement perméable. Cela permet d'évaluer l'efficacité d'une mesure de la modification du Plan général d'affectation (MPGA) et de démontrer comment ces « petites mesures », déployées à grande échelle, induisent une amélioration notable du climat urbain. Par ailleurs, les résultats étant transposables à tout type de surface imperméable, cela permet de valider toutes les mesures de désimperméabilisation, même sur de petites surfaces.



2. Bases techniques

ÎLOT DE CHALEUR URBAIN

En raison de l'influence anthropique, une ville est dominée par des conditions climatiques, qui ont tendance à être plus prononcées avec l'augmentation de la population ou avec la taille de la ville (Oke 1973). Les raisons en sont, par exemple, le degré élevé d'imperméabilisation, qui est contrecarré par une faible proportion de végétation et de surface naturelle, l'augmentation de la surface causée par les bâtiments (altération du flux par une rugosité plus élevée, réflexion multiple des bâtiments) ainsi que les émissions provenant du trafic, de l'industrie et des ménages (flux de chaleur anthropique). Par rapport à la zone environnante, en grande partie naturelle et non développée, ces effets entraînent des températures plus élevées et un stress bioclimatique estival. Le phénomène de surchauffe survient principalement la nuit et est connu sous le nom d'îlot de chaleur urbain.

LA MODÉLISATION CLIMATIQUE COMME MÉTHODE

Il existe différentes méthodes d'analyse du climat urbain. La modélisation climatique permet d'examiner non seulement un état actuel, mais aussi des états futurs possibles. Il est ainsi possible d'étudier, entre autres, le changement climatique et la mise en œuvre de mesures. Le présent travail se base sur les résultats de la modélisation avec le modèle de climat urbain FITNAH-3D. Ce dernier répond aux questions de climatologie urbaine en comblant les écarts spatiaux et temporels entre les mesures, en calculant d'autres variables météorologiques et en déterminant précisément les champs des vents et de température. Très complet et précis, il permet d'intégrer les champs des vents et de température avec une résolution spatiale de 5 m x 5 m, mais aussi de modéliser les situations diurnes, où l'irradiation est la plus élevée (14 h), et nocturne, où les températures sont les plus basses (04 h). Un autre de ses avantages est qu'il donne des résultats très précis pour la zone de résidence humaine (2 m du sol), essentiels pour évaluer le climat urbain également sous l'effet du ressenti et de la charge thermique.

ANALYSE CLIMATIQUE À L'ÉCHELLE DE LA VILLE ET DU CANTON

Le présent travail est une concrétisation de l'analyse climatique cantonale (GEO-NET 2024) qui est basée sur une résolution de grille de 10 m x 10 m. Contrairement à l'analyse cantonale, cette étude se concentre sur la situation climatique future de la ville de Lausanne, en particulier sur le calcul de l'efficacité de différents scénarios de mesures (arborisation, désimperméabilisation). En se concentrant sur une zone plus petite et en réduisant ainsi la durée des calculs, il est possible d'étudier la ville de Lausanne avec une meilleure résolution du modèle (5 m x 5 m) et de modéliser plusieurs états. Ainsi, 4 états différents ont été déterminés dans le cadre de ce travail (cf. chapitre 4), alors que l'étude climatique cantonale se base sur un état actuel et un état futur. De plus, l'analyse climatique cantonale s'intéresse à la question de l'impact des futurs projets de construction sur le climat et a donc une autre focalisation sur le contenu. Les deux études ont cependant en commun le fait que le scénario RCP 8.5 et la période 2045-2074 (ou l'horizon cible « 2060 ») ont été pris en compte dans l'analyse future. Par conséquent, l'analyse climatique de Lausanne est en accord direct avec l'analyse climatique du canton de Vaud. Les différentes priorités de contenu pour la ville de Lausanne et le canton de Vaud se traduisent entre autres par des produits cartographiques différents. À Lausanne, l'arborisation et la désimperméabilisation ont un impact particulier sur la PET et la température de l'air, de sorte que ces deux paramètres climatiques sont considérés en premier



lieu. L'efficacité des mesures est mise en évidence sous forme de cartes de différences. Des conseils d'aménagement peuvent ensuite en être déduits et illustrés sous forme d'exemples de cas concrets. Le thème de l'échange d'air joue un rôle secondaire dans ce travail, même si l'échange d'air froid est également abordé lors de la formulation d'indications de planification. Les champs d'écoulement de Lausanne calculés pour les différents états ne sont pas suffisamment significatifs en ce qui concerne les changements par rapport à l'état actuel. Cela s'explique notamment par le fait que la localisation exacte des mesures n'était pas connue et que l'occupation future des sols ne pouvait donc être représentée que de manière approximative. Il manque donc une base solide pour décrire la modification de l'échange d'air à petite échelle. Les processus d'air froid sont examinés en détail dans l'analyse climatique cantonale (GEO-NET 2024), tant dans l'état actuel que dans l'état futur (en tenant compte du changement climatique et des zones de développement).



3. Méthode

3.1 LE MODÈLE FITNAH-3D

Les modèles méso-échelle tels que FITNAH-3D peuvent donc être utilisés pour bien mieux répondre aux questions de climatologie urbaine que les valeurs obtenues uniquement à partir de campagnes de mesures. FITNAH-3D est basé, tout comme les modèles de prévisions météorologiques et climatiques, sur un ensemble d'équations d'équilibre et de conservation très similaires. Le cadre de base est constitué des équations de conservation du mouvement (*Équations de Navier-Stokes*), de la préservation de la masse (*Équation de continuité*) et de l'économie de l'énergie (*Premier principe de la thermodynamique*).

La solution des systèmes d'équations se fait dans une grille numérique. La largeur de la grille doit être choisie de manière à ce que les caractéristiques climatiques locales de la zone d'enquête puissent être saisies par le modèle correspondant. Plus la grille est fine, plus les détails et les structures ont une bonne résolution. Cependant, plus l'écart entre les grilles est fin, plus les exigences en matière de temps de calcul et de données d'entrée sont élevées. Un compromis entre nécessité et faisabilité doit être trouvé ici. Dans la présente étude, le maillage spatial horizontal utilisé pour la modélisation avec FITNAH 3D est de 5 m. En revanche, la largeur de maille verticale n'est pas équidistante et est particulièrement dense dans l'atmosphère près du sol afin de saisir de manière réaliste la forte variation des variables météorologiques. Ainsi, les zones de calcul les plus basses sont situées à des hauteurs de 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 40, 70 et 100 m au-dessus du sol. Vers les plus hautes altitudes, la distance augmente et la limite supérieure du modèle se situe à une altitude de 3000 m. À cette altitude, on suppose que les perturbations causées au sol par la topographie et l'utilisation des sols se sont atténuées.

3.2 CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET CALCULS EFFECTUÉS

L'étude climatique de Lausanne est basée sur un jour d'été autochtone comme cadre météorologique pour le calcul du modèle. Cette journée est caractérisée par un ciel sans nuage et un vent synoptique qui ne se superpose que très faiblement, de sorte que les caractéristiques climatiques locales d'une ville sont particulièrement prononcées. La caractéristique d'une telle situation météorologique (haute pression) est la formation de brises thermiques, c'est-à-dire de courants d'égalisation entraînés par la différence de température entre les espaces ouverts plus froids et les zones d'habitation plus chaudes.

En général, une journée d'été autochtone entraîne les charges thermiques les plus élevées en raison de l'irradiation élevée et du faible échange d'air. Même s'il s'agit d'une situation particulière, une telle situation météorologique se produit régulièrement et plusieurs fois chaque été (dans le canton de Vaud, dans environ presque la moitié des nuits d'été, cf. GEO-NET (2024)).

Cependant, le climat de la ville de Lausanne a été examiné non seulement dans son état actuel mais aussi en vue de la réalisation de deux scénarios de mesures différents (arborisation et désimperméabilisation). Au total, quatre modélisations distinctes ont été réalisées et quatre états différents ont donc été pris en compte (Tab. 1).

La situation de référence, qui représente l'utilisation actuelle des sols, a été modélisée en tenant compte à la fois du climat actuel (P0) et du changement climatique (P1). Les deux scénarios de mesures, Arborisation (SA) et Désimperméabilisation (SD), tiennent également compte des augmentations de température dues aux changements climatiques.



Les augmentations de température supposées pour la représentation du changement climatique se réfèrent aux résultats des scénarios climatiques pour la Suisse (CH2018). Les hausses de température correspondent au signal de changement estival moyen du scénario RCP 8.5 pour le canton de Vaud jusqu'en 2060.

Tab. 1 : Aperçu des états modélisés pour la ville de Lausanne

Abbré- via- tion	Description	Année / Période climatique	Augmenta- tion de la température par rapport au climat ac- tuel	Augmentation de la tempéra- ture de l'eau par rapport à l'état actuel	Occupation des sols
P0	Situation de référence	Période climatique 1981-2010	-	-	État actuelle (2019-2022)
P1	Situation de référence	2060	+ 2,7 °C	+ 1,35 °C	État actuelle (2019-2022)
SA	Scénario « Ar- borisation »	2060	+ 2,7 °C	+ 1,35 °C	40% de canopée dans le territoire ur- bain
SD	Scénario « Désimper- méabilisation »	2060	+ 2,7 °C	+ 1,35 °C	Diminution de 60% places de parc

3.3 DONNEES D'ENTRÉE

Un modèle numérique comme FITNAH-3D nécessite des données d'entrée spécifiques qui sont caractéristiques du paysage de la zone d'étude. Pour chaque point de grille, les données suivantes, fournies par le Canton de Vaud et la Ville de Lausanne, sont prises en compte :

- Altitude du terrain
 - ↳ Modèle numérique du terrain (2019)
- Occupation des sols
 - ↳ Couverture du sol (2022)
 - ↳ Étendue de canopée (2019)
 - ↳ Photo aérienne infra-rouge (2020 / 2021)
 - ↳ SWISS TLM 3D (2022)
 - ↳ Toiture végétalisée (2020)
- Hauteur des structures
 - ↳ Modèle numérique de hauteur (2019)
 - ↳ Raster des hauteurs de la végétation (2019)
 - ↳ Hauteurs des bâtiments (2019)
 - ↳ Cadastres de bruit des installations ferroviaires - murs antibruit (2022)
- Température de l'eau
 - ↳ Lac Léman ~ 20,4 °C

- autres eaux stagnantes ~ 20 °C
- cours d'eau : température de l'eau en fonction de l'altitude

Afin d'enregistrer les processus climatiques entre la ville de Lausanne et ses environs, la zone d'étude s'étend au-delà des limites de la ville. La ville couvre une superficie de 41 km². La zone d'étude rectangulaire utilisée pour la modélisation s'étend sur une superficie de près de 130 km² (11 km x 11,8 km), de sorte que les différences d'altitude et d'occupation des sols dans la région environnante qui influencent le climat urbain de Lausanne peuvent être prises en compte. Au total, la zone du modèle est décrite avec 5 198 762 cellules raster, des informations sur la hauteur du terrain, l'occupation des sols et la hauteur des structures étant stockés pour chaque cellule raster.

La hauteur du terrain de la zone modélisée est représentée dans un modèle numérique de terrain (MNT), dont la moyenne a été calculée à partir de la résolution initiale jusqu'à la résolution de grille de 5 m nécessaire à la modélisation (Fig. 1). Depuis la rive du lac, à 372 m d'altitude, la zone urbaine s'étend sur la bande riveraine plate, d'une largeur allant jusqu'à 500 m selon la situation, puis vers le nord jusqu'au plateau de La Blécherette (620 m d'altitude), dans la zone forestière du Bois de Sauvabelin (663 m d'altitude) et sur la terrasse de Vennes (jusqu'à 700 m d'altitude). Le centre-ville se situe à 495 m d'altitude.

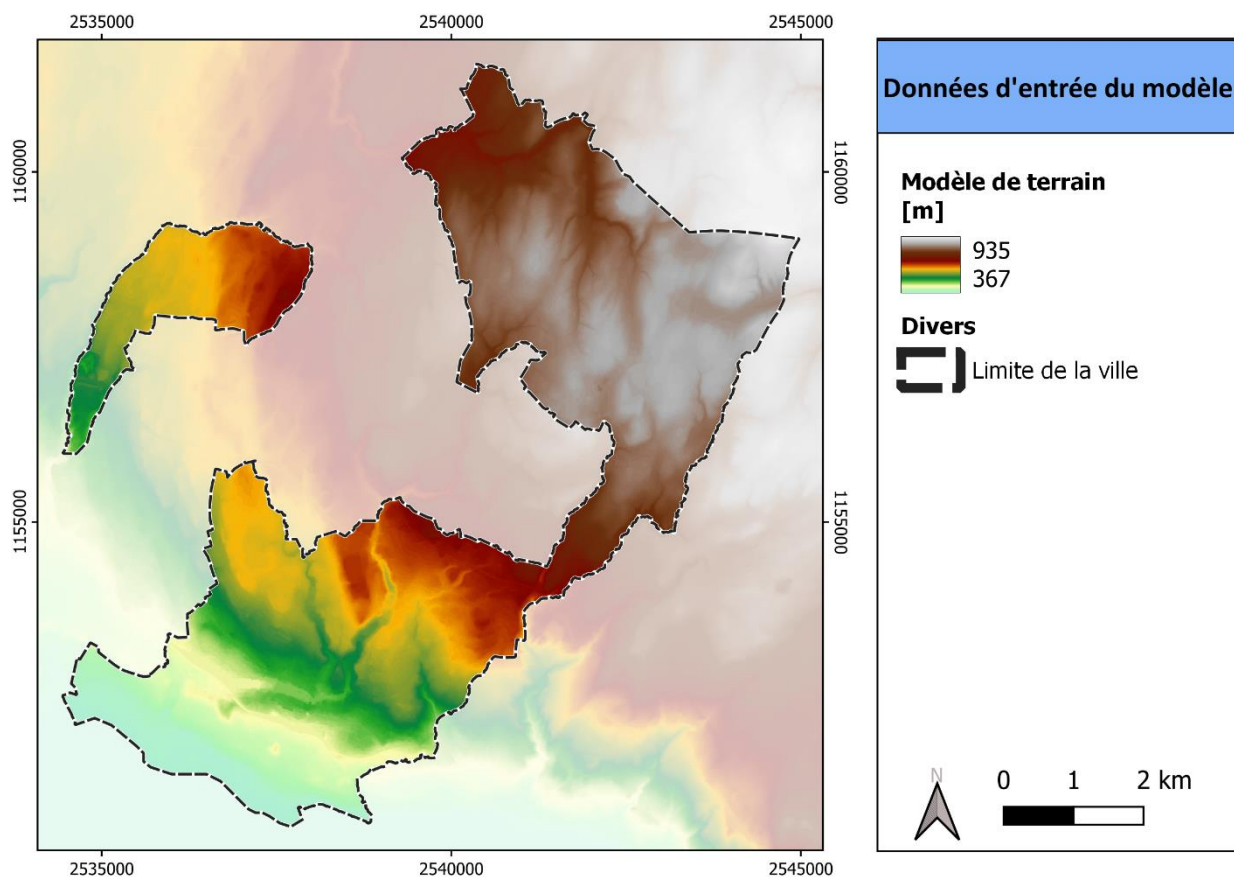


Fig. 1: Modèle numérique de terrain

L'occupation des sols à Lausanne est définie par 12 classes d'occupation des sols différentes (Fig. 2), chacune ayant des caractéristiques physiques différentes. Avec la largeur actuelle des cellules de raster de 5

m, il a été possible de représenter les bâtiments et les arbres individuels dans la classification de l'occupation des sols. Grâce à la cartographie des toits végétalisés, il a été possible de distinguer les bâtiments normaux des bâtiments à toiture végétalisée. Pour les arbres ou la haute végétation de plus de 2,5 m, on distingue trois terrains différents. Ainsi, les arbres se différencient par l'imperméabilité de leur environnement :

- arbres sur une surface imperméable (par exemple les arbres des rues)
- arbres sur gazon (par exemple les arbres dans les parcs)
- arbres sur un terrain partiellement imperméable (par exemple les arbres à côté des voies ferrées ou des terrains de sport).

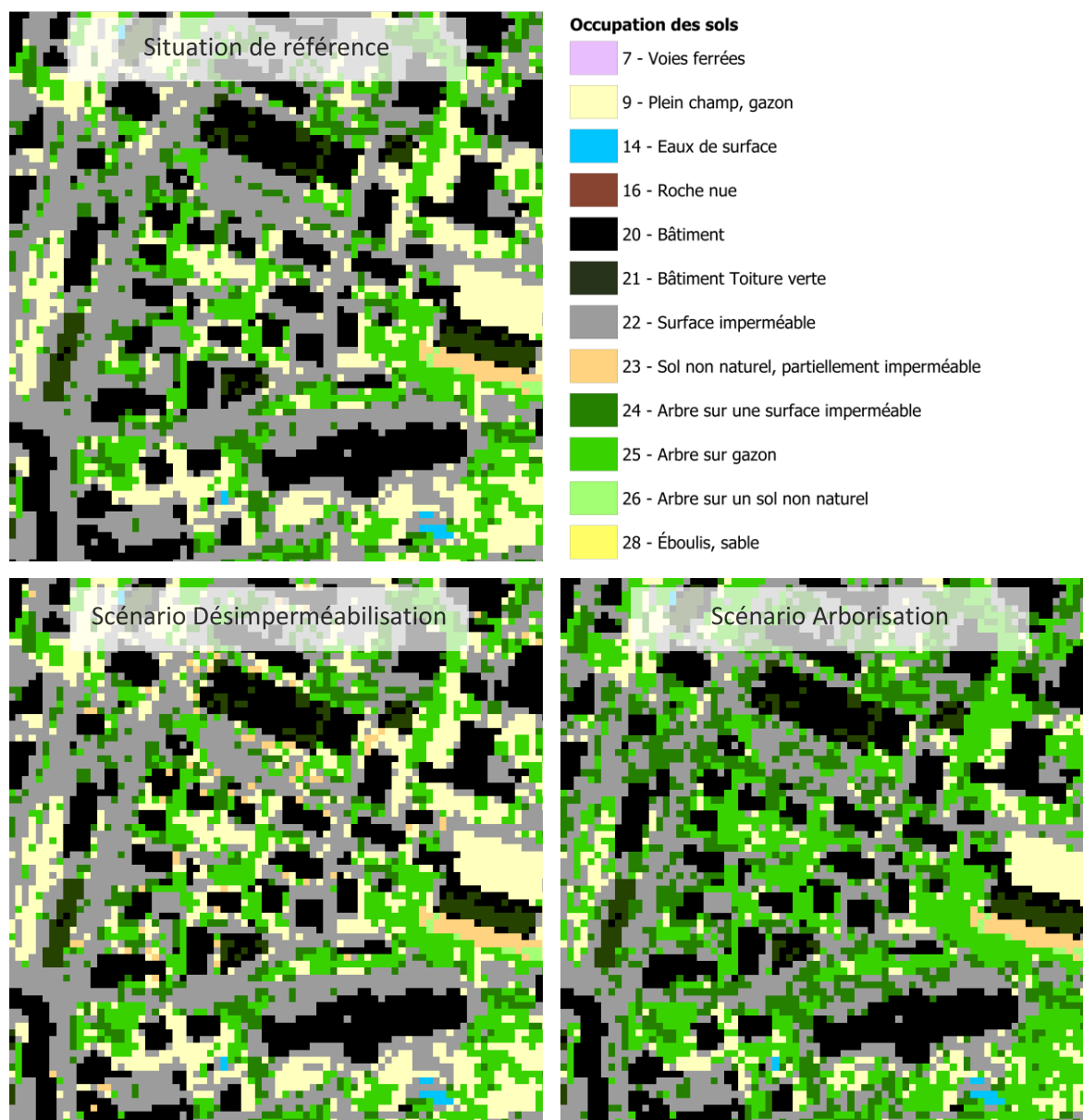


Fig. 2: Classification de l'occupation des sols pour une partie de Lausanne

Les scénarios de mesures « Désimperméabilisation » et « Arborisation » ont été développés sur la base de différentes hypothèses qui sont expliquées ci-dessous. La Fig. 3 suivante résume la répartition statistique des classes d'occupation des sols dans les différents états.

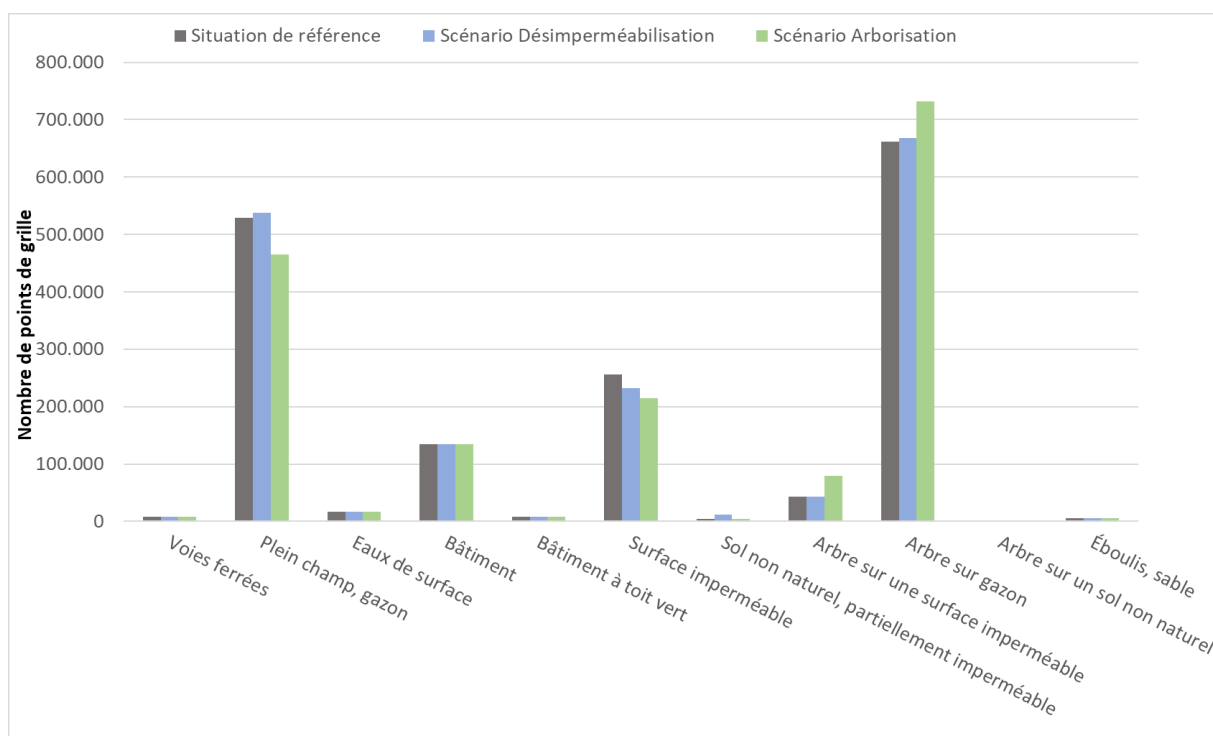


Fig. 3: Nombre de points de grille par classe d'utilisation du modèle pour l'état actuel ainsi que pour le scénario de désimperméabilisation et d'arborisation.

3.4 SCÉNARIO CONVERSION DES PLACES DE PARC (DÉSIMPERMÉABILISATION)

La couche « Stationnement_surface », mise à disposition par la ville de Lausanne, constitue la base de données pour le scénario de désimperméabilisation. Il s'agit d'un ensemble de données ponctuelles contenant des informations sur le nombre de places de parc. Les points sont placés à l'entrée des bâtiments, de sorte que seule la position approximative (et non réelle) des places de parc est connue. Pour simplifier, un emplacement est défini par une taille de 5 m x 5 m (surface de l'emplacement lui-même et espace supplémentaire pour les manœuvres), ce qui correspond à un point de grille. On définit comme emplacements les cellules de la grille de la classe d'occupation du sol « surface imperméable » qui se trouvent le plus près du point concerné dans le jeu de données.

Pour chaque point de la couche « Stationnement_surface », 60 % des places de parc existantes doivent être désimperméabilisées. Les chiffres après la virgule sont toujours arrondis au nombre entier supérieur. Par exemple, si le nombre total d'emplacements est de quatre, trois seront désimperméabilisés. Les surfaces désimperméabilisées sont affectées à parts égales (soit un tiers chacune) à l'occupation « arbre sur gazon », « gazon » et « sol non naturel ».

3.5 SCÉNARIO ARBORISATION

Le « scénario arborisation » prévoit une augmentation de la proportion d'arbres à 40 % dans le territoire urbain (= ville de Lausanne sans la partie nord et l'exclave). Les arbres correspondants sont plantés aussi bien dans l'espace routier (transformation « surface imperméable » en « arbre sur une surface imperméable ») que sur des surfaces à dominante verte (transformation « plein champ, gazon » en « arbre sur gazon »). Dans certaines zones d'exclusion, la plantation d'arbres n'est pas prévue, entre autres dans les



terrains affectés en zone agricole, zone d'aérodrome, zone ferroviaire, aire forestière, autoroutes et terrains de sport. La canopée de Lausanne ne s'agrandit pas seulement par de nouvelles plantations, mais aussi par la croissance des arbres. Ainsi, 50 % des pixels d'arbres ajoutés sont situés à côté de pixels d'arbres déjà existants et représentent ainsi la croissance de la couronne. Les 50 % de pixels d'arbres restants sont placés au hasard et représentent les nouvelles plantations d'arbres. La proportion actuelle d'arbres de rue (classe d'utilisation « arbre sur une surface imperméable ») dans le territoire urbain est doublée dans le scénario arborisation, tous les pixels d'arbre restants sont ajoutés sur des surfaces à dominante verte jusqu'à ce que la valeur cible de la canopée de 40 % soit atteinte. Afin d'établir un lien direct avec le scénario de désimperméabilisation, tous les nouveaux arbres plantés dans le scénario de désimperméabilisation sont intégrés dans le scénario d'arborisation. Ils contribuent ainsi déjà à la réalisation de la valeur cible.

3.6 GÉOMETRIE DE BASE

Les résultats du modèle évalués au niveau de la grille permettent une représentation détaillée des principaux processus climato-écologiques dans la zone étudiée. Les évaluations et les conclusions qui en découlent en matière de planification (par ex. le degré de charge thermique dans l'espace d'action ainsi que l'importance bioclimatique de certaines zones dans l'espace de compensation) doivent cependant se référer à des unités spatiales fonctionnelles clairement délimitables dans l'espace urbain. Ainsi, ces unités fonctionnelles spatiales peuvent être comparées entre elles. Dans le projet, ce jeu de données s'appelle « géométrie de base » et doit remplir plusieurs conditions à la fois. Elle doit :

- Être disponible pour l'ensemble de la zone urbaine
- Être le plus actuel possible et faire l'objet d'une mise à jour la plus standardisée possible
- Permettre une classification claire entre les espaces de compensation et les espaces d'action
- Être adapté à la fois à l'échelle de toute la ville et à l'approche d'analyse à haute résolution, c'est-à-dire n'être ni trop petits ni trop grossiers.

Un tel ensemble de données n'existe pas au niveau communal. C'est pourquoi la géométrie de base a été élaborée. Comme l'analyse climatique du canton de Vaud est en cours d'élaboration par GEO-NET Umweltconsulting GmbH, la géométrie de base a été établie au niveau cantonal (GEO-NET GmbH 2024) et précisée dans le cadre du mandat communal. Avec l'occupation des sols, il existe un type d'utilisation attribué spatialement à un niveau très détaillé. Dans un premier temps, cette base a été résumée et recoupée avec d'autres jeux de données par le mandant. L'expert a ensuite procédé à une vérification et à une subdivision des espaces verts. La modification concerne aussi bien le regroupement de structures à très petite échelle (en priorité dans l'espace d'action) que la subdivision de surfaces cohérentes plus importantes en unités fonctionnelles plus petites (en priorité dans l'espace de compensation). Tous les résultats du modèle basés sur des raster sont reportés dans la géométrie de base à l'aide d'une moyenne spatiale statistique, non pondérée, de tous les points de raster coupant les surfaces respectives. Grâce à cette procédure, les résultats des scénarios de mesures sont disponibles sous deux formes : D'une part, sous la forme d'une répartition des paramètres climatiques basée sur une grille dans le continuum spatial et, d'autre part, sous la forme d'unités de surface pertinentes pour la planification et adaptées à l'échelle, pouvant être délimitées spatialement dans la réalité. Comme toutes les sous-surfaces de la géométrie de base ont une superficie supérieure à 300 m² (soit 12 fois les surfaces d'une seule cellule de la grille du

modèle), des valeurs plus élevées et/ou plus basses apparaissent généralement au niveau de la grille et moins dans la généralisation statistique (Fig. 4).

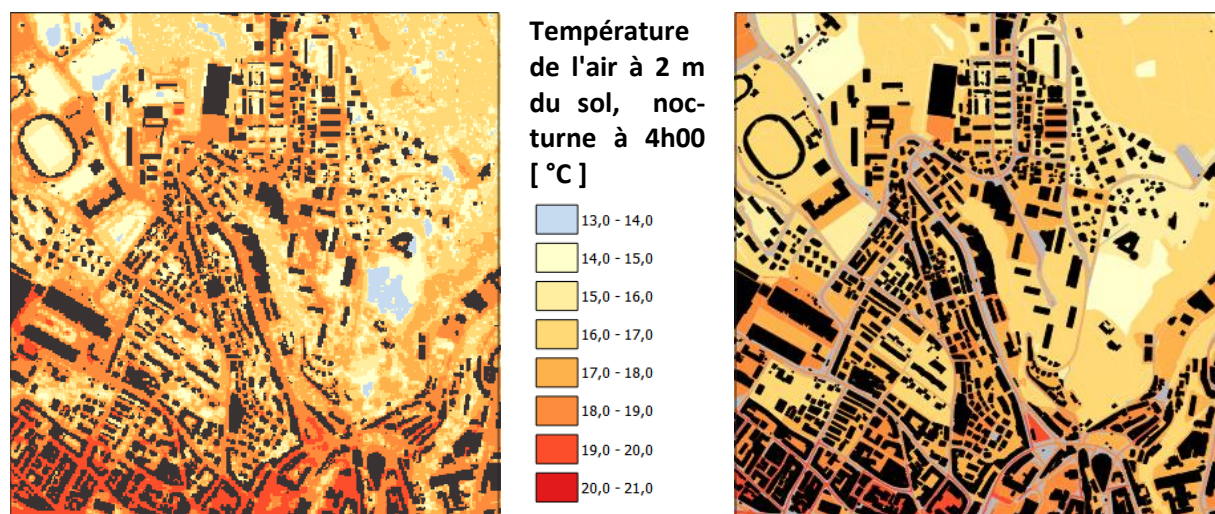


Fig. 4: À gauche, la grille de départ et à droite, le résultat du calcul de la moyenne spatiale au niveau de la géométrie de base.



4. Résultats

Les résultats du modèle relatifs au confort thermique et à l'impact des mesures ont été visualisés sous forme de cartes QGIS 3.28.7 et transmises avec leurs légendes. Les cartes individuelles des paramètres basées sur le raster de la température de l'air nocturne et de la température physiologique équivalente (PET ; situation diurne) sont décrites ci-dessous à l'aide d'exemples pour la situation actuelle P0 et pour le scénario P1, qui prend en compte le changement climatique. Tous les résultats sont basés sur une résolution spatiale horizontale de 5 m (une valeur par cellule de grille) d'une situation météorologique estivale autochtone (chapitre 3.2). Ils sont valables pour la zone de séjour de l'homme à 2 m du sol (température de l'air la nuit) ou à 1,1 m du sol (PET le jour) et considèrent les moments 04h00 pour la situation nocturne (refroidissement maximal) ou 14h00 pour la situation diurne (charge thermique maximale). Les incréments de classe dans la légende des couleurs ont été choisis de manière à faire ressortir au mieux les différences au sein de la ville.

Il s'agit de données raster géoréférencées au format .tif ainsi que de la géométrie de base avec la référence spatiale : CH1903+ /LV95 (EPSG : 2056). Les résultats sont également disponibles sous forme agrégée sur des polygones de la géométrie de base, qui contiennent les valeurs des résultats raster en moyenne. Pour simplifier, seuls les résultats raster sont décrits ci-après.

4.1 SITUATION NOCTURNE

La détermination du champ de température près du sol permet de distinguer les zones présentant des charges bioclimatiques potentielles et d'évaluer les caractéristiques spatiales ainsi que l'efficacité des débits d'air froid. Les valeurs absolues de la température de l'air sont données à titre d'exemple pour une nuit d'été autochtone en tant que situation météorologique particulière.

Selon les conditions météorologiques, la situation ou l'altitude du site et les caractéristiques du sol ou de la surface, le refroidissement nocturne peut présenter des différences notables, ce qui apparaît clairement si l'on considère l'ensemble de la zone étudiée, y compris la région lausannoise avec ses différentes affectations de surface. Ainsi, la température de l'air nocturne à 2 m du sol comprend des valeurs minimales d'environ 11,5 °C dans le Parc Naturel du Jorat et des valeurs maximales d'environ 20,4 °C à Ouchy, ce qui représente une amplitude de 8,9 °C. La température moyenne de la ville, y compris les zones forestières du nord, est de 15,3 °C dans les conditions météorologiques supposées.

L'ampleur de l'écart de température dans les zones urbaines dépend avant tout de l'étendue et de la densité des constructions. C'est précisément dans le centre-ville et dans les zones commerciales que l'on trouve des taux d'imperméabilisation élevés, ce qui se reflète dans la plus forte surchauffe nocturne - même la nuit, des températures supérieures à 19,5 °C y sont encore atteintes dans les conditions supposées (Fig. 5). En outre, les températures dépassent 19 °C dans une grande partie de l'espace routier de Lausanne. Dans les zones moins imperméabilisées, la surchauffe est déjà moins importante. La ville de Lausanne se caractérise en grande partie par un bâti dense et compact, où la verdure se retrouve dans les parcs mais aussi dans les cours intérieures. Les secteurs de Chailly, Rovéréaz et Craivavers, par exemple, présentent des maisons individuelles plus aérées. Les températures y sont généralement comprises entre

14 °C et 18,5 °C. Cependant, on y observe également des différences de température plus importantes dans un espace restreint, par exemple entre le côté chaud de la rue et le côté plutôt frais du jardin d'une maison. Si l'on compare la température des jardins privés à celle du côté de la rue, on constate souvent des différences de température de 1 à 3 °C. Dans ce cas, de l'air froid supplémentaire est souvent apporté par les espaces verts et ouverts environnants (aux abords des habitations). Les zones d'habitation plus compactes, comme par exemple à Montétan, présentent des valeurs supérieures à 19 °C dans les zones étroites et imperméables, environ 18,5 °C dans les zones moins denses et des valeurs comprises entre 15,5 °C et 16,5 °C dans les arrières-cours végétalisées.

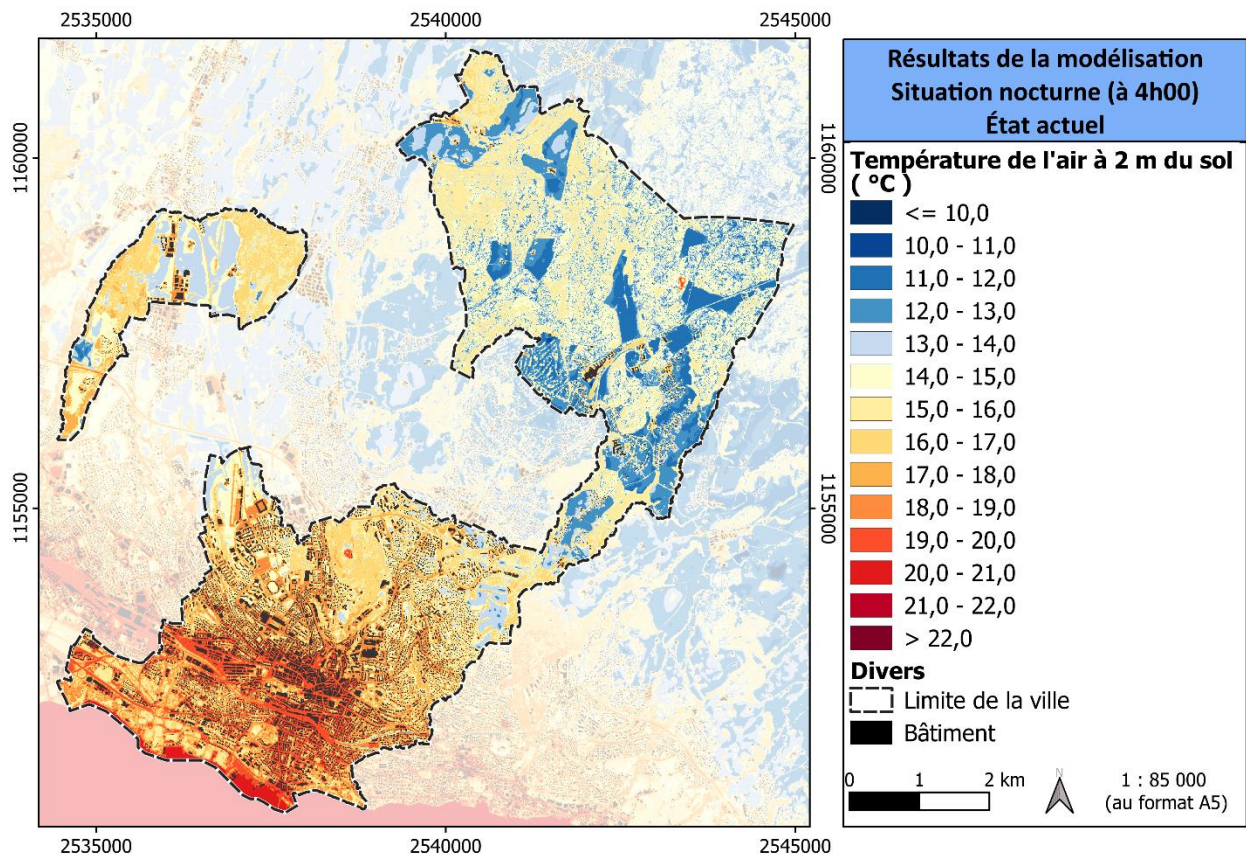


Fig. 5: Champ de température nocturne près du sol à Lausanne

Parmi les espaces verts et ouverts, les champs, les pelouses et les clairières de Lausanne comptent parmi les zones les plus froides de la ville la nuit. Avec des températures inférieures à 12 °C, ce sont les clairières des forêts qui se refroidissent le plus. Les espaces verts du centre-ville (pelouses) présentent un spectre de valeurs plus élevé, avec en priorité 14,5 °C à 16,5 °C (p. ex. Parc de Milan, Parc de la Légende, Piscine de Bellerive, terrains de sport, Mémorial 1914 - 1918), bien qu'il existe une dépendance à leur taille et à leur structure verte. Ainsi, la température de ces petits espaces verts ne descend que rarement en dessous de 17 °C lorsqu'ils sont intégrés dans un environnement globalement plus chaud et qu'ils présentent une forte proportion d'arbres. Néanmoins, ces zones peuvent également constituer des espaces de détente potentiels pour les habitations environnantes.

Dans les forêts, la canopée atténue le rayonnement nocturne et donc une baisse plus importante de la température de l'air près du sol, de sorte que des valeurs de 16,5 - 17,5 °C sont généralement atteintes à 2 m du sol. La nuit, la production d'air froid est donc moins importante qu'au-dessus des espaces ouverts

non imperméabilisés, mais les grandes zones forestières jouent un rôle important en tant que zones de production d'air frais, dans lesquelles l'air est riche en oxygène et peu pollué.

La capacité thermique spécifique élevée de l'eau permet entre autres de réduire la variation diurne de la température de l'air au-dessus des grands plans d'eau, de sorte que les températures nocturnes peuvent même être plus élevées que dans les environs et réduire leur refroidissement. La température de l'eau du lac Léman a par exemple été fixée à 20,4 °C pour le modèle.

En raison du changement climatique, une augmentation des températures estivales de +2,7 K en moyenne (RCP 8.5, médiane, écart entre la période de référence 1981-2010 et la période future 2045-2074) a été considérée. Avec le changement climatique, les zones urbaines, commerciales et de transport se réchauffent autant que les espaces verts et ouverts, ce qui fait que l'effet d'îlot de chaleur reste inchangé dans l'état futur P1 (voir Fig. 6).

Le changement climatique entraîne une augmentation des températures sur l'ensemble du territoire. De nombreuses surfaces du centre-ville, en particulier l'espace routier et les zones fortement imperméabilisées (centre, zones commerciales), se retrouvent dans des plages de température supérieures à 22 °C la nuit à 4 heures. Il s'agit alors d'une nuit tropicale (température minimale ≥ 20 °C).

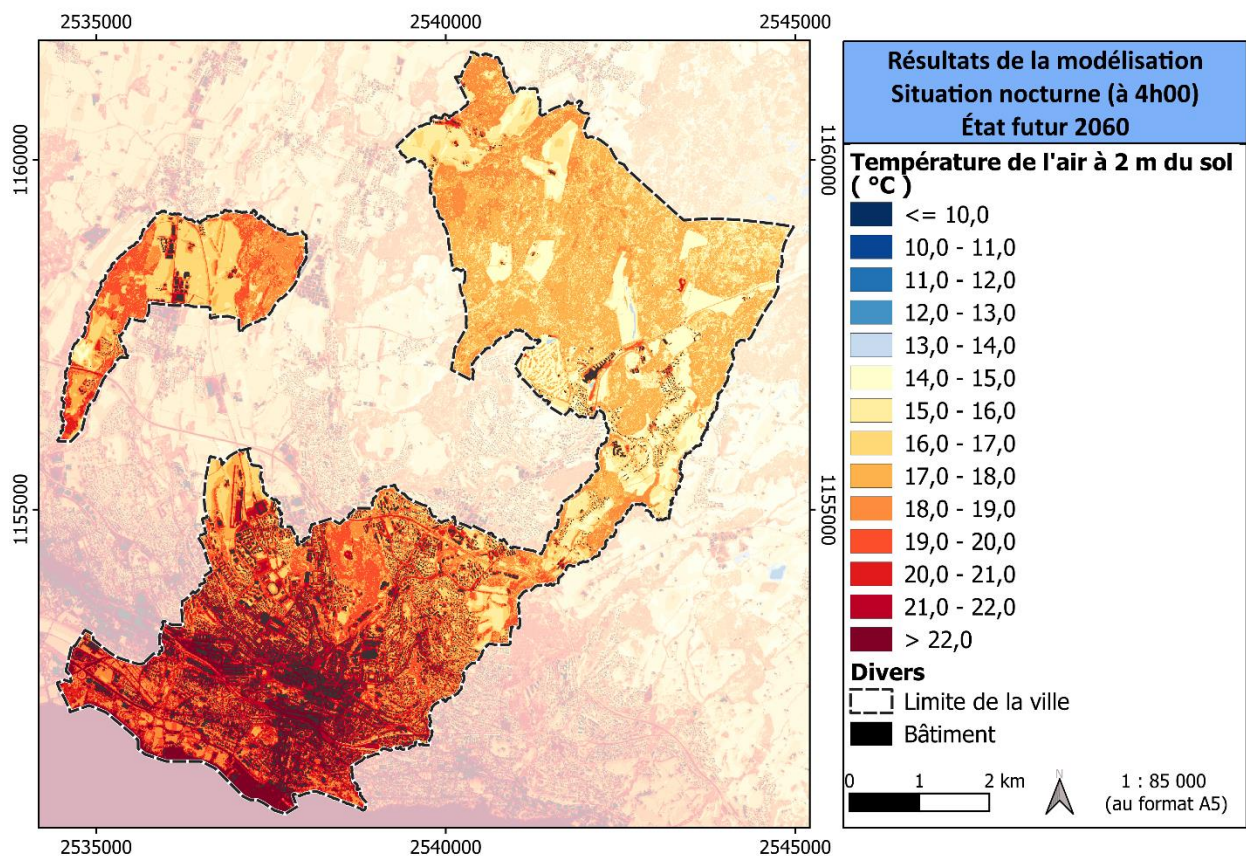


Fig. 6: Future température de l'air à 4 heures, scénario P1.

La température au-dessus des espaces verts augmente également, parfois un peu moins que le signal de changement climatique de +2,7 °C utilisé. L'air froid produit et transporté par les espaces verts est plus



chaud à l'avenir, de sorte que l'effet de refroidissement de l'air froid ne peut pas compenser l'augmentation de la température. Les effets des mesures d'une éventuelle adaptation du climat urbain aux conséquences du changement climatique sont traités plus en détail au chapitre 5. Des mesures de désimper-méabilisation (scénario SD) et la plantation d'arbres (scénario SA) ont été étudiées.

4.2 SITUATION DIURNE

Les paramètres météorologiques n'agissent pas indépendamment les uns des autres, mais dans le cadre de complexes d'effets biométéorologiques sur le bien-être de l'homme. Pour l'évaluation, on utilise des indices (grandeurs caractéristiques) qui combinent des informations sur la température et l'humidité de l'air, la vitesse du vent et les flux de rayonnement à ondes courtes et longues. Les modèles de bilan thermique calculent les échanges de chaleur d'une « personne normale » avec son environnement et peuvent ainsi évaluer la charge thermique d'une personne.

Tab. 2: Attribution de valeurs seuils de l'indice d'évaluation PET pendant les heures de jour (selon VDI 2004)

PET	Sensation thermique	Niveau de charge physiologique
4 °C	Très froid	Stress de froid extrême
8 °C	Froid	Stress de froid élevé
13 °C	Frais	Stress de froid modéré
18 °C	Légèrement frais	Stress de froid faible
20 °C	Confortable	Pas de stress thermique
23 °C	Légèrement chaud	Stress de chaleur faible
29 °C	Chaud	Stress de chaleur modéré
35 °C	Très chaud	Stress de chaleur élevé
41 °C	Extrêmement chaud	Stress de chaleur extrême

Dans le présent travail, l'indice bioclimatique PET à 14h00 est utilisé pour évaluer la situation diurne (Matzarakis & Mayer 1996). Par rapport à d'autres indices comparables, la PET a l'avantage d'être plus facile à comprendre en raison de l'unité de température. De plus, la PET est devenue une sorte de « quasi-standard » pour les spécialistes, ce qui permet de comparer les résultats avec ceux d'autres villes. Comme les autres indices biométéorologiques, la PET se réfère aux conditions climatiques extérieures et montre une forte dépendance à la température de rayonnement (Kuttler 1999). En ce qui concerne la charge thermique, il est donc surtout utilisable pour l'évaluation du séjour à l'extérieur et en journée. Pour la PET, il existe dans la directive VDI 3787, feuille 9, une échelle d'évaluation absolue qui quantifie la sensation thermique et les niveaux de charge physiologique (p. ex. stress forte de chaleur à partir de PET 35 °C ; Tab. 2). La PET est étudiée à 1,1 m du sol, car il s'agit de la hauteur pertinente du

point de vue bioclimatique (hauteur moyenne du centre du corps d'une personne).

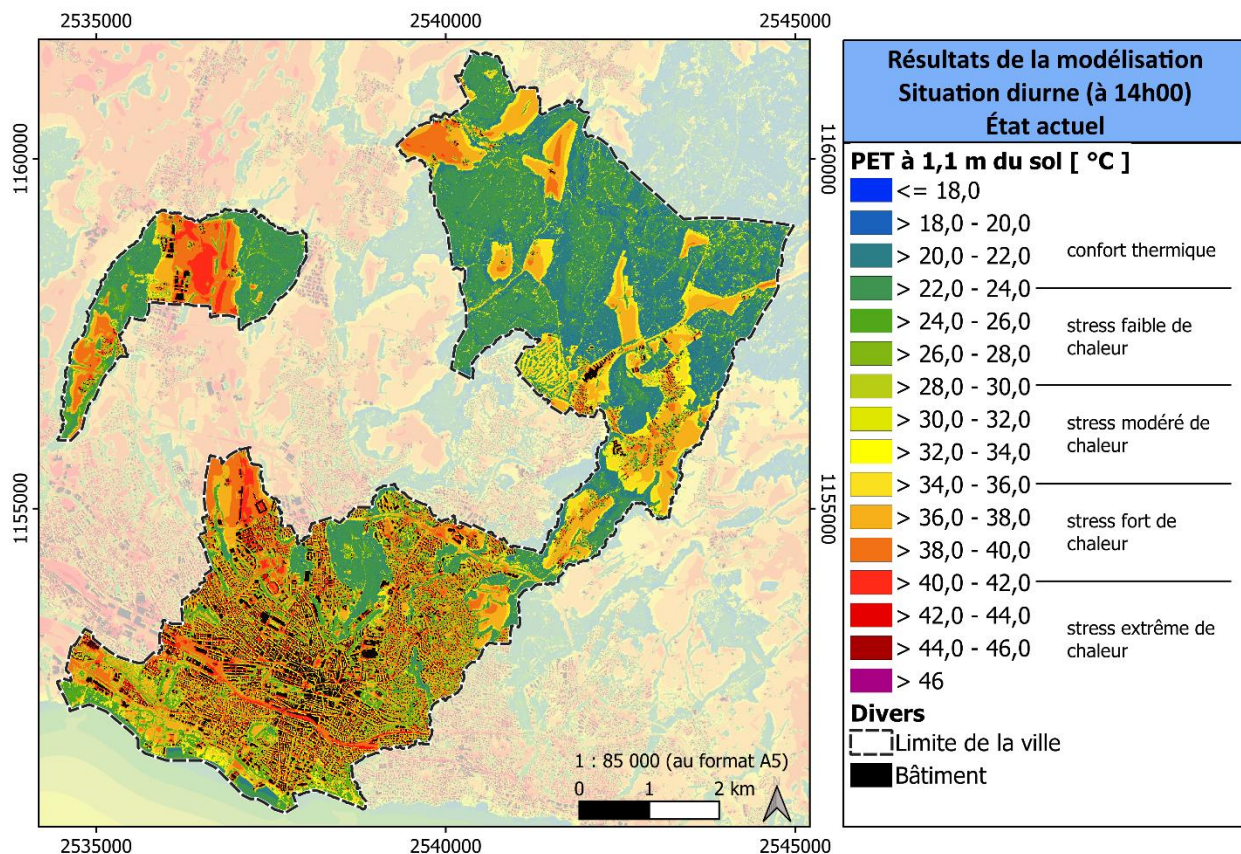


Fig. 7: Charge thermique (PET) en journée à Lausanne

En comparaison avec la température de l'air, la PET présente de plus grandes différences en ville, avec une fourchette d'environ 29 °C, allant de 16,1 à 45 °C. Les valeurs les plus basses se trouvent dans la zone forestière du Parc naturel du Jorat au nord de Lausanne qui, avec des valeurs PET de 23 °C en grande partie (*confort thermique jusqu'à stress faible de chaleur*), offre une qualité de séjour agréable en cas de situation météorologique chargée en chaleur (Fig. 7). Les parcs urbains avec de nombreux arbres, comme le Parc de Milan, affichent pendant la journée des valeurs de 23 à 25 °C au niveau des groupes d'arbres. La zone de séjour de l'homme se situe en dessous de la canopée et est donc protégée du rayonnement solaire direct, de sorte que les forêts et les peuplements d'arbres peuvent généralement servir de lieux de refuge. En outre, les forêts et les groupes d'arbres proches des villes peuvent également générer de l'air froid pendant la journée au profit des zones d'habitation voisines (non représentées ici). Sur les espaces ouverts du Parc de Milan, les valeurs peuvent atteindre 36 à 37 °C PET (*stress fort de chaleur*).

Outre les arbres, les eaux de surface ont un effet rafraîchissant pendant la journée. La PET à 1,1 m à proximité immédiate des rives du lac Léman est d'environ 21,7 à 25 °C pour une température de l'eau supposée de 20,4 °C.

Toutes les autres surfaces présentent, dans les hypothèses données d'une journée d'été autochtone (pas de couverture nuageuse, c'est-à-dire rayonnement non entravé), au moins un *stress modéré de chaleur*, la zone d'habitation étant en grande partie concernée par un *stress de chaleur fort à extrême*. Les valeurs les plus élevées se trouvent sur les surfaces imperméables des zones industrielles ou du centre-ville, comme par exemple le Théâtre de Beaulieu, Lausanne Gare, Sébeillon-Malley ou les surfaces du port. Les

places imperméables en particulier présentent également une PET supérieure à 39 °C (*stress fort de chaleur*). Les surfaces de la Cathédrale Notre-Dame, de la Place de la Riponne ou de la Place de l'Europe en sont des exemples.

Parallèlement aux zones forestières mentionnées dans le Parc naturel du Jorat, les parcs situés directement dans les zones d'habitation (par ex. Parc de Milan, Parc de Mon Repos, Parc Bourget, Mémorial 1914 - 1918) sont des lieux de refuge importants pour la population en raison de leur *stress thermique comparativement faible*.

Les cours intérieures et les rues plus verdoyantes offrent également un stress modéré de chaleur pendant la journée avec des valeurs de 25 à 28 °C PET, comme par exemple le site au nord du collège de Béthusy.

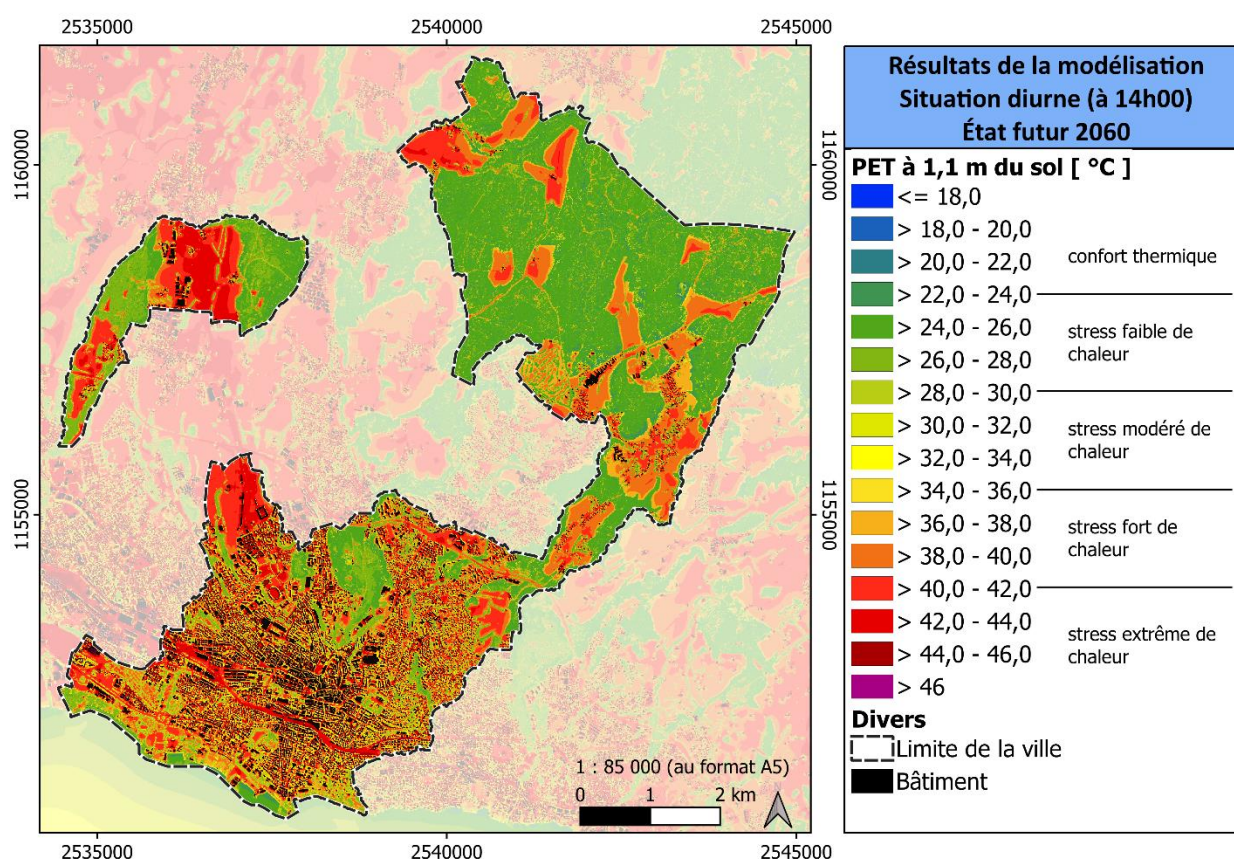


Fig. 8: Charge thermique future (PET) en journée à Lausanne, scénario P1.

Selon que les cours intérieures ou les jardins privés ont beaucoup d'arbres, un effet de refroidissement important, comparable par endroits à celui des parcs, peut également se produire pendant la journée. Un exemple positif est ici, dans le quartier de Béthusy, la cour intérieure entre le chemin de la Gottettaz et le chemin du Moléson, où l'on observe des valeurs PET d'un impact thermique faible à modéré. Des cours intérieures avec peu d'arbres se trouvent par exemple au Mont d'Or sur le chemin des Fougères. Ces zones résidentielles présentent une PET plus élevée, supérieur à 38 °C, ce qui correspond à un *stress fort de chaleur à stress extrême de chaleur*. Dans le scénario P1, pour lequel un signal de changement climatique supplémentaire de +2,7 K a été supposé, la PET augmente sur l'ensemble du territoire, mais pas de manière uniforme (Fig. 8).

Les zones forestières au nord du Parc naturel du Jorat ont été calculées avec des valeurs PET généralement supérieures à 24 °C, ce qui correspond à un stress faible de chaleur. Dans le changement climatique, les forêts ne se réchauffent pas autant pendant la journée que les surfaces imperméables, par exemple. On voit ici que certaines rues (nord de la rue du Petit-Chêne, rue de Genève) et surfaces de la Gare de Lausanne présentent des valeurs PET de plus de 44 °C, ce qui correspond à un stress extrême de chaleur. Certaines cours intérieures, comme celles de l'avenue de Mon-Loisir et du chemin Eugène-Grasset, affichent même 46 °C. Cela s'explique surtout par le haut degré d'imperméabilisation et le peu d'ombre dans les cours intérieures. Parfois, la charge thermique augmente également fortement sur les pelouses ou les terrains de sport par rapport à la situation de référence (> +3K ; pelouses du Parc de Milan, Stade de Coubertin), qui présentent désormais un stress extrême de chaleur. La pratique du sport en journée n'est donc plus recommandée.

4.3 CARTES

Pour la représentation des résultats de la situation actuelle (P0) et du scénario P1, qui a été augmenté du signal de changement climatique de +2,7 K, les 12 cartes suivantes ont été produites :

Tab. 3: Cartes transmises pour la situation actuelle (P0) et l'avenir avec le changement climatique (P1).

P1 : Situation de référence avec réchauffement climatique (= avenir 2060)

	Carte	Description brève
Diurne	01_P0_PET_géométrie_de_base_rev00.png	Valeur moyenne de la température physiologique équivalente à 14 heures à 1,1 m au-dessus du sol par unité d'utilisation. Situation : état actuel Type de données représenté : géométrie de base Résolution spatiale : Domaines fonctionnels/unités d'utilisation
	01_P0_PET_raster_rev00.png	Résultat du modèle de raster de la température physiologiquement équivalente à 14 heures à 1,1 m au-dessus du sol Situation : état actuel Type de données représentées : raster Résolution spatiale : 5 m
	01_P1_PET_géométrie_de_base_rev00.png	Valeur moyenne de la température physiologique équivalente à 14 heures à 1,1 m au-dessus du sol par unité d'utilisation. Situation : état futur 2060 Type de données : Géométrie de base Résolution spatiale : Domaines fonctionnels/unités d'utilisation
	01_P1_PET_raster_rev00.png	Résultat du modèle de raster de la température physiologique équivalente à 14h à 1,1m au-dessus du sol Situation : état futur 2060 Type de données représentées : raster Résolution spatiale : 5 m
Nocturne	01_P0_T04_géométrie_de_base_rev00.png	Moyenne de la température de l'air nocturne à 4 heures à 2 m au-dessus du sol par unité d'utilisation. Situation : état actuel Type de données : géométrie de base Résolution spatiale : domaines fonctionnels/unités d'utilisation
	01_P0_T04_raster_rev00.png	Résultat du modèle de raster de la température de l'air nocturne à 4 heures à 2 m au-dessus du sol Situation : état actuel Type de données représentées : raster



	Résolution spatiale : 5 m
01_P1_T04_géométrie_de_base_rev00.png	Moyenne de la température de l'air nocturne à 4 heures à 2 m au-dessus du sol par unité d'utilisation. Situation : état futur 2060 Type de données : géométrie de base Résolution spatiale : domaines fonctionnels/unités d'utilisation
01_P1_T04_raster_rev00.png	Résultat du modèle de grille de la température de l'air nocturne à 4 heures à 2 m au-dessus du sol Situation : état futur 2060 Type de données représentées : raster Résolution spatiale : 5 m
01_P0_KVSD_rev00.png	Résultat du modèle de raster du débit d'air froid nocturne à 4 heures à 2 m au-dessus du sol Situation : état actuel Type de données représentées : raster Résolution spatiale : 5 m
01_P1_KVSD_rev01.png	Résultat du modèle de raster du débit d'air froid nocturne à 4 heures en $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ Situation : état futur 2060 Représenté Type de données : raster Résolution spatiale : 5 m
01_P0_Vent_rev00.png	Résultat du modèle de raster de la vitesse du vent nocturne à 4 heures en m/s Situation : état actuel Type de données représentées : raster Résolution spatiale : 5 m
01_P1_Vent_rev01.png	Résultat du modèle de raster de la vitesse du vent nocturne à 4 heures en m/s Situation : état futur 2060 Type de données représentées : raster Résolution spatiale : 5 m



5. Études de cas et conseils de planification

Le scénario de désimperméabilisation (SD) et le scénario d'arborisation (SA) étudient l'effet des mesures d'adaptation du climat urbain (chapitres 3.4 et 3.5). Les deux scénarios ont été modélisés avec les mêmes conditions météorologiques que le scénario de changement climatique P1 (voir Tab. 1). Il est ainsi possible d'évaluer les mesures d'adaptation climatique urbaine au changement climatique en fonction de leurs effets individuels. On considère les différences entre chaque mesure en comparaison avec la état actuel (P0) et le scénario de changement climatique (P1). La différence entre le scénario de mesures et la état actuel permet de déterminer si l'augmentation de la température due au changement climatique peut être compensée. La différence entre les scénarios de mesures et le scénario de changement climatique (P1) montre l'ampleur de l'impact des mesures, c'est-à-dire si elles ont généralement un effet positif. De plus, cette différence permet de montrer l'ampleur de la mesure.

Dans la suite de ce chapitre, des exemples d'effets de mesures sont présentés. Les cartes de différences sont disponibles sous deux formes : Sous forme de résultat de raster et agrégé à la géométrie de base. Les résultats raster montrent les zones spatiales concrètes dans lesquelles la mesure agit. Les résultats sont ici liés à certaines incertitudes, car la mesure a été répartie automatiquement de manière aléatoire sur les données d'entrée et n'est pas réalisable en l'état dans la réalité. Il n'en résulte pas toujours des structures proches de la réalité, comme des pelouses avec des groupes d'arbres, mais des modèles très hétérogènes des classes de modèles qui se succèdent. Ces modèles hétérogènes se répercutent sur les résultats du modèle, de sorte que les hypothèses de végétalisation sont plutôt sous-estimées - et les nouvelles constructions plutôt surestimées dans leur effet (dans le projet de la ville de Lausanne, seule la désimperméabilisation et donc la végétalisation sont prises en compte). C'est pourquoi les résultats sont également disponibles pour la géométrie de base, afin de réduire les incertitudes liées à l'approche de traitement des données d'entrée, puisqu'une valeur moyenne est calculée pour chaque élément de la géométrie de base. En outre, la géométrie de base permet d'analyser les mesures d'adaptation en fonction de certaines utilisations, par exemple pour les blocs de construction habités, les sections de route ou les espaces verts. Les résultats sont également présentés en distinguant les situations de jour et de nuit.

5.1 MESURE : DÉSIMPERMÉABILISATION

Pour le scénario de désimperméabilisation (SD), les surfaces imperméables telles que les parkings ont été désimperméabilisées à 60%. Pour le calcul du modèle, les pelouses, les arbres et les surfaces partiellement imperméabilisées (sol non naturel) ont été considérés comme des zones imperméables dans la réalité (voir chapitre 3.4).

Une mesure de désimperméabilisation entraîne une réduction de l'accumulation de chaleur par l'évaporation à travers la végétation, ce qui crée une fraîcheur par évaporation. En outre, la désimperméabilisation contribue à la production locale d'air froid, en particulier la nuit.

Un autre effet positif de la désimperméabilisation est que les précipitations peuvent s'infiltrer et ainsi être retenues. Cela crée des synergies avec la gestion des eaux pluviales, en réduisant le ruissellement en surface. En outre, les surfaces désimperméabilisées sont souvent plus belles ou plus agréables aux yeux de la population. L'habitat gagne en esthétique et offre, le cas échéant, des possibilités de détente sur place. De nouveaux espaces de vie sont créés, qui peuvent idéalement être mis en réseau avec d'autres.



Fig. 9: Un bon exemple : une surface désimperméabilisée à Lüneburg. (Photo : Elke Hipler)

SITUATION NOCTURNE

La Fig. 9 montre un bon exemple de l'effet des mesures de désimperméabilisation pour le Chemin des Cèdres / du Frêne. Dans les arrière-cours, le scénario SD prévoit plus de gazon et de sol non naturel, et quelques arbres ont été plantés. La différence SD - P0 montre que la mesure ne peut pas compenser complètement l'augmentation de la température due au changement climatique pour le bloc (+2,7 °C de signal de changement climatique). Les résultats agrégés montrent une augmentation de la température de plus de 2 °C pour le bloc dans l'hypothèse de la mesure de désimperméabilisation. Les résultats de la grille pour la différence SD - P0 montrent un résultat plus nuancé. Les pixels bleus montrent une augmentation maximale de la température de +2,0 °C au Chemin du Frêne, ainsi que quelques baisses de température allant jusqu'à -1 °C. Les pixels bleus montrent une réduction de la température de -1 °C au Chemin du Frêne.

Dans la différence SD - P1, on peut voir le seul effet de la mesure. La représentation agrégée montre que la mesure fait baisser la température de -0,7 °C dans le bloc. Les résultats de la grille sur la gauche SD - P1 montrent là encore une structure plus différenciée et hétérogène. C'est au Chemin du Frêne que les baisses de température sont les plus importantes, avec un maximum de -2,9 °C. Ici, des surfaces désimperméabilisées cohérentes ont été créées, qui produisent de l'air froid et contribuent à refroidir les couches d'air situées au-dessus. Cet effet de mesure agit clairement dans le bloc par ailleurs fortement imperméabilisé pour l'amélioration de la situation nocturne. Non seulement à l'endroit de la mesure, mais au-delà. Le refroidissement des surfaces qui ne sont pas désimperméabilisées s'élève à environ -0,3 °C. L'effet de l'ensemble des mesures de désimperméabilisation sur toute la ville est illustré dans la Fig. 11.

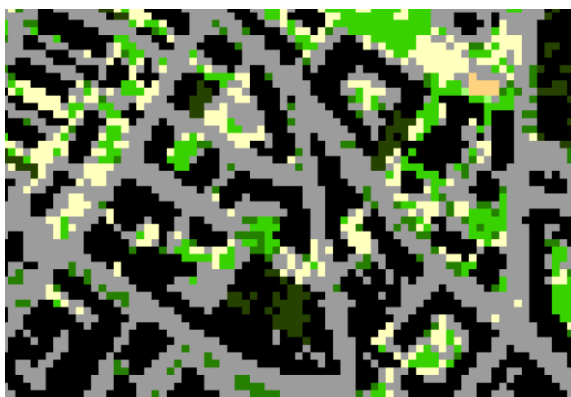
Chem. des Cèdres / du Frêne



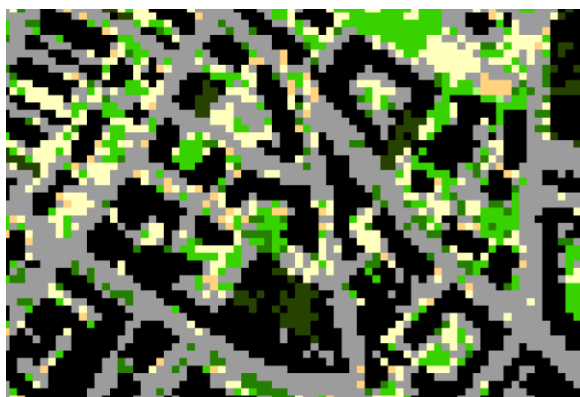
Occupation des sols

7 - Voies ferrées	25 - Arbre sur gazon
9 - Plein champ, gazon	26 - Arbre sur un sol non naturel
14 - Eaux de surface	28 - Éboulis, sable
16 - Roche nue	
20 - Bâtiment	
21 - Bâtiment Toiture verte	
22 - Surface imperméable	
23 - Sol non naturel, partiellement imperméable	
24 - Arbre sur une surface imperméable	

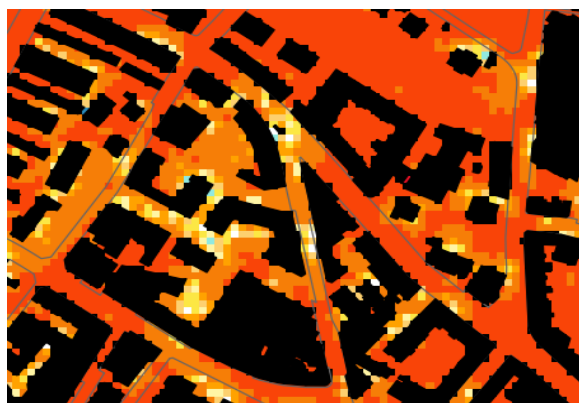
Occupation de sols – État actuel (P0) et Changement climatique (P1)



Occupation de sols – Scénario Désimperméabilisation (SD)



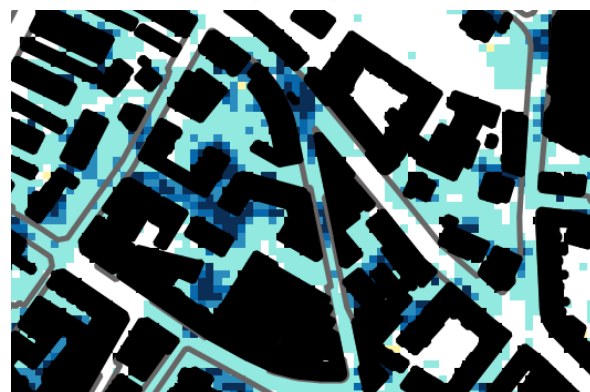
Différence SD – P0 (raster)



Différence SD – P0 (agrégé)



Différence SD – P1 (raster)



Différence SD – P1 (agrégé)



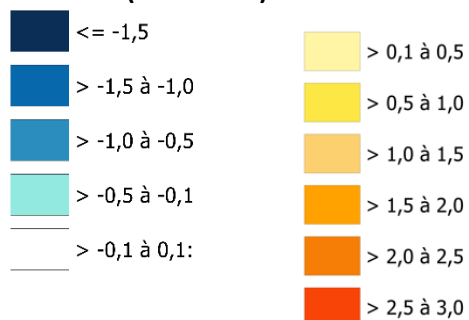
**T04 en °C (différence)**

Fig. 10: Exemple de bonnes pratiques. Résultats : Scénario « Désimperméabilisation » (situation nocturne)

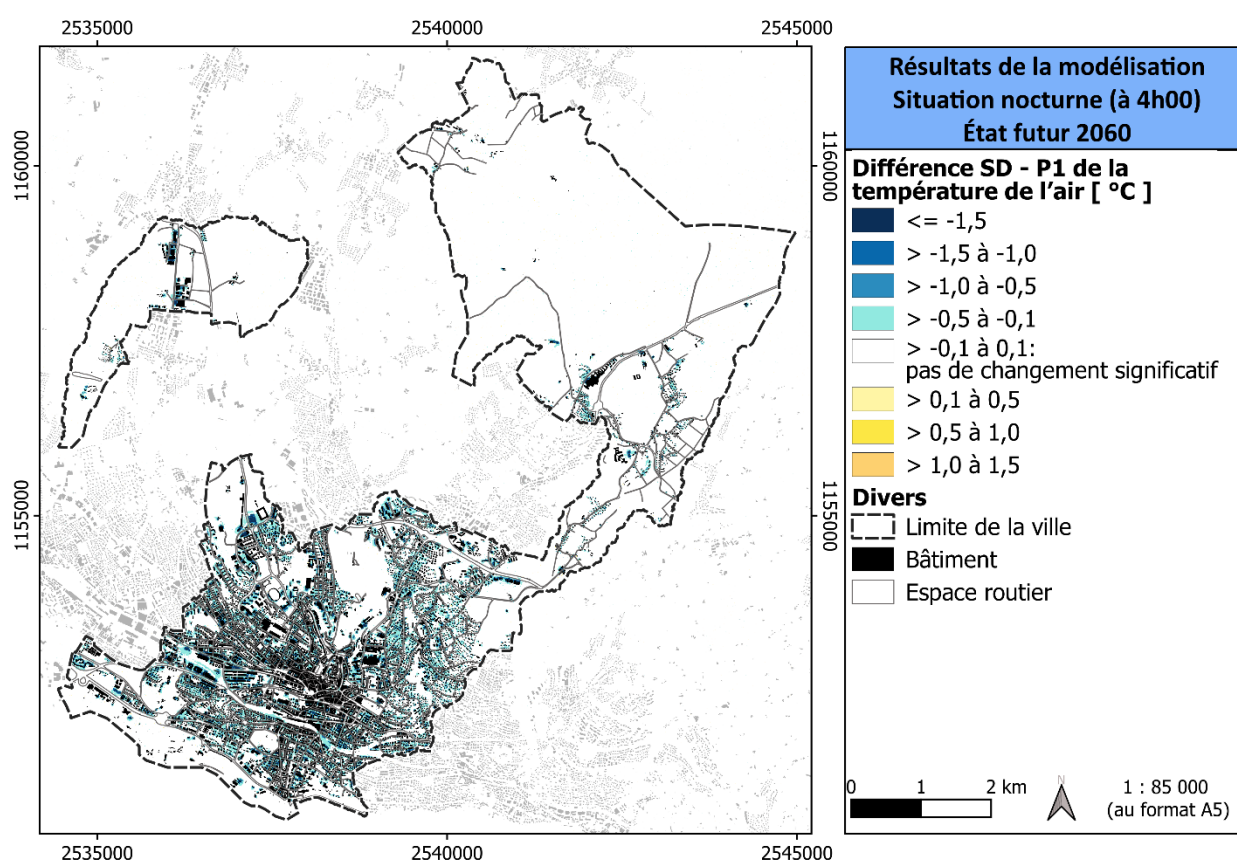


Fig. 11: Différence entre les températures nocturnes du scénario « Désimperméabilisation » (SD) et futur sans change de l'occupation de sols (P1).

SITUATION DIURNE

Pour la situation de jour, l'exemple de bonnes pratiques « Parking du Stade de la Tuilière » est présenté (Fig. 12). Dans le scénario de désimperméabilisation, la grande surface de parking est transformée en surfaces partiellement imperméabilisées et en surfaces avec un revêtement perméable à l'eau, et des arbres sont plantés.

L'effet positif de la mesure est déjà visible sur les cartes de différence SD - P0. L'augmentation de la température due au changement climatique peut être entièrement compensée sur les places de parc et entraîne en outre une amélioration allant jusqu'à -4,3 °C PET sur le parking (SD - P0, agrégé). Les résultats de la grille montrent à nouveau une image plus hétérogène. On constate clairement le fort effet de refroidissement des arbres pour la situation diurne. Au maximum, les arbres réduisent la PET de -11,9 °C. L'ombre portée crée un climat de séjour agréable avec une faible charge thermique. Dans l'état actuel, la charge thermique sur les places de parc est forte pour une journée d'été autochtone.

La différence SD - P1 montre l'efficacité de la mesure. La désimperméabilisation n'a pas seulement un effet sur le parking, mais aussi au-delà, à nouveau très fortement grâce aux arbres. La surface située à l'est du parking, le long du Stade, en profite également avec une réduction moyenne de -0,3 °C PET.

Parking du Stade de la Tuilière



Occupation des sols

 7 - Voies ferrées	 25 - Arbre sur gazon
 9 - Plein champ, gazon	 26 - Arbre sur un sol non naturel
 14 - Eaux de surface	 28 - Éboulis, sable
 16 - Roche nue	
 20 - Bâtiment	
 21 - Bâtiment Toiture verte	
 22 - Surface imperméable	
 23 - Sol non naturel, partiellement imperméable	
 24 - Arbre sur une surface imperméable	

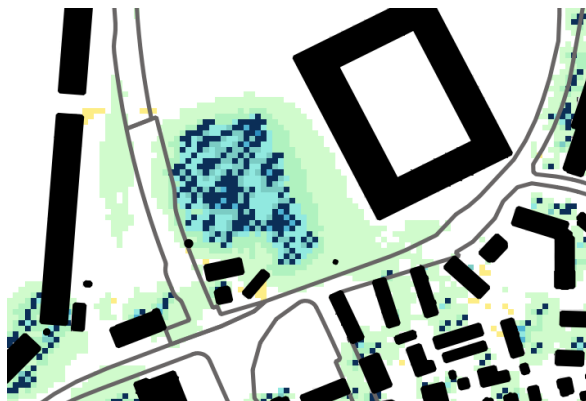
Occupation de sols – État actuel (P0) et Changement climatique (P1)



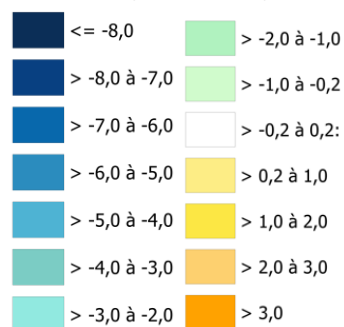
Différence SD – P0 (raster)



Différence SD – P1 (raster)



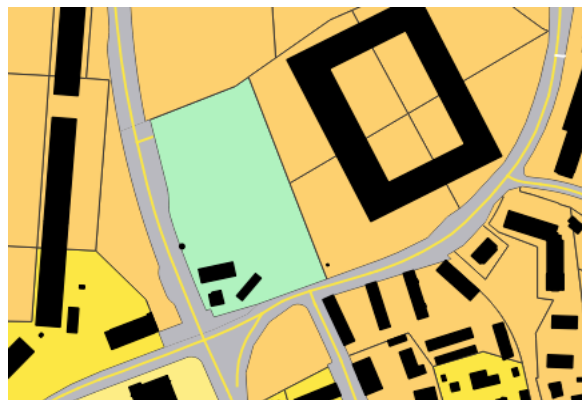
PET en °C (différence)



Occupation de sols – Scénario Désimperméabilisation (SD)



Différence SD – P0 (agrégé)



Différence SD – P1 (agrégé)



Fig. 12: Exemple de bonnes pratiques. Résultats : Scénario « Désimperméabilisation » (situation diurne)



CONCLUSION

La mesure de désimperméabilisation ne parvient pas à compenser complètement le changement climatique dans la zone urbaine (SD - P0).

Cependant, la mesure a un effet positif significatif dans la zone urbaine (SD - P1, les valeurs de différence sont $< -0,1$ °C la nuit ou $< -0,2$ °C PET le jour) pour les types d'utilisation suivants :

- Sur 1 % (nuit) et 2 % (jour) des espaces verts
- Sur 70 % (nuit) et 73 % (jour) des surfaces bâties
- Sur 97 % (nuit) et 97 % (jour) des surfaces routières.

5.2 MESURE : ARBORISATION

Pour le scénario d'arborisation (SA), il a été simulé que la proportion d'arbres dans la ville augmente jusqu'à 40 % (voir chapitre 3.5). Pour ce faire, la croissance des arbres existants a été supposée en augmentant la taille de leur couronne. De plus, de nouveaux arbres ont été supposés pour ce scénario.

L'augmentation de la proportion d'arbres entraîne une réduction de l'accumulation de chaleur dans les matériaux imperméables en raison de l'ombre portée par la canopée des arbres. L'ombrage réduit ainsi la charge thermique due au rayonnement solaire direct pendant la journée. Les rues, les pistes cyclables et piétonnes ou les places (de stationnement) ombragées stockent moins de chaleur que les surfaces imperméabilisées exposées au rayonnement solaire. En cas d'ombrage sur une grande surface, l'effet d'îlot de chaleur nocturne et donc la charge thermique des quartiers d'habitation voisins peuvent être réduits.

Parallèlement à leur potentiel de réduction de la charge thermique diurne et nocturne (ombrage, évaporation, etc.), les arbres (et les arbustes) situés dans les rues jouent un rôle de dépôt et de filtrage des polluants atmosphériques, améliorant ainsi la qualité de l'air. Lors de la mise en œuvre de mesures appropriées, il convient de veiller à ce que l'échange d'air (vertical) soit maintenu afin d'évacuer les polluants et de garantir le rayonnement nocturne. Il convient donc d'éviter les canopées fermées, en particulier dans le cas de petites sections de route et d'un trafic motorisé élevé. Dans le cas des routes à plusieurs voies, les bandes centrales végétalisées se prêtent à la plantation d'arbres. Aux abords des voies de circulation, les arbres ne doivent pas constituer une barrière pour les flux d'air froid et d'air frais et ne doivent donc pas être plantés de manière transversale et dense par rapport au sens d'écoulement. La préférence doit être donnée aux arbres qui ne présentent pas d'émissions élevées de substances organiques volatiles contribuant à la formation d'ozone. Pour les lieux situés à proximité immédiate des bâtiments, les arbres à feuilles caduques à grande couronne sont préférables aux conifères, car ils ont moins d'influence sur le rayonnement en hiver et peuvent ainsi entraîner une réduction de l'énergie de chauffage et donc des coûts de chauffage et des émissions de gaz à effet de serre. Dans la perspective du changement climatique, il convient de veiller à la tolérance à la chaleur et à la sécheresse lors du choix des espèces pour les nouvelles plantations ou les plantations de remplacement (cf. Stadt Jena 2016).

SITUATION NOCTURNE

La Fig. 13 présente les résultats d'un exemple de bonnes pratiques pour la Place de la Riponne. La place est actuellement fortement imperméabilisée. Un groupe d'arbres se trouve dans la partie nord de la place. Pour le scénario SA, on a principalement supposé des arbres sur une surface imperméable, et seulement quelques arbres sur gazon. Les arbres sont maintenant répartis sur toute la place.

Dans la différence SA - P0, les résultats de la grille à gauche montrent une augmentation de la température de +3,6 °C et un effet moyen de +2,5 °C sur la place. Cela signifie que la mesure ne peut pas compenser l'augmentation de la température due au changement climatique, ou seulement dans une très faible mesure et très localement. Les températures nocturnes augmentent en partie sur les emplacements des arbres. Cela s'explique par le fait que le rayonnement thermique de la surface terrestre est entravé par la canopée des arbres.

La différence SA - P1 représente le degré d'efficacité des mesures. En moyenne, les plantations d'arbres réduisent la température de -0,2 °C (agrégé), au maximum de -0,9 °C. Les résultats de la grille montrent une image assez homogène, tout comme dans la figure agrégée. Les baisses de température sont généralement très faibles pendant la nuit. Ce n'est qu'à proximité immédiate des bâtiments que les plantations d'arbres entraînent des réductions de température plus importantes, allant jusqu'à -0,6 °C.

En conclusion, on peut constater que la mesure de plantation d'arbres ne refroidit pas autant la situation nocturne que les mesures de désimperméabilisation (voir chapitre 5.1, section situation nocturne).

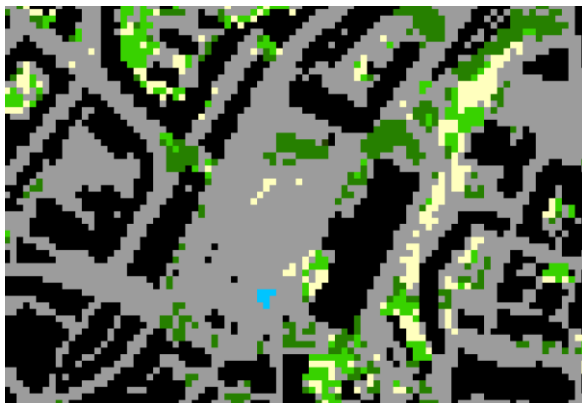
Place de la Riponne



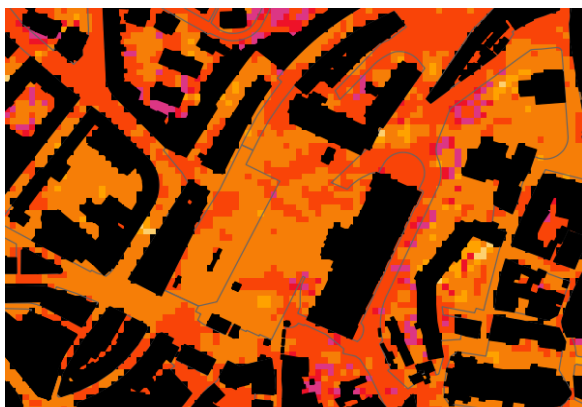
Occupation des sols

- 7 - Voies ferrées
- 9 - Plein champ, gazon
- 14 - Eaux de surface
- 16 - Roche nue
- 20 - Bâtiment
- 21 - Bâtiment Toiture verte
- 22 - Surface imperméable
- 23 - Sol non naturel, partiellement imperméable
- 24 - Arbre sur une surface imperméable
- 25 - Arbre sur gazon
- 26 - Arbre sur un sol non naturel
- 28 - Éboulis, sable

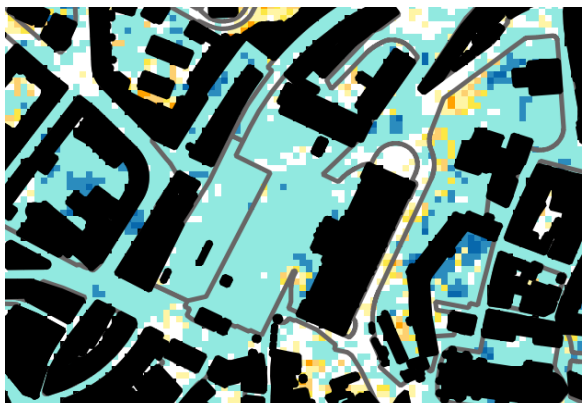
Occupation de sols – État actuel (P0) et Changement climatique (P1)



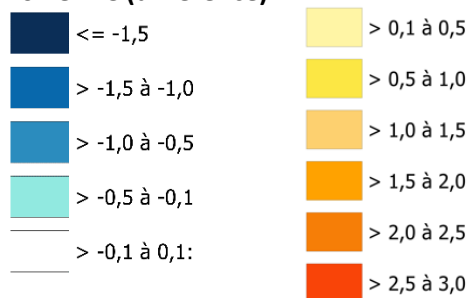
Différence SA – P0 (raster)



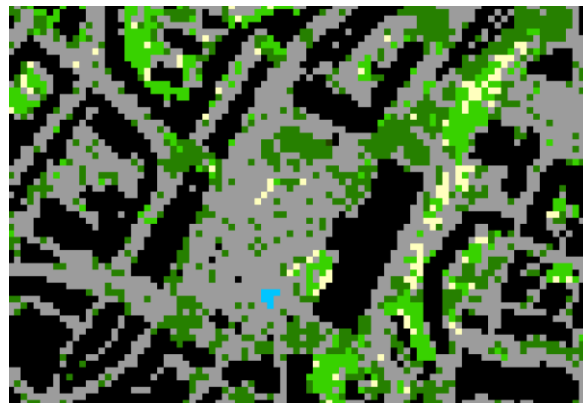
Différence SA – P1 (raster)



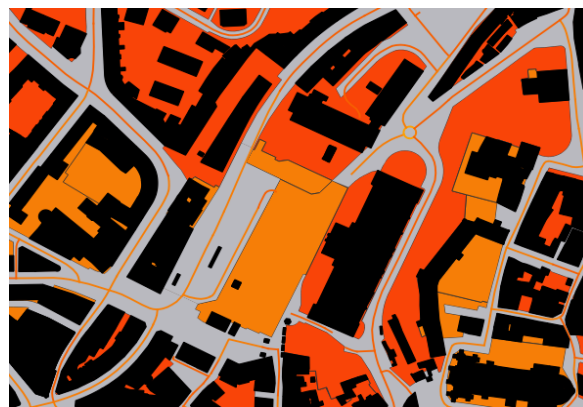
T04 en °C (différence)



Occupation de sols – Scénario Arborisation (SA)



Différence SA – P0 (agrégé)



Différence SA – P1 (agrégé)



Fig. 13: Exemple de bonnes pratiques. Résultats : Scénario « Arborisation » (situation nocturne)

SITUATION DIURNE

Pour la situation diurne, l'exemple de bonnes pratiques « Lausanne-Flon, Place de l'Europe, Place des Pionnières » est présenté (Fig. 14). Les deux places de la rue du Grand-Pont sont fortement imperméabilisées, tandis que la Place des Pionnières présente des groupes d'arbres isolés. Dans le scénario de mesures SA, d'autres arbres sur une surface imperméable sont ajoutés sur les deux places.

Dans la différence SA - P0, on peut voir la diminution des PET pour les tronçons routiers (figure agrégée). Sur la Place de Pionnières, les valeurs PET diminuent. La diminution la plus importante est enregistrée au nord de la place, avec une moyenne de $-4,4$ °C PET. Sur la Place de l'Europe, on observe à la fois des augmentations et des diminutions des valeurs PET des tronçons de rue. Avec $-4,2$ °C, les baisses sont moins importantes que sur la Place des Pionnières. Les augmentations se situent à l'ouest et au nord de la place, avec jusqu'à $+2,9$ °C. Dans le résultat de la grille située à gauche, on observe des structures plus hétérogènes pour les deux places. Les emplacements des arbres sont ici clairement reconnaissables grâce aux pixels de couleur bleue. Au maximum, les arbres se refroidissent jusqu'à $-9,7$ °C PET par jour. L'augmentation de la température due au changement climatique peut être surcompensée en journée sur les sites arborés.

Cela est également visible sur les cartes de différence SA - P1, qui montrent l'effet de la mesure en soi. La mesure réduit la PET de $-12,4$ °C au maximum (à proximité immédiate des bâtiments). C'est à proximité immédiate des bâtiments que la mesure est la plus efficace (surtout sur les façades sud et ouest), car ici, en plus de l'ombrage des surfaces imperméables sur la place, l'enveloppe du bâtiment est ombragée et donc moins de rayonnement solaire est stocké en chaleur et donc moins de chaleur est émise par le bâtiment pendant la nuit. L'effet de cette mesure sur toute la ville est illustré dans la Fig. 15.

La mesure n'a pas seulement un effet sur le lieu de plantation des arbres, mais aussi sur les surfaces adjacentes des places. Celles-ci sont également abaissées jusqu'à -3 °C PET. La charge thermique extrême sur la Place de l'Europe est ainsi réduite en grande partie à une charge thermique forte grâce à la plantation d'arbres. Comme la Place des Pionnières présente déjà des groupes d'arbres dans son état actuel, la charge thermique y est modérée dans l'état actuel, sinon elle est forte. Ici, la plantation d'arbres permet d'obtenir une charge thermique modérée sur toute la surface.

En résumé, on peut constater que la mesure de plantation d'arbres refroidit et améliore plus la PET en journée que les mesures de désimperméabilisation (voir chapitre 5.1, section situation diurne).

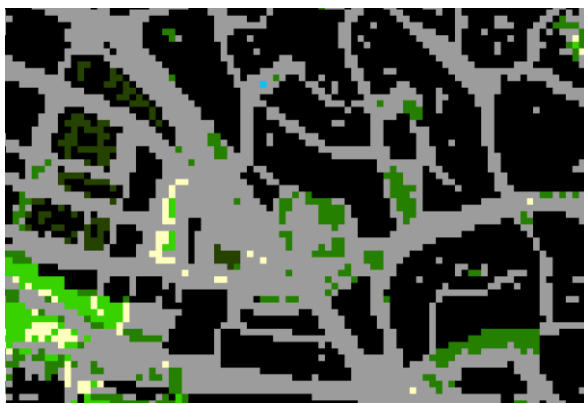
Lausanne-Flon, Place de l'Europe, Place des Pionnières



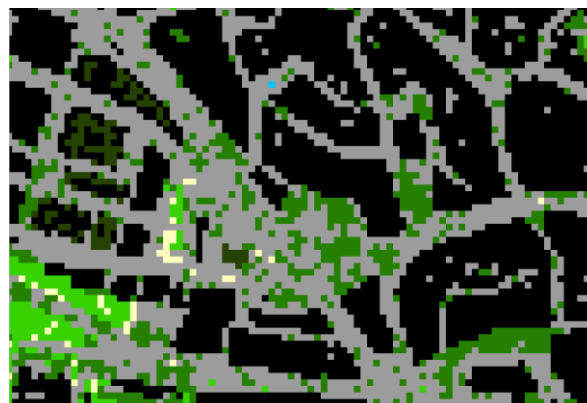
Occupation des sols

7 - Voies ferrées	25 - Arbre sur gazon
9 - Plein champ, gazon	26 - Arbre sur un sol non naturel
14 - Eaux de surface	28 - Éboulis, sable
16 - Roche nue	
20 - Bâtiment	
21 - Bâtiment Toiture verte	
22 - Surface imperméable	
23 - Sol non naturel, partiellement imperméable	
24 - Arbre sur une surface imperméable	

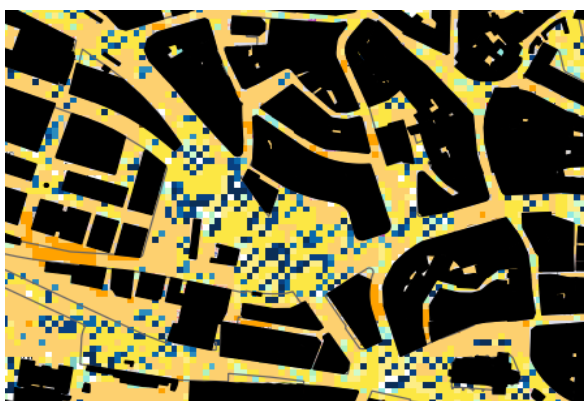
Occupation de sols – État actuel (P0) et Changement climatique (P1)



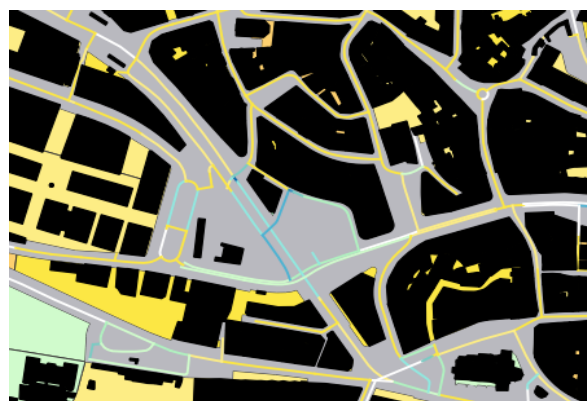
Occupation de sols – Scénario Arborisation (SA)



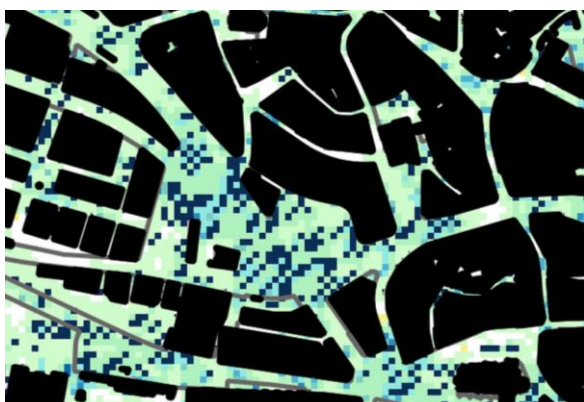
Différence SA – P0 (raster)



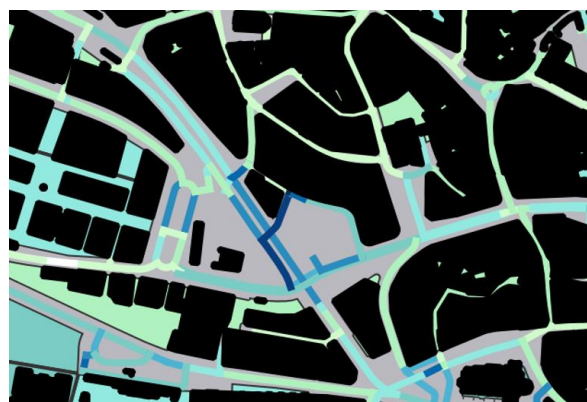
Différence SA – P0 (agregé)



Différence SA – P1 (raster)



Différence SA – P1 (agregé)



PET en °C (différence)

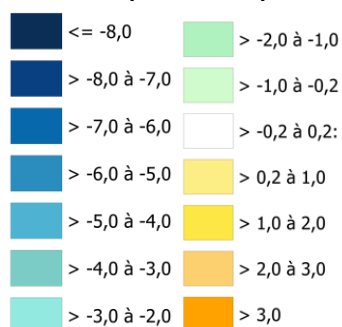


Fig. 14: Exemple de bonnes pratiques. Résultats : Scénario « Arborisation » (situation diurne)

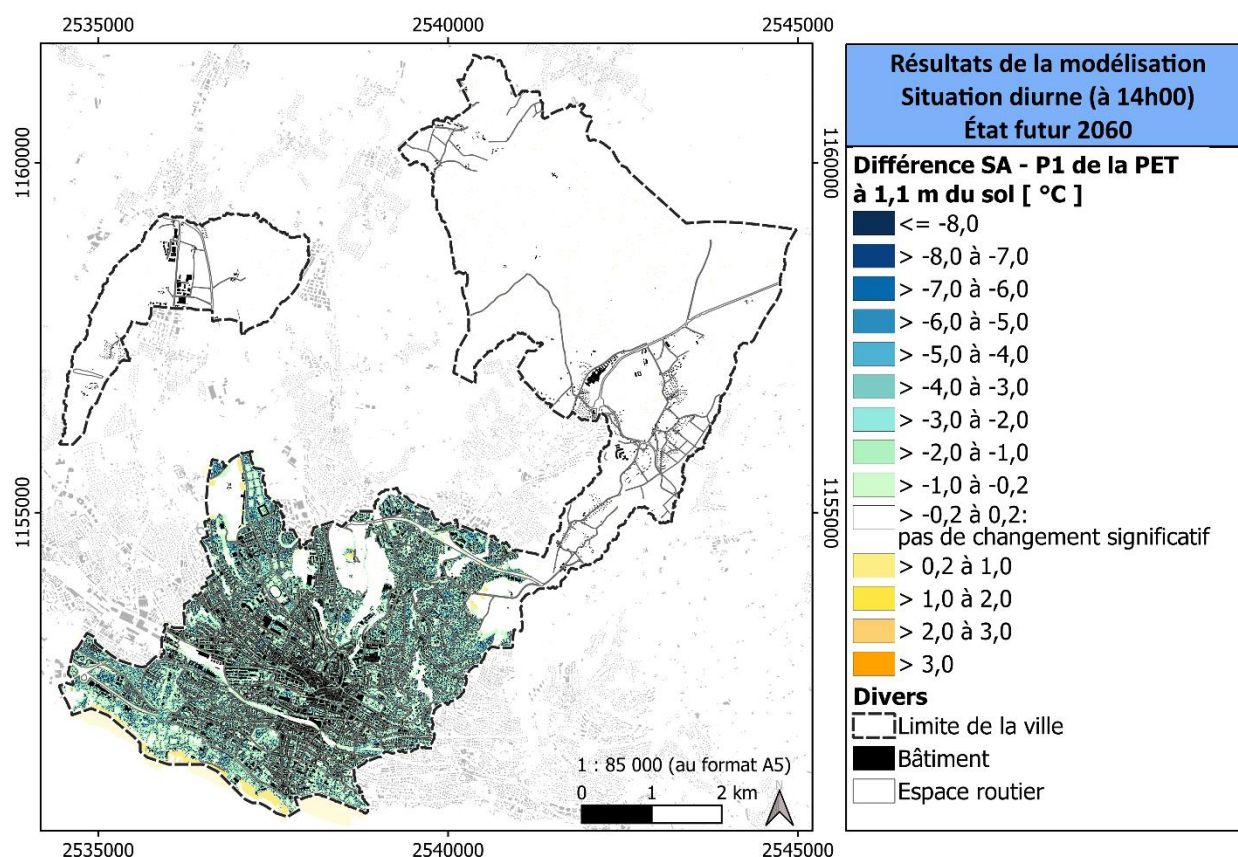


Fig. 15: Différence entre la PET du scénario « Arborisation » (SA) et futur sans change de l'occupation de sols (P1).

CONCLUSION

La mesure de plantation d'arbres permet de compenser partiellement le changement climatique dans la zone urbaine (SA - P0, les valeurs de différence sont < 0,1 °C la nuit ou < 0,2 °C PET le jour (plus frais et identique)) :

- Sur 0 % (nuit) et 7 % (jour) des espaces verts
- Sur 0 % (nuit) et 57 % (jour) des surfaces bâties
- Sur 0 % (nuit) et 28 % des surfaces routières.

La mesure a un effet positif significatif dans la zone urbaine (SA - P1, les valeurs de différence sont < -0,1 °C la nuit ou < -0,2 °C PET le jour) :

- Sur 2 % (nuit) et 13 % (jour) des espaces verts
- Sur 13 % (nuit) et 75 % (jour) des surfaces bâties
- Sur 27 % (nuit) et 63 % (jour) des surfaces routières.



5.3 INDICATIONS CONCERNANT L'ÉCHANGE D'AIR

En raison de leur rugosité aérodynamique élevée, les grandes agglomérations agissent comme des obstacles à l'écoulement de l'air, de sorte que la ventilation du corps urbain est réduite. L'évacuation des masses d'air surchauffées et chargées de polluants dans les canyons urbains peut être nettement limitée en fonction du type et de la densité de construction.

Les obstacles à l'écoulement de l'air, tels que les bâtiments, peuvent provoquer au vent des accumulations d'air froid importantes. Si des volumes d'air plus importants passent au-dessus ou autour de ces obstacles, il se produit sous le vent des réductions de vitesse à proximité du sol, qui peuvent être liées à des déplacements verticaux ou horizontaux des maxima d'écoulement. La profondeur de pénétration de l'air froid dans les zones bâties dépend donc de la taille et de la structure des agglomérations ainsi que de la densité des constructions, mais aussi du dégagement de chaleur anthropique et de la quantité d'air froid entrant. En outre, l'air froid se réchauffe lorsqu'il s'écoule sur un sol imperméable sous forme de routes, de chemins piétonniers, de pistes cyclables ou de voies ferrées.

Outre les bâtiments, les arbres constituent également des obstacles à l'écoulement de l'air froid et à la ventilation. Dans la zone des voies de circulation, les arbres ne devraient pas constituer une barrière et ne devraient donc pas être plantés perpendiculairement et à proximité du sens d'écoulement, mais plutôt dans le sens de l'écoulement, à une certaine distance (espaces).

Les petits espaces verts, dont font également partie les surfaces de la mesure de désimperméabilisation, peuvent apporter un soulagement local en faisant profiter les constructions environnantes de leur production d'air froid et d'un écoulement à petite échelle. Ce phénomène est visible dans les jardins et les cours intérieures végétalisés des scénarios de mesures, en particulier lorsque ceux-ci se trouvent à proximité de surfaces fortement surchauffées. Les espaces verts ne réchauffent pas l'air froid qui s'y écoule.

La dynamique de l'air froid ne change pas de manière significative sous l'effet du changement climatique par rapport à l'état actuel - on n'observe pas de changement généralisé du débit d'air froid pour ce paramètre. L'air froid est plus chaud en raison du changement climatique. Les changements dans le champ d'écoulement de l'air froid se produisent principalement à proximité des mesures, car les nouveaux arbres constituent un obstacle à l'écoulement et ralentissent ou dévient ainsi les vents.



5.4 CARTES

Pour la présentation des résultats des cartes de mesures et des différences résultant de la comparaison entre la état actuel (P0) et le scénario de changement climatique (P1), les 24 cartes suivantes ont été créées et transmises (Tab. 4).

Tab. 4: Cartes transmises pour les scénarios de mesures Désimperméabilisation (SD) et Arborisation (SA).

P0 : Situation de référence sans réchauffement climatique (= état actuel)

P1 : Avenir avec réchauffement climatique (= avenir 2060)

SD: Scénario Désimperméabilisation avec réchauffement climatique

SA: Scénario Arborisation avec réchauffement climatique

	Carte	Description sommaire
Diurne	01_SA_PET_géométrie_de_base_rev00.png	Moyenne de la température physiologique équivalente à 14h à 1,1m au-dessus du sol par unité d'utilisation. Situation : avenir 2060, scénario arborisation Type de données représentées : géométrie de base Résolution spatiale : domaines fonctionnels/unités d'utilisation
	01_SA_PET_raster_rev00.png	Résultat du modèle de grille de la température physiologique équivalente à 14h à 1,1m au-dessus du sol. Situation : avenir 2060, scénario arborisation Type de données représentées : raster Résolution spatiale : 5 m
	01_SD_PET_géométrie_de_base_rev00.png	Valeur moyenne de la température physiologique équivalente à 14 heures à 1,1 m au-dessus du sol par unité d'utilisation. Situation : avenir 2060, scénario désimperméabilisation Type de données représentées : géométrie de base Résolution spatiale : domaines fonctionnels/unités d'utilisation
	01_SD_PET_raster_rev00.png	Résultat du modèle de grille de la température physiologique équivalente à 14h à 1,1m au-dessus du sol. Situation : avenir 2060, scénario désimperméabilisation Type de données représentées : raster Résolution spatiale : 5 m
Différence Diurne	02_Différence_SA-P0_PET_géométrie_de_base_rev00.png	Différence des valeurs géométriques de base du PET pour le scénario arborisation Situation de référence à 14h à 1,1m du sol. Situation : avenir 2060, scénario arborisation Type de données représentées : géométrie de base Résolution spatiale : domaines fonctionnels/unités d'utilisation
	02_Différence_SA-P0_PET_raster_rev00.png	Différence des résultats du modèle de grille du PET pour le scénario arborisation Situation de référence à 14h à 1,1m au-dessus du sol. Situation : avenir 2060, scénario arborisation Type de données représentées : raster Résolution spatiale: 5 m
	02_Différence_SA-P1_PET_géométrie_de_base_rev00.png	Différence des valeurs géométriques de base du PET pour le scénario arborisation Avenir avec réchauffement climatique à 14h à 1,1 m du sol. Situation : avenir 2060, scénario arborisation Type de données représentées : géométrie de base Résolution spatiale : Domaines fonctionnels/unités d'utilisation



	02_Différence_SA-P1_PET_raster_rev00.png	Différence des résultats du modèle de grille du PET pour le scénario arborisation - Avenir avec réchauffement climatique à 14h à 1,1m du sol. Situation : avenir 2060, scénario arborisation Type de données représentées : raster Résolution spatiale : 5 m
	02_Différence_SD-P0_PET_géométrie_de_base_rev00.png	Différence des valeurs de géométrie de base du PET pour le scénario désimper-méabilisation - Situation de référence à 14h à 1,1m du sol. Situation : avenir 2060, scénario arborisation Type de données représentées : géométrie de base Résolution spatiale : domaines fonctionnels/unités d'utilisation
	02_Différence_SD-P0_PET_raster_rev00.png	Différence des résultats du modèle de raster du PET pour Scénario Désimper-méabilisation - Situation de référence à 14h à 1,1m du sol. Situation : avenir 2060, scénario arborisation Type de données représentées : raster Résolution spatiale : 5 m
	02_Différence_SD-P1_PET_géométrie_de_base_rev00.png	Différence des valeurs géométriques de base du PET pour le scénario désimper-méabilisation - Avenir avec réchauffement climatique à 14 heures à 1,1 m du sol. Situation : avenir 2060, scénario arborisation Type de données représentées : géométrie de base Résolution spatiale : domaines fonctionnels/unités d'utilisation
	02_Différence_SD-P1_PET_raster_rev00.png	Différence des résultats du modèle de grille du PET pour le scénario désimper-méabilisation - Avenir avec réchauffement climatique à 14h à 1,1m d'altitude. Situation : avenir 2060, scénario arborisation Type de données représentées : raster Résolution spatiale : 5 m
Nocturne	01_SA_T04_géométrie_de_base_rev00.png	Moyenne de la température nocturne de l'air à 4 heures à 2 m au-dessus du sol par unité d'exploitation. Situation : avenir 2060, scénario arborisation Type de données : géométrie de base Résolution spatiale : domaines fonctionnels/unités d'utilisation
	01_SA_T04_raster_rev00.png	Résultat du modèle de grille de la température de l'air nocturne à 4 heures à 2 m au-dessus du sol. Situation : avenir 2060, scénario arborisation Type de données représentées : raster Résolution spatiale : 5 m
	01_SD_T04_géométrie_de_base_rev00.png	Moyenne de la température nocturne de l'air à 4 heures à 2 m au-dessus du sol par unité d'utilisation. Situation : avenir 2060, scénario désimper-méabilisation Type de données représentées : géométrie de base Résolution spatiale : domaines fonctionnels/unités d'utilisation
	01_SD_T04_raster_rev00.png	Résultat du modèle de grille de la température de l'air nocturne à 4 heures à 2 m au-dessus du sol. Situation : svenir 2060, scénario désimper-méabilisation Type de données représentées : raster Résolution spatiale : 5 m



Différence Nocturne	02_Différence_SA-P0_T04_géométrie_de_base_rev00.png	Différence des valeurs de géométrie de base de T04 pour le scénario arborisation - Situation de référence à 4h à 2m du sol. Situation : avenir 2060, scénario arborisation Type de données représentées : géométrie de base Résolution spatiale : domaines fonctionnels/unités d'utilisation
	02_Différence_SA-P0_T04_raster_rev00.png	Différence des résultats du modèle de grille T04 pour le scénario arborisation - Situation de référence à 4h à 2m du sol. Situation : avenir 2060, scénario arborisation Type de données représentées : raster Résolution spatiale: 5 m
	02_Différence_SA-P1_T04_géométrie_de_base_rev00.png	Différence des valeurs de géométrie de base de T04 pour le scénario arborisation - Avenir avec réchauffement climatique à 4 heures à 2 m du sol Situation : avenir 2060, scénario arborisation Type de données représentées : géométrie de base Résolution spatiale : domaines fonctionnels/unités d'utilisation
	02_Différence_SA-P1_T04_raster_rev00.png	Différence des résultats du modèle de grille T04 pour le scénario arborisation - Avenir avec réchauffement climatique à 4h à 2m d'altitude. Situation : avenir 2060, scénario arborisation Type de données représentées : raster Résolution spatiale : 5 m
	02_Différence_SD-P0_T04_géométrie_de_base_rev00.png	Différence des valeurs de géométrie de base de T04 pour le scénario désimperméabilisation - Situation de référence à 4h à 2m du sol. Situation : avenir 2060, scénario arborisation Type de données représentées : géométrie de base Résolution spatiale : domaines fonctionnels/unités d'utilisation
	02_Différence_SD-P0_T04_raster_rev00.png	Différence des résultats du modèle de grille T04 pour le scénario désimperméabilisation - Situation de référence à 4h à 2m d'altitude. Situation : avenir 2060, scénario arborisation Type de données représentées : raster Résolution spatiale : 5 m
	02_Différence_SD-P1_T04_géométrie_de_base_rev00.png	Différence des valeurs de géométrie de base de T04 pour le scénario désimperméabilisation - Avenir avec réchauffement climatique à 4 heures à 2 m du sol. Situation : avenir 2060, scénario arborisation Type de données représentées : géométrie de base Résolution spatiale : domaines fonctionnels/unités d'utilisation
	02_Différence_SD-P1_T04_raster_rev00.png	Différence des résultats du modèle de raster T04 pour le scénario désimperméabilisation - Avenir avec réchauffement climatique à 4h à 2m d'altitude. Situation : avenir 2060, scénario arborisation Type de données représentées : raster Résolution spatiale : 5 m

6. Résumé

Le présent travail a permis de quantifier les effets des mesures « conversion de places de parc » et « arborisation » mises en œuvre à l'échelle de la ville. Les messages clés suivants peuvent être tirés de cette étude : Les deux mesures « **arborisation** » et « **désimperméabilisation** » sont efficaces (chacune de manière différente)

- En situation diurne, l'**arborisation** permet de surcompenser l'augmentation de température de 2,7 °C dans certaines zones → mesure très efficace !
- La nuit, l'**arborisation** contribue à un refroidissement supplémentaire dans les zones fortement imperméabilisées (p. ex. centre-ville) ; dans les zones déjà végétalisées, la mesure freine en revanche le refroidissement nocturne (p. ex. lotissements de maisons individuelles)
- La **désimperméabilisation** améliore la situation aussi bien le jour que la nuit, mais ne peut pas compenser l'augmentation de température de 2,7 °C
- Les **deux mesures se complètent bien** :
 - Avec la désimperméabilisation, de nouveaux sites d'arbres potentiels peuvent être créés pour la mise en œuvre de la stratégie d'arborisation
 - La combinaison des mesures « Arborisation » et « Désimperméabilisation » conduit à une nette amélioration de la situation de jour et de nuit

Les résultats constituent une base de décision importante pour la mise en œuvre du « Plan climat ». En ce qui concerne la température de l'air et la PET, il est déjà possible de faire des déclarations très concrètes concernant les états futurs possibles, alors que l'échange d'air à petite échelle joue un rôle secondaire dans ce travail. Pour traiter également ce sujet, une approche randomisée n'est pas suffisante et des informations plus précises (par exemple l'emplacement exact où les arbres seront plantés) sont nécessaires. Il convient néanmoins de souligner que de nombreux enseignements ont déjà pu être tirés des scénarios étudiés, malgré le faible niveau de détail spatial. La modélisation climatique est un outil essentiel pour mettre en évidence les futures voies de développement et offre une base importante pour la planification prévisionnelle.



Bibliographie

GEO-NET (2024): Situation climato-écologique du canton de Vaud: Analyse climatique sur la base d'un modèle (actuellement pas encore publié).

Kuttler, W. (1999): Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. In: Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e. V. Leipzig. Band 13.

Matzarakis, A. und H. Mayer (1996): Another kind of environmental stress: Thermal stress. WHO Newsletter No. 18: 7-10.

Oke, T. R. (1973): City size and the urban heat island. Atmospheric Environment (1967), Volume 7, Issue 8: S. 769-779.

Stadt Jena (2016): Bäume in Jena. Stadt- und Straßenbäume im Klimawandel. Stadtbaumkonzept. Schriften zur Stadtentwicklung Nr. 7.

Ville de Lausanne (2021): Plan climat. Base de la politique climatique de la Ville de Lausanne. Rapport-préavis N° 2020 / 54, disponible en ligne sur <https://www.lausanne.ch/portrait/climat/plan-climat.html>