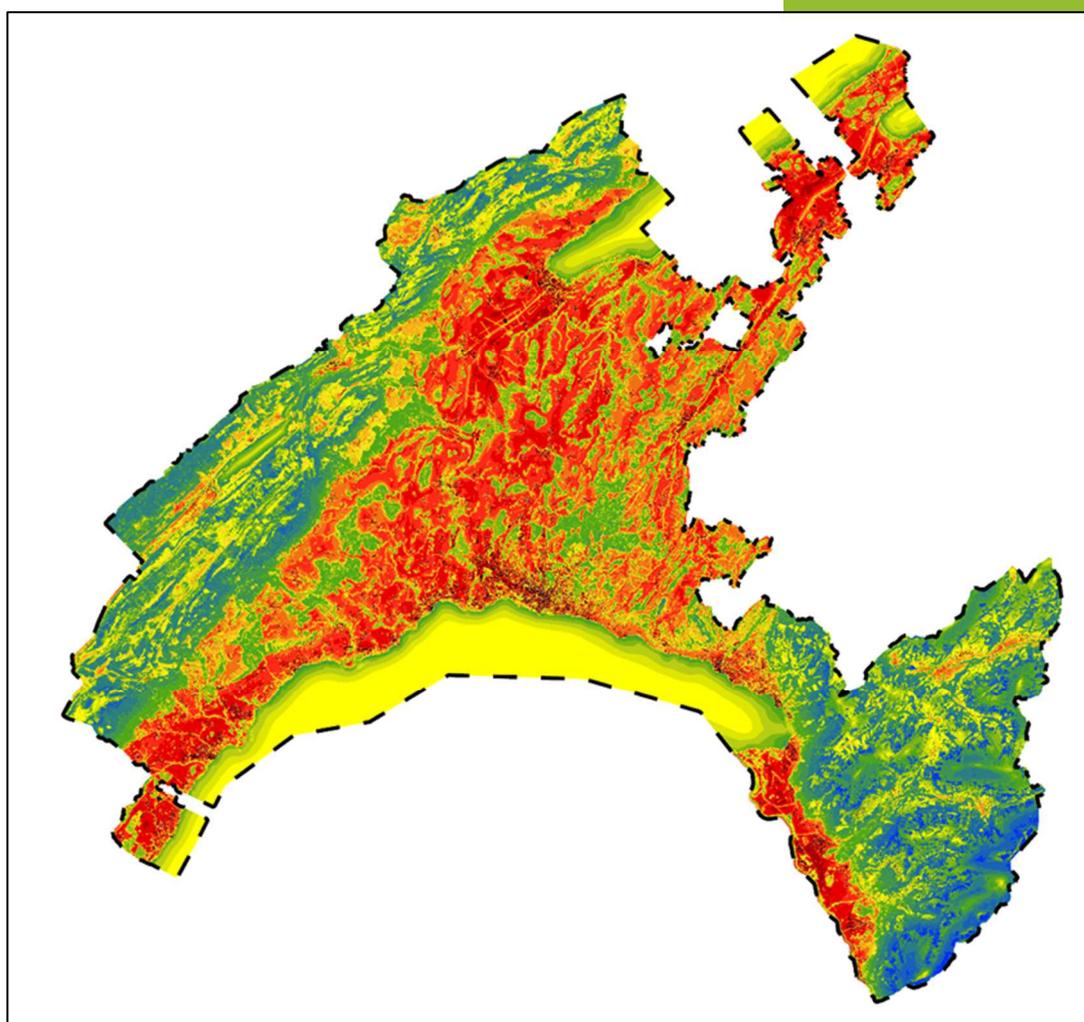




Situation bioclimatique du canton de Vaud : Analyse sur la base d'un modèle



Elaboré par :
GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hanovre

Pour l'État de Vaud
Office cantonal de la durabilité et du climat
Direction générale du territoire et du logement



Juin 2024



Sommaire

	I
SOMMAIRE	II
LISTE DES ILLUSTRATIONS	4
LISTE DES TABLEAUX	5
GLOSSAIRE	6
1. INTRODUCTION	8
2. BASES TECHNIQUES	9
2.1 Îlot de chaleur urbain	9
2.2 Le climat dans le canton de Vaud	11
Climat futur	14
3. METHODE	16
3.1 Le modèle FITNAH-3D	16
3.2 Conditions MÉtÉorologiques et calculs effectués	17
3.3 Données D'Entrée	18
3.4 Données d'entrée de la situation future	22
3.5 GÉométrie de Base	23
3.6 DÉfis et incertitudes	24
3.6.1 Incertitudes de la modÉlisation numÉrique	24
3.6.2 Validation de la modÉlisation	26
4. RESULTATS	30
4.1 TempÉrature de l'air nocturne	30
4.2 Champ d'Écoulement nocturne de l'air froid	34
4.3 Charge thermique pendant la journée	39



5. CARTE DE L'ANALYSE CLIMATIQUE	45
5.1 Situation actuelle	48
5.2 Situation future	51
6. CARTE INDICATIVE DE PLANIFICATION	54
6.1 Normalisation des paramètres (transformation en Z)	54
6.2 Évaluation de l'espace d'action	55
6.2.1 Indication supplémentaire de processus d'air froid	56
6.2.2 Indication d'espaces bâtis non habités	57
6.3 Évaluation de l'espace de compensation	58
6.4 Résultats cartes indicatives de planification	61
6.4.1 Situation nocturne	61
6.4.2 Situation diurne	68
7. CATALOGUE D' ACTIONS POUR L'AMELIORATION DU CLIMAT URBAIN	73
BIBLIOGRAPHIE	78

Liste des illustrations

FIGURE 1 : CROQUIS DU PRINCIPE DE BRISE THERMIQUE.....	9
FIGURE 2 : LES VENTS DOMINANTS DANS DES CONDITIONS À VENT FAIBLE : L'EFFET DU RELIEF ET DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN	10
FIGURE 3 : DIAGRAMME CLIMATIQUE POUR LA STATION DE MESURE DE PULLY (VAUD), PERIODE 1991-2020 (METEOSUISSE 2024A)..	12
FIGURE 4 : NUITS AUTOCHTONES : NOMBRE MENSUEL MOYEN A LONG TERME (AU TOTAL 123,6 PAR AN) 1981-2022. STATION : PAYERNE	13
FIGURE 5 : ÉVOLUTION DES TEMPERATURES ESTIVALES DE LA SUISSE DE 1864 A NOS JOURS PAR RAPPORT A LA PERIODE 1961-1990 (METEOSUISSE 2024C).....	13
FIGURE 6 : LES SCENARIOS CLIMATIQUES RCP 8.5, RCP 6, RCP 4.5 ET RCP 2.6 (MEINSHAUSEN ET AL. 2011, MODIFIE PAR GEO-NET)	14
FIGURE 7 : CANTON DE VAUD : AUGMENTATION DE LA TEMPERATURE EN ETE PAR PERIODE ET SCENARIO (ESTIMATIONS MOYENNES). DEVIATION DE LA PERIODE STANDARD 1981-2010 (NCCS 2024)	15
FIGURE 8 : MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN.....	20
FIGURE 9 : PARTIE DE LA GRILLE « OCCUPATION DES SOLS »	21
FIGURE 10 : TEMPERATURE DE L'EAU EN FONCTION DE L'ALTITUDE.....	22
FIGURE 11 : RASTER DE L'OCCUPATION DES SOLS APRES L'APPLICATION DU RANDOMISEUR SUR LA COMMUNE DE PRILLY (A GAUCHE = SITUATION ACTUELLE ; A DROITE = SITUATION FUTURE)	23
FIGURE 12 : COMPARAISON DES TEMPERATURES MODELISEES (LIGNE ROUGE) ET MESUREES (MOYENNE : LIGNE VIOLETTE) A 2 M DU SOL SUR LA PERIODE ENTRE 22 H ET 14 H A CHATEAU-D'OEX.....	29
FIGURE 13 : CHAMP DU VENT MODELISE A 2 M DU SOL (GAUCHE) ET ROSE DE VENT A 10 M DU SOL (DROIT) A CHATEAU-D'OEX.	29
FIGURE 14 : TEMPERATURE NOCTURNE A 4 H, SITUATION ACTUELLE	31
FIGURE 15 : TEMPERATURE NOCTURNE A 4 H, SITUATION FUTURE (2060).....	33
FIGURE 16 : EXEMPLE DE BONNE PRATIQUE DE L'AMELIORATION DE LA TEMPERATURE NOCTURNE DE L'AIR DANS UNE ZONE DE DEVELOPPEMENT HABITEE (OCCUPATION DE SOL ALEATOIRE) A YVERDON-LES-BAINS	34
FIGURE 17 : SCHEMA DU PRINCIPE DU DEBIT D'AIR FROID	35
FIGURE 18 : DEBIT D'AIR FROID SITUATION ACTUELLE	36
FIGURE 19 : DEBIT D'AIR FROID SITUATION FUTURE (2060)	37
FIGURE 20 : DIFFERENCE DE LA DENSITE DU DEBIT D'AIR FROID AUX ZONES DE DEVELOPPEMENT « EN DORIGNY » A CHAVANNES-PRES- RENENS.....	38
FIGURE 21 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES DIFFERENTES INFLUENCES SUR LA SENSATION HUMAINE DE CHALEUR (DWD 2024B, MODIFIE PAR GEO-NET).....	39
FIGURE 22 : PET SITUATION ACTUELLE.....	41
FIGURE 23 : PET SCENARIO FUTURE (2060)	42
FIGURE 24 : CHANGEMENT DE LA PET AUX ZONES DE DEVELOPPEMENT.....	43
FIGURE 25 : LEGENDE DE LA CAC AVEC LA TEMPERATURE ABSOLUE ILLUSTREE DANS L'ESPACE URBAIN.	45
FIGURE 26 : LEGENDE DE LA CAC AVEC L'EFFET D'ÎLOT DE CHALEUR ILLUSTRE DANS L'ESPACE URBAIN.	45
FIGURE 27 : CAC AVEC LA TEMPERATURE ABSOLUE DANS L'ESPACE URBAIN, SITUATION ACTUELLE	49
FIGURE 28 : CAC AVEC L'EFFET D'ÎLOT DE CHALEUR DANS L'ESPACE URBAIN, SITUATION ACTUELLE.....	50
FIGURE 29 : CAC AVEC LA TEMPERATURE DANS L'ESPACE URBAIN, SITUATION FUTURE.	52
FIGURE 30 : CAC AVEC L'EFFET D'ÎLOT DE CHALEUR DANS L'ESPACE URBAIN, SITUATION FUTURE.	53
FIGURE 31 : TRANSFORMATION EN Z POUR LA NORMALISATION DE L'EVALUATION COMPARATIVE DES PARAMETRES.....	55
FIGURE 32 : SYMBOLES DES PROCESSUS D'AIR FROID DANS L'ESPACE D'ACTION.	57
FIGURE 33 : SYMBOLES DES CATEGORIES D'ESPACE D'ACTION SUPPLEMENTAIRES : « NON HABITE » ET SUR LES ESPACES ROUTIERS.....	57
FIGURE 34 : SCHEMA D'EVALUATION DANS L'ESPACE DE COMPENSATION DE NUIT	59
FIGURE 35 : SCHEMA D'EVALUATION DANS L'ESPACE DE COMPENSATION PENDANT LA JOURNEE EN TENANT COMPTE DE L'ACCESSIBILITE.	61
FIGURE 36 : CARTE INDICATIVE DE PLANIFICATION DE NUIT, SITUATION ACTUELLE.	66
FIGURE 37 : CARTE INDICATIVE DE PLANIFICATION DE NUIT, SITUATION FUTURE.....	67

FIGURE 38 : CARTE INDICATIVE DE PLANIFICATION DE JOUR, SITUATION ACTUELLE.....	71
FIGURE 39 : CARTE INDICATIVE DE PLANIFICATION DE JOUR, SITUATION FUTURE.	72

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : TEMPERATURE A 21 HEURES POUR LA PERIODE 1981-2010 A DIFFERENTES STATIONS DE METEOSUISSE	17
TABLEAU 2 : APERÇU DES ETATS MODELISES POUR LE CANTON DE VAUD.....	18
TABLEAU 3 : POURCENTAGE DES CLASSES DE L'OCCUPATION DES SOLS POUR LES TYPES DE ZONES DE DEVELOPPEMENT.....	23
TABLEAU 4 : RESUME DE LA COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS DE LA MODELISATION ET LES MESURES METEOROLOGIQUES AU CANTON DE VAUD.	27
TABLEAU 5 : ATTRIBUTION DE VALEURS SEUILS DE L'INDICE D'EVALUATION PET (PHYSIOLOGICALLY EQUIVALENT TEMPERATURE) PENDANT LES HEURES DE JOUR (SELON VDI 2004).....	39
TABLEAU 6 : VALEURS DE REFERENCE DES ESPACES VERTS ET OUVERTS POUR CALCULER L'EFFET D'ILOT DE CHALEUR DEPENDANT DE L'ALTITUDE.....	46
TABLEAU 7 : ÉLÉMENTS DE LA LEGENDE ET LEURS METHODES DE DEDUCTION CONCERNANT LE PROCESSUS D'AIR FROID DANS LES CARTES DE L'ANALYSE CLIMATIQUE.....	47
TABLEAU 8 : NIVEAUX D'ÉVALUATION DE LA SITUATION BIOCLIMATIQUE HUMAINE DANS L'ESPACE D'ACTION SELON LE SCENARIO, LE MOMENT DE LA JOURNEE ET LE TYPE DE STRUCTURES.	56
TABLEAU 9 : NIVEAUX D'ÉVALUATION DE L'IMPORTANCE BIOCLIMATIQUE HUMAINE DANS L'ESPACE DE COMPENSATION PENDANT LA JOURNEE.....	60
TABLEAU 10 : ESPACE BATI : PROPORTION DES ZONES ET INDICATIONS DE PLANIFICATION POUR LA SITUATION NOCTURNE.....	62
TABLEAU 11 : ESPACE DE COMPENSATION : PROPORTIONS DES ZONES ET INDICATIONS DE PLANIFICATION POUR LA SITUATION NOCTURNE.	63
TABLEAU 12 : ESPACE URBAIN : PROPORTION DES ZONES ET INDICATIONS DE PLANIFICATION POUR LA SITUATION DIURNE.....	68
TABLEAU 13 : ESPACE DE COMPENSATION : PROPORTION DES ZONES ET INDICATIONS DE PLANIFICATION POUR LA SITUATION DIURNE	70
TABLEAU 14 : CATALOGUE DE PROPOSITIONS D' ACTIONS D'ADAPTATION AU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE ET POUR L'AMELIORATION DU CLIMAT URBAIN POUR LE CANTON DE CANTON VAUD.....	74

Glossaire

Air froid : masse d'air dont la température est inférieure à celle de son environnement ou à la limite supérieure d'une couche d'inversion correspondante au-dessus de sol et qui résulte du processus de refroidissement nocturne de l'atmosphère près du sol. Le processus de refroidissement radiatif de l'air proche du sol est d'autant plus fort que la capacité thermique du sol est faible et est plus élevé au-dessus des prairies, des terres arables et des jachères. Jusqu'à présent, il n'existe aucune définition concrète de la différence de température minimale entre l'air froid et l'environnement ou de la taille minimale du débit d'air froid, qui caractérisent quantitativement le phénomène (VDI 2003).

Albédo : pouvoir réfléchissant d'une surface (degré de réflectance du rayonnement à ondes courtes). Rapport entre la quantité de lumière réfléchie par un objet et la quantité de lumière qu'il reçoit. L'albédo dépend de la nature de la surface irradiée et de la zone spectrale du rayonnement incident.

Bioclimat : ensemble des influences directes et indirectes des conditions météorologiques et du climat (= conditions environnementales atmosphériques) sur les organismes vivants dans les différentes parties du paysage, en particulier sur les humains (bioclimat humain).

Brise thermique : flux d'équilibrage relativement faible, induit par la chaleur, qui est causé par les différences horizontales de température et de pression entre les espaces ouverts influencés par la végétation dans la région environnante et les zones (densément) construites. Les brises thermiques, surtout le soir et la nuit, soufflent en direction des zones de surchauffe (généralement le centre-ville ou le centre du quartier).

Carte de l'analyse climatique : présentation analytique des impacts et des effets du climat de nuit dans la zone urbaine et la campagne environnante (processus d'air froid, surchauffe des espaces bâtis).

Carte indicative de planification : évaluation du stress bioclimatique dans les zones résidentielles et commerciales de la zone urbaine (→ *espace d'action*) ainsi que de l'importance des espaces verts comme → *espaces de compensation* dans des cartes séparées pour les situations de jour et de nuit, y compris la dérivation de conseils généraux de planification.

Champ d'écoulement : simulation des informations sur la vitesse et la direction des → *vents* à 2 m au-dessus du sol pendant une → *situation météorologique autochtone*, mesurées à 4 h heures.

Conditions météorologiques allochtones : conditions météorologiques déterminées par des courants d'air à grande échelle qui empêchent la formation de petits systèmes éoliens et d'inversions nocturnes du sol. A cet effet, les masses d'air qui ont été formées dans d'autres régions sont transportées sur le site.

Conditions météorologiques autochtones : conditions météorologiques déterminées par des influences locales et régionales avec un faible flux de vent et des conditions d'entrée et de sortie sans entrave, caractérisées par des variations quotidiennes prononcées de la température, de l'humidité de l'air et du rayonnement. La situation météorologique près du sol est principalement déterminée par le bilan de chaleur et de rayonnement et seulement dans une faible mesure par la masse d'air, de sorte que les climats locaux tels que le climat urbain ou les systèmes éoliens locaux comme les vents de montagne et de vallée peuvent avoir le plus grand impact.

Conditions météorologiques à vent faible : → *Conditions météorologiques autochtones*

Conditions météorologiques de rayonnement : → *Conditions météorologiques autochtones*

Couloirs d'air froid : les couloirs d'air froid relient entre elles les zones de production d'air froid (→ *espaces de compensation*) et les zones de charge (→ *espace d'action*) et constituent donc un élément élémentaire de l'échange d'air. On distingue entre les « zones centrales » (structures vertes s'étendant dans l'espace bâti, qui alimentent effectivement les bâtiments existants en air froid sur une surface continue et étendue) et les « zones de desserte » des couloirs d'air froid (zones vertes à forte productivité d'air froid, qui alimentent les zones centrales).

Débit d'air froid : en termes simplifiés, le produit de la vitesse d'écoulement de \rightarrow l'air froid, de son expansion verticale (hauteur de la couche) et de l'expansion horizontale de la section transversale à travers laquelle il s'écoule (largeur d'écoulement ; unité $m^3/(s \cdot m)$). Le débit d'air froid décrit donc la quantité \rightarrow d'air froid qui circule chaque seconde dans la section d'une pente ou d'un \rightarrow couloir d'air froid. Contrairement au \rightarrow champ d'écoulement, le débit d'air froid tient donc également compte des mouvements d'écoulement au-dessus de la couche proche du sol.

Espace bâti : il s'agit de zones fortement urbanisées, c.-à-d. toutes les zones résidentielles, les zones industrielles et commerciales tout comme les zones mixtes. Avec l'espace routier, l'espace bâti forme l'espace d'action.

Espace d'action : zone à bâtir construite, zone de transport, ainsi que constructions hors zone à bâtir, dans lesquelles un stress bioclimatique peut se produire. Sur les \rightarrow cartes indicatives de planification, état actuel, les parcelles affectées en zone à bâtir, ne contenant aucun bâtiment, sont considérées comme un espace de compensation et non pas comme un espace d'action.

Espace de compensation : espace ouvert vert, relativement peu thermiquement chargé, qui est adjacent à un \rightarrow espace d'action ou qui y est relié par des \rightarrow couloirs d'air froid ou des structures à faible rugosité. Par la formation d'un air plus froid et plus frais et par des relations d'échange fonctionnel, cela contribue à la réduction ou à l'élimination des charges thermiques dans l'espace d'action. Avec ses caractéristiques climatiques favorables, il offre une qualité de séjour exceptionnelle aux humains.

Espace vert : dans le présent document, on entend par « espace vert » les zones, indépendamment de leur utilisation respective, qui se caractérisent par un faible degré d'imperméabilisation d'environ 25 % maximum. Outre les parcs, les jardins familiaux, les cimetières et les installations sportives, ce terme englobe donc aussi les terres agricoles ainsi que les forêts et les terrains boisés.

Îlot de chaleur urbain : phénomène spécifique du climat urbain qui se caractérise par la différence de température de l'air entre la ville (plus chaude) et ses environs (plus frais) et atteint son maximum pendant la nuit lors de conditions sans nuage et sans vent. La différence peut atteindre jusqu'à 10°C dans les grandes villes. La température de l'air dans les villes dépend fortement de la géométrie des bâtiments, des propriétés thermiques des matériaux de construction, des propriétés de rayonnement des surfaces et des émissions d'origine humaine, du trafic et de l'industrie (DWD 2024).

PET (température physiologique équivalente) : indice bioclimatique humain pour la caractérisation de la charge thermique sur l'être humain, qui combine les paramètres la température de l'air, l'humidité de l'air, la vitesse du vent et les flux de rayonnement à ondes courtes et longues et est dérivé d'un modèle de bilan thermique.

Scénarios RCP (*Representative Concentration Pathway*) : scénarios d'évolution de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, utilisés comme scénarios de référence dans le 5e rapport d'évaluation du « Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat » (GIEC). Le chiffre dans la désignation RCP 2.6 (Scénario « Protection du climat »), RCP 4.5 ou RCP 8.5 (Scénario « Poursuite de la politique actuelle ») indique le forçage radiatif supplémentaire en W/m^2 d'ici l'an 2100 par rapport au niveau préindustriel au milieu du 19^e siècle.

Transformation en Z : conversion pour normaliser une variable de sorte que la moyenne arithmétique de la variable transformée prenne la valeur zéro et que son écart-type prenne la valeur un. Pour ce faire, on soustrait la moyenne arithmétique de l'aire de chaque valeur initiale de la variable, puis on la divise par l'écart-type de toutes les valeurs. Par conséquent, les écarts en dessous de la moyenne de la zone prennent des valeurs négatives et les écarts au-dessus de la moyenne de la zone prennent des valeurs positives qui sont des multiples de l'écart-type. La forme de la distribution reste inchangée.

Zone d'impact de l'air froid : zone d'influence des systèmes d'écoulement locaux dans l'espace bâti. Cette zone est caractérisée par des zones résidentielles et commerciales et par l'espace routier, à travers lequel circule un \rightarrow débit d'air froid supérieur à la moyenne ou à la vitesse du vent d'au moins 0,2 m/s à une hauteur de 2 m.

1. Introduction

La Suisse et le Canton de Vaud sont particulièrement touchés par les changements climatiques. Selon MétéoSuisse, la température moyenne y a déjà augmenté de 2.7 °C depuis 1864. Cette évolution entraîne notamment des étés plus chauds et secs, mais également une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes de chaleur.

Les changements climatiques exacerbent la problématique du confort – voire de l'habitabilité – des espaces bâtis, déjà significativement exposés au phénomène d'îlot de chaleur urbain. Afin d'anticiper et de répondre aux besoins d'adaptation aux changements climatiques, mais également d'endiguer l'anomalie thermique de certains espaces urbains, il apparaît opportun de disposer de données diagnostiques et prospectives sur les conditions microclimatiques à l'échelle du canton. En l'occurrence, bon nombre de mesures d'adaptation aux changements climatiques dans les espaces bâtis coïncide avec les actions possibles pour atténuer l'apparition du phénomène d'îlot de chaleur urbain : végétalisation des espaces publics, renforcement de l'arborisation urbaine, développement de trames bleues, désimperméabilisation des sols en milieu bâti, etc. Ces données s'inscrivent notamment dans l'axe stratégique du Plan climat vaudois « Documenter ».

Une telle documentation constitue, pour de nombreux acteurs du territoire et à toutes les échelles, une référence climatique validée scientifiquement. Dans le contexte de changements climatiques, les résultats de la présente étude permettent non seulement d'identifier et de remédier localement à des conditions de stress thermique, mais ils peuvent également être pris en compte lors de l'établissement de planifications directrices d'aménagement du territoire, ou dans le cadre de l'établissement de plans d'affectation. Cette objectivation des enjeux climatiques et leur prise en compte dans les projets d'aménagement du territoire sont au cœur du domaine d'action « aménagement du territoire » du Plan climat vaudois.

Conformément à l'état actuel de la technique, un calcul de modèle a été effectué à l'aide du modèle climatique urbain FITNAH-3D afin d'obtenir des résultats à haute résolution et à l'échelle de la région pour l'ensemble du canton. Les résultats reflètent non seulement la situation nocturne, mais aussi le stress bioclimatique pendant la journée, ce qui permet d'avoir une vue d'ensemble du climat cantonal. Le présent rapport commence par expliquer certaines des bases techniques (chapitre 2), puis la méthodologie de l'analyse climatique (chapitre 3) et enfin les résultats de la modélisation (chapitre 4). La meilleure façon de répondre aux questions de planification consiste à examiner les résultats d'ensemble, de sorte que les résultats du processus (surchauffe de la zone urbaine, champ d'écoulement d'air froid) soient résumés dans une « carte de l'analyse climatique » correspondante (chapitre 5). En outre, des évaluations de la charge bioclimatique dans les espaces bâtis et de l'importance des espaces verts en tant qu'espaces de compensation sont effectuées et des indications générales de planification en sont tirées (Carte indicative de planification ; chapitre 6). Le catalogue des mesures pour le climat urbain (chapitre 7) précise les indications générales de planification.

2. Bases techniques

2.1 ÎLOT DE CHALEUR URBAIN

En raison de l'influence anthropique, une ville est dominée par des conditions climatiques « urbaines » qui ont tendance à être plus prononcées avec l'augmentation de la population ou la taille de la ville (Oke 1973). Les facteurs influents sont, par exemple, le degré élevé d'imperméabilisation, la faible proportion de végétation et de surface naturelle, l'augmentation de la surface induite 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 (chaleur anthropique). Par rapport aux espaces environnants (forestiers, agricoles, etc.), ces effets entraînent des températures plus élevées et un stress bioclimatique en période estivale. Le phénomène de surchauffe, appelé îlot de chaleur urbain, apparaît principalement la nuit.

La population urbaine est ainsi exposée à des niveaux de stress élevés lorsque les conditions météorologiques permettent une forte expression des effets climatiques urbains. C'est typiquement le cas dans des conditions de haute pression, déterminées par une variation diurne prononcée du rayonnement, de la température et de l'humidité, ainsi que par des vents faibles et une couverture nuageuse minimale. Dans ces conditions, l'air chaud s'élève par convection au-dessus du corps surchauffé de la ville pendant la journée. Le système de basse pression qui se développe près du sol provoque des courants de compensation, c.-à-d. que des masses d'air provenant des environs peuvent s'écouler dans la zone urbaine (Brises thermiques ; Figure 1).

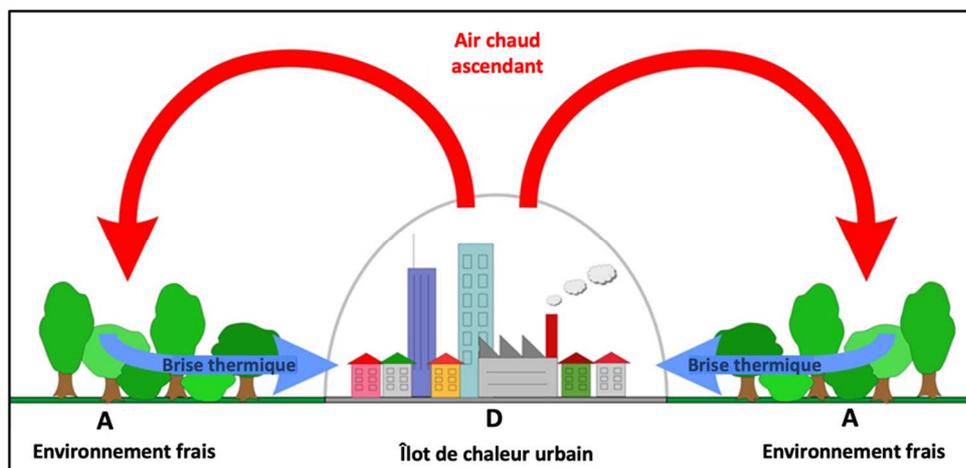


Figure 1 : Croquis du principe de brise thermique

Pendant la journée, les brises thermiques n'entraînent généralement pas une réduction de la charge thermique dans les espaces bâtis, car un niveau de température similaire prévaut généralement dans les environs. Cependant, ils peuvent contribuer au mélange de la couche d'air près du sol et provoquer une dilution des polluants atmosphériques. La nuit, en revanche, l'air ambiant plus froid peut s'écouler des espaces verts proches de la ville (éventuellement du centre-ville) vers la zone urbaine plus chaude et apporter un rafraîchissement. L'arrivée de cet « air froid » près du sol se fait à faible vitesse et réagit de manière sensible aux obstacles, de sorte qu'il ne peut circuler que le long de zones dans lesquelles ils ne

sont pas bloqués par les bâtiments ou autres (notamment via ce qu'on appelle les couloirs d'air froid)¹. Cependant, les brises thermiques, qui se produisent surtout la nuit en raison de l'effet d'îlot de chaleur, ne reflètent que partiellement la réalité (Figure 2). En cas de grandes différences d'altitude, des vents supplémentaires de montagne et de vallée se produisent, des différences d'altitude faibles provoquent déjà des vents de pente. La nuit, l'air s'écoule des sommets vers les fonds de vallée, tandis que le jour, le réchauffement se produit en direction inverse et les masses d'air remontent le long de l'axe d'une vallée. Dans des conditions météorologiques à vent faible, les flux thermiques et conditionnés par le relief se produisent simultanément et sont différents en termes de vitesse du vent et de débit d'air froid. Les brises thermiques sont généralement plus faibles que les vents de pente et de montagne. Cependant, pour les villes situées dans les vallées ou sur un coteau (ex. Lausanne), cela signifie que les brises thermiques nocturnes avec des vents de pente simultanés sont amplifiées.

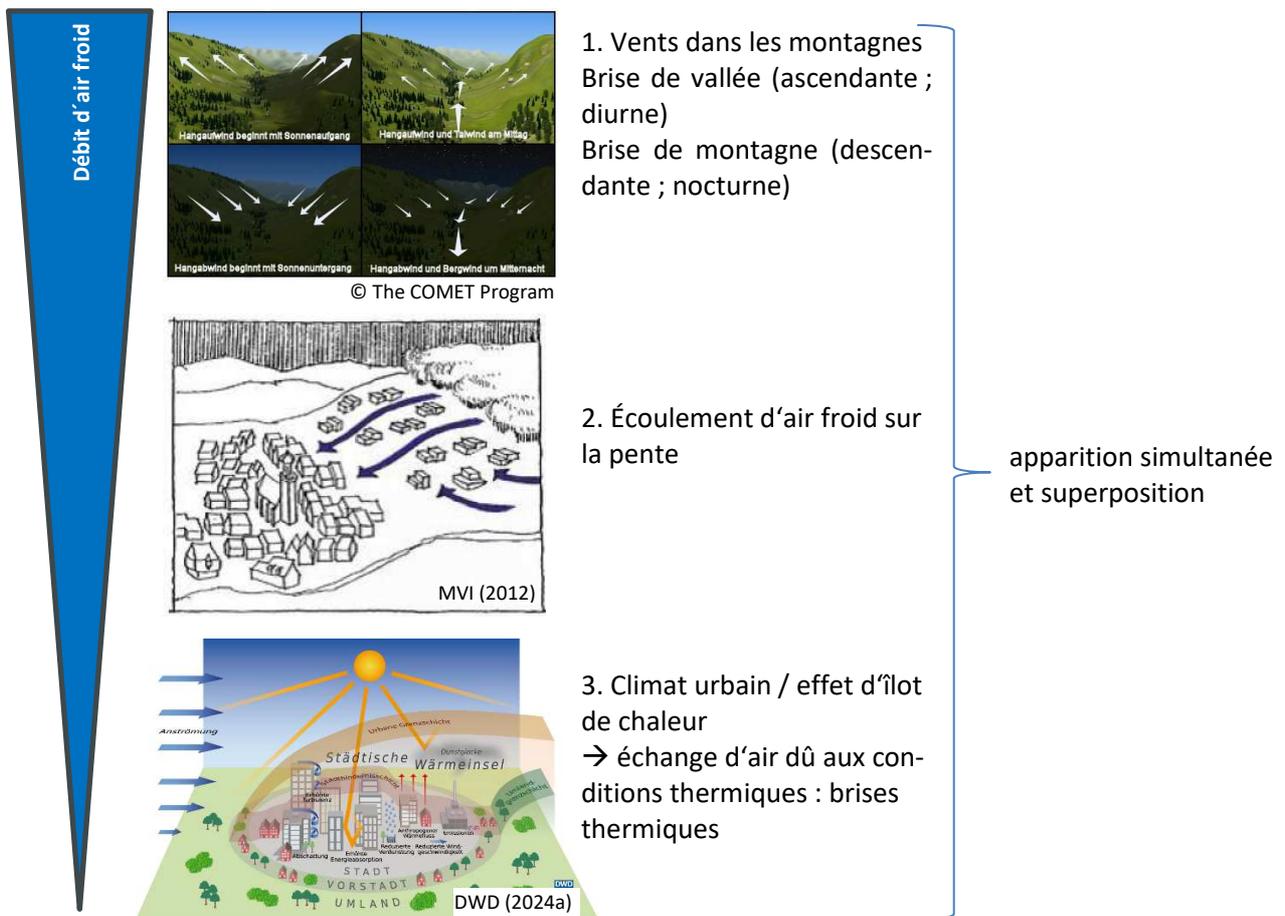


Figure 2 : Les vents dominants dans des conditions à vent faible : l'effet du relief et de l'îlot de chaleur urbain

En plus de la chaleur résiduelle dégagée par les activités humaines, le degré élevé d'imperméabilisation provoque un réchauffement de la zone urbaine. Alors que les zones non construites dans la campagne environnante se refroidissent rapidement, le processus de refroidissement dans les zones urbaines et imperméables se déroule sur une plus longue période. Le béton et l'asphalte ont un faible albédo², de sorte

¹ Pendant la nuit, les conditions météorologiques autochtones sont caractérisées par une stratification thermique des masses d'air près du sol. Cela empêche le mélange vertical et aucun écoulement vertical superposé n'a donc d'influence sur le champ d'écoulement près du sol, qui réagit en conséquence de manière sensible aux obstacles. Pendant la journée, les conditions sont moins stables. Par la montée des bulles d'air chaud de l'air circulant près du sol (rafales), un mélange vertical des couches d'air est possible, de sorte que les obstacles à la circulation peuvent être surmontés si nécessaire.

² Capacité de réflectivité

qu'une partie importante du rayonnement est absorbée et les surfaces chauffent beaucoup pendant la journée. La nuit, la chaleur stockée peut être libérée dans l'atmosphère sous forme de rayonnement à ondes longues (Häckel 2012, Malberg 2002). En raison du degré élevé d'imperméabilisation (i.e. proportion réduite de verdure et d'eau), l'évaporation et la capacité de refroidissement associée dans la ville sont significativement réduites³ (Schönwiese 2008).

Le trafic motorisé, les industries et le chauffage domestique ne provoquent pas seulement un flux de chaleur anthropique, mais génèrent également une part importante des émissions de polluants atmosphériques, affectant directement la santé de la population. Même si les valeurs moyennes d'immission de ces polluants atmosphériques semblent s'améliorer dans les agglomérations suisses au cours des dernières années (OFEV 2020), les émissions polluantes en milieu urbain restent soutenues et doivent être limitées à la source.

L'air des villes s'avère être toujours chargé par des polluants tels que les oxydes d'azote, les poussières fines ou les composés organiques volatils. Sans actions météorologiques externes comme le vent ou les précipitations, la pollution stagne à proximité des sources. Si la vitesse du vent dans les villes est généralement réduite, l'échange d'air n'est dans certains cas pas suffisant pour améliorer sensiblement la qualité de l'air (Kuttler 2009).

La nécessité de tenir compte du climat urbain est ainsi parfaitement justifiée, d'autant plus qu'une grande partie de la population vit dans les villes et que la pollution doit être maintenue au plus bas niveau possible pour garantir des conditions de vie et de travail saines.

2.2 LE CLIMAT DANS LE CANTON DE VAUD

Selon la définition du Deutscher Wetterdienst (DWD), le climat caractérise l'état moyen de l'atmosphère à un endroit ou une zone donnée et est représenté par les propriétés statistiques globales sur une période suffisamment longue (valeurs moyennes, valeurs extrêmes, fréquences, etc.). En général, on considère des périodes de 30 ans. Ainsi, la période de référence climatologique internationale valable à l'heure actuelle est fixée à 1961-1990, mais la période 1981-2010 (MétéoSuisse 2013) est actuellement souvent utilisée.

La station de mesure de Pully (Vaud) se caractérise par une température de l'air moyenne (1991-2020) de 11,3°C et un cumul annuel moyen de précipitation de 1132 mm, les températures maximales ainsi que les cumuls maximaux de précipitation se produisant en été (Figure 3). Il fait 5,5°C plus chaud à la station de Pully comparé à la température moyenne en Suisse de 5,8°C en période standard 1991-2020 (MétéoSuisse 2024b). Pendant cette période, on observe à Pully en moyenne annuelle : 47 jours d'été⁴, 7 jours tropicaux⁵, 38 jours de gel⁶ et 8 jours d'hiver⁷.

En ce qui concerne le stress thermique estival, ce sont surtout les conditions météorologiques à fort rayonnement et faible vent (conditions autochtones) qui sont pertinentes. En d'autres termes, *autochtone* signifie « peu de nuages, peu de vent », mais il existe également une définition plus précise d'une situation météorologique de rayonnement et à vent faible : selon le Augter (1997) la définition des nuits

³ Dans la ville, le flux de chaleur latente plus faible est compensé par un transport de chaleur sensible plus élevé.

⁴ Jour d'été – Température maximale ≥ 25 °C

⁵ Jour tropical – Température maximale ≥ 30 °C

⁶ Jour de gel – Température minimale ≤ 0 °C

⁷ Jour d'hiver – Température maximale ≤ 0 °C

autochtones décrit le « calcul des fréquences des nuits à fort rayonnement à vent faible et des nuits de refroidissement à vent faible ». Les conditions requises pour les nuits de vent faible sont donc une vitesse de vent maximale de 2,7 m/s avec une faible couverture nuageuse (ne dépassant pas quatre huitièmes) pendant plusieurs heures de la nuit. En règle générale, ces critères doivent être remplis pendant 10 heures au cours de la période comprise entre 17h (CET) et 5h (c.-à-d. qu'il peut y avoir un écart entre les deux), ou pendant 7 heures consécutives au cours de cette période, c.-à-d. sans écart. Si le degré de couverture n'est pas donné, une baisse de température d'au moins 0,3°C/h doit avoir eu lieu exactement aux mêmes heures.

Höhe ü.M.: 456 m
Geogr. Koord.: 46.51 N / 6.67 E
CH-Koord.: 2'540'819 / 1'151'511
Klimaregion: Westliches Mittelland

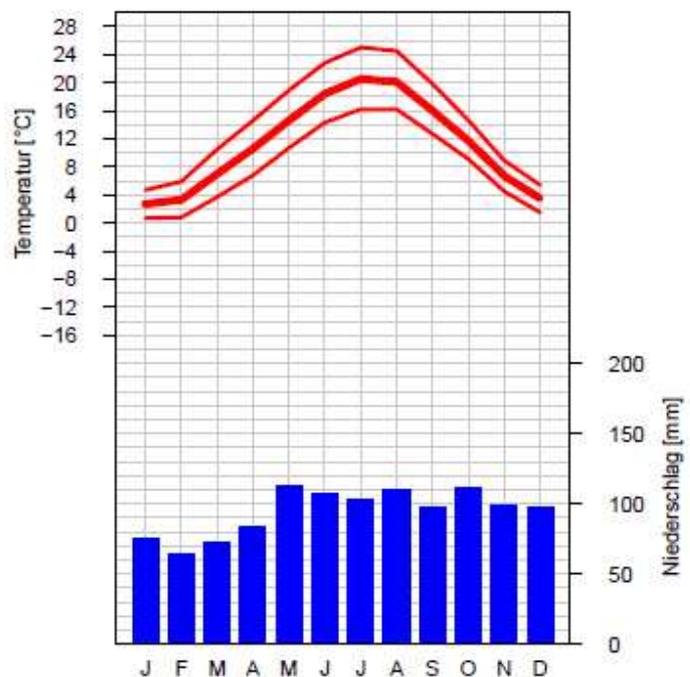
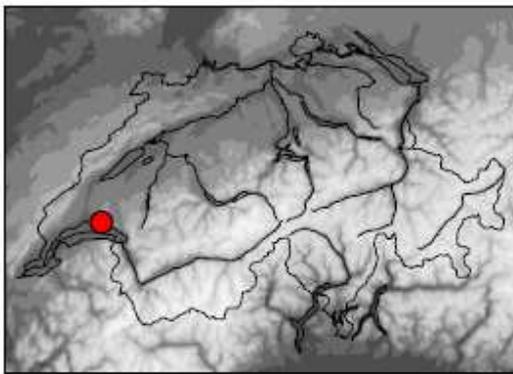


Figure 3 : Diagramme climatique pour la station de mesure de Pully (Vaud), période 1991-2020 (MétéoSuisse 2024a)

Pendant les mois d'été (juin, juillet, août), en moyenne **47 %** des nuits sont autochtones, ce qui représente 43 nuits autochtones (moyenne sur la période considérée ; Figure 4).

Le climat en Suisse (et dans le canton de Vaud) a changé de manière significative et observable au cours des dernières décennies en raison du réchauffement climatique. L'augmentation de la température moyenne suisse depuis 1864 jusqu'à aujourd'hui est d'environ 2,7°C. C'est beaucoup plus que l'augmentation de la température mondiale moyenne de 0,8°C au cours de la même période. La Figure 5 montre l'évolution récente des températures estivales pour les mois de juin, juillet et août depuis 1864 par rapport à la période climatique 1961-1990. Il est facile de constater une tendance positive significative dans les températures estivales (ligne noire). À partir de 2015, presque toutes les années s'écartent de la période 1961-1990 avec environ +3°C. L'année 2003 est celle qui présente l'écart positif le plus important par rapport à la période, environ +4,5°C. Ce graphique illustre le fait que les changements climatiques sont déjà en cours et peuvent être observés dans la série de mesures. Depuis les années 1980, les températures ont augmenté de manière significative et sont restées à un niveau élevé.

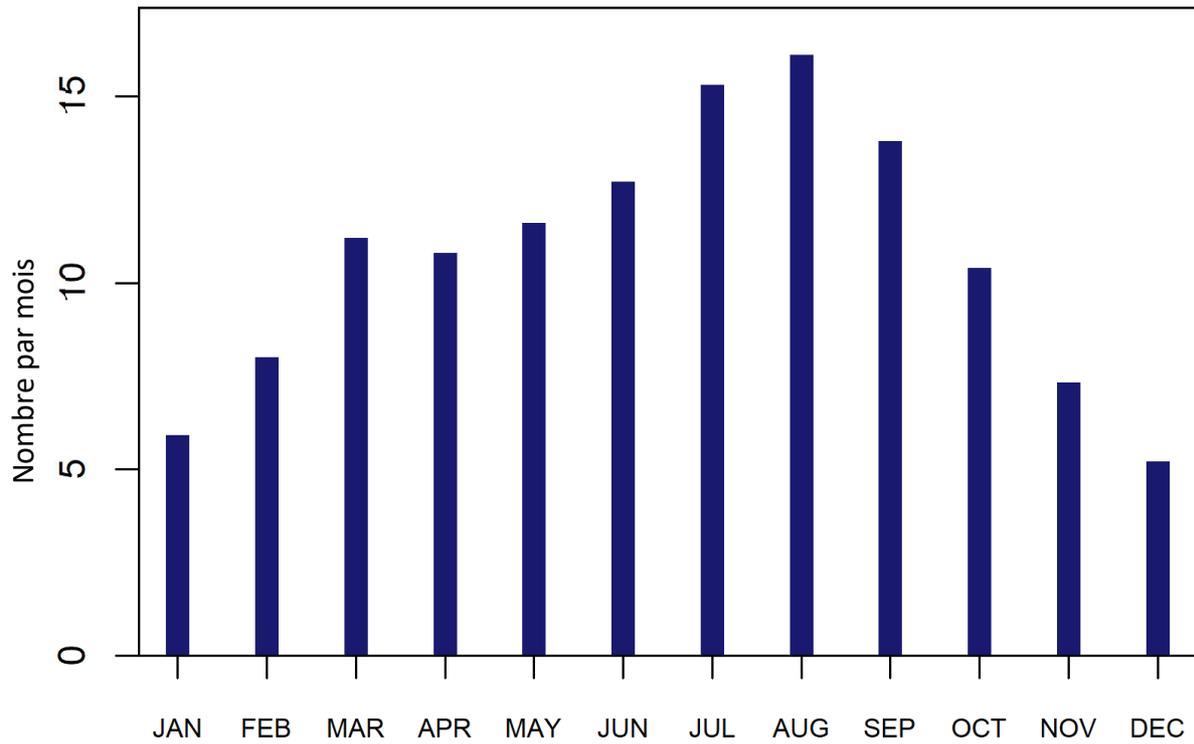


Figure 4 : Nuits autochtones : nombre mensuel moyen à long terme (au total 123,6 par an) 1981-2022. Station : Payerne

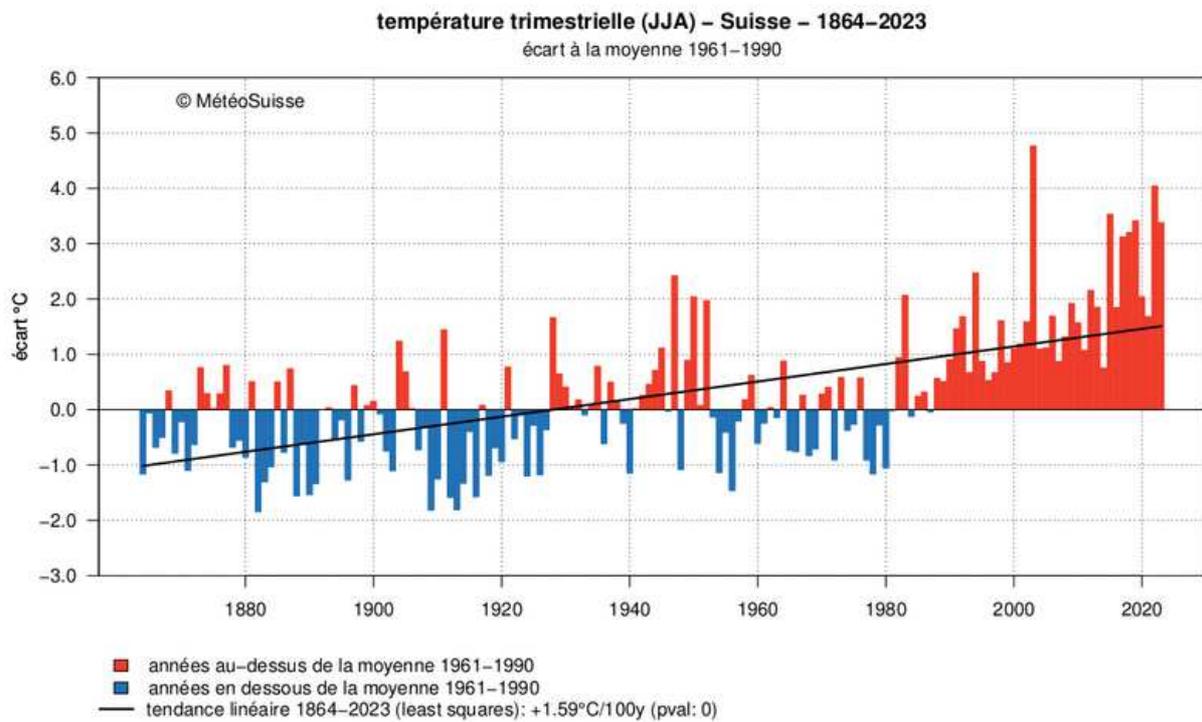


Figure 5 : Évolution des températures estivales de la Suisse de 1864 à nos jours par rapport à la période 1961-1990 (MétéoSuisse 2024c)

CLIMAT FUTUR

L'augmentation des températures moyennes mondiales est largement contrôlée par les émissions anthropiques de CO₂. Comme on ne sait toujours pas comment les émissions de CO₂ vont évoluer à l'avenir, elles sont examinées sur la base de différents scénarios impliquant un certain forçage radiatif (c.-à-d. la contribution au bilan énergétique de l'atmosphère qui entraîne le réchauffement) d'ici l'an 2100. Trois scénarios climatiques différents sont actuellement disponibles pour la Suisse, à savoir RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5⁸ (Figure 6).

Les scénarios climatiques pour la Suisse (aussi appelé « Données CH2018 ») sont le résultat d'une collaboration entre le National Centre for Climate Services (NCCS) et le ETH Centre for Climate Systems Modeling (C2SM) publiés sur la plateforme web du NCCS. L'ensemble de données CH2018 est basée sur les trois scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5 de l'initiative EURO-CORDEX. Afin de pouvoir faire des déclarations fiables sur les changements et incertitudes simulés, les données climatiques sont agrégées spatialement pour chaque canton. Afin de décrire les changements climatiques futurs, des observations climatiques sur une période dite de référence sont nécessaires (voir introduction au chapitre 2.2). La période standard officielle actuelle 1981-2010 recommandée par l'Organisation Météorologie Mondiale (OMM) est utilisée comme période de référence pour le calcul des changements climatiques futurs. Pour la projection des changements climatiques, les trois périodes futures 2020-2049, 2045-2074 et 2070-2099 sont utilisées ; par souci de simplicité, ces périodes sont désignées par l'année centrale correspondante de la fenêtre temporelle (c.-à-d. 2035, 2060 et 2085 ; CH2018 (2018)).

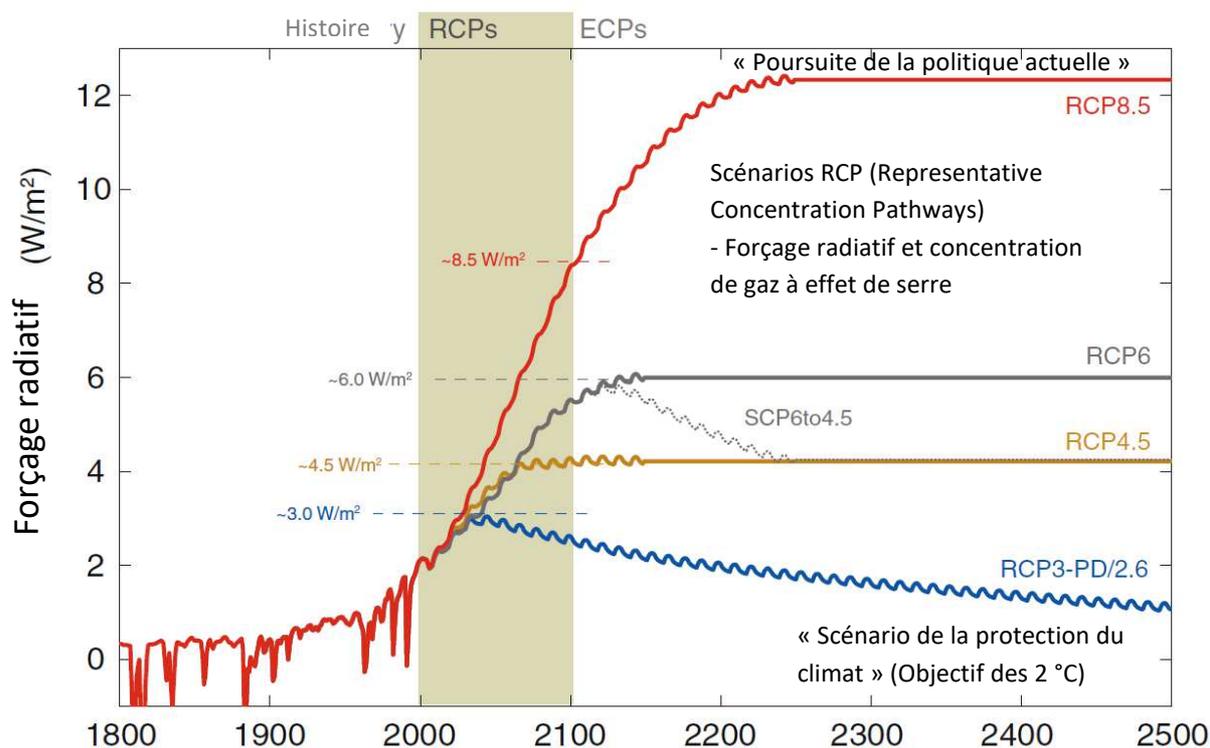


Figure 6 : Les scénarios climatiques RCP 8.5, RCP 6, RCP 4.5 et RCP 2.6 (Meinshausen et al. 2011, modifié par GEO-NET)

⁸ Representative Concentration Pathways (RCP) = scénarios de développement de la concentration des gaz à effet de serre pertinents pour le climat. Les chiffres figurant dans les noms des scénarios représentent le forçage radiatif moyen en W/m² qui sera atteint d'ici l'an 2100.

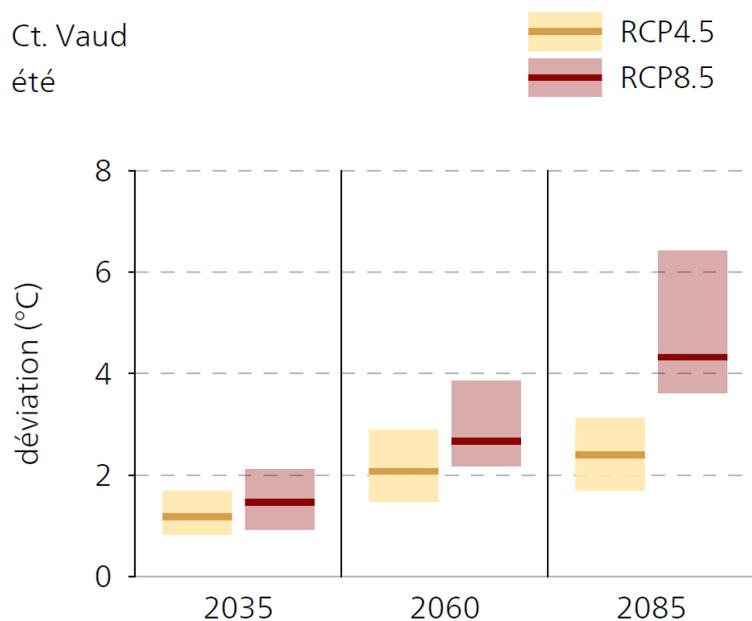
La Figure 7 illustre le développement des températures d'été par scénario climatique futur et horizon temporel relatif à la période standard 1981-2010 pour le canton de Vaud. Les valeurs médianes des changements de la température sont présentées à droite.

Le scénario RCP 2.6 présente une hausse des températures d'été de +1,3°C jusqu'au milieu du siècle (2060) et une légère baisse jusqu'à la fin du siècle. Ce scénario suppose la mise en œuvre d'un grand nombre de mesures d'atténuation des changements climatiques dans les années 2020, de sorte que leur impact puisse ensuite être observé à partir des années 2070. Le scénario moyen RCP 4.5 projette une hausse des températures d'été plus forte de +2,1°C jusqu'au milieu du siècle (2060). Cette augmentation continue jusqu'à la fin du siècle parce que moins de mesures d'atténuation des changements climatiques sont mises en œuvre selon ce scénario, et atteint +2,4°C. Reflétant le développement actuel des émissions des gaz à effet de serre sans véritable mise en œuvre de mesures d'atténuation des changements climatiques, le scénario RCP 8.5, projette une *augmentation globale* de la température de +4,8°C jusqu'à la fin du siècle relatif au niveau préindustriel (IPCC AR5). Ce scénario est associé à la hausse de la température d'été la plus forte : +4,3°C jusqu'à la fin du siècle (2085), +2,7°C jusqu'au milieu du siècle (2060). Ce signal des changements climatiques de la température est appliqué pour représenter la situation future dans la modélisation.

Température

déviaton de la période standard 1981-2010

Ct. Vaud
été



© scénarios climatiques CH2018

Signal de changement moyen (médian)

RCP 2.6:

2035 : + 1,2 °C
2060 : + 1,3 °C
2085 : + 1,2 °C

RCP 4.5:

2035 : + 1,2 °C
2060 : + 2,1 °C
2085 : + 2,4 °C

RCP 8.5:

2035 : + 1,5 °C
2060 : + 2,7 °C
2085 : + 4,3 °C

Figure 7 : Canton de Vaud : augmentation de la température en été par période et scénario (estimations moyennes). Déviation de la période standard 1981-2010 (NCCS 2024)

3. Méthode

3.1 LE MODÈLE FITNAH-3D

En pratique, les questions de météorologie environnementale se posent généralement à l'échelle d'une ville ou d'une région (mésos-échelle). Les phénomènes météorologiques pertinents ici ont une extension spatiale de quelques mètres jusqu'à plusieurs kilomètres et une durée de quelques minutes à quelques heures. Les phénomènes de méso-échelle sont les brises thermiques, les brises de mer et de terre ou l'îlot de chaleur urbain, tandis que l'influence des obstacles sur le vent (ex. canalisation, turbulences) ou l'effet des mesures d'ombrage constituent des effets à micro-échelle.

Bien que la structure générale et les causes physiques de ces phénomènes climatiques locaux soient essentiellement connues, il reste des questions ouvertes concernant l'extrapolation vers d'autres endroits ou les interactions des différents systèmes d'écoulement entre eux. Quoique la distribution des variables météorologiques telles que le vent et la température puisse être déterminée par des mesures, en raison de la grande variation spatiale et temporelle des conditions météorologiques, les mesures ne sont représentatives qu'en certains points et l'extrapolation (en particulier dans des environnements complexes) vers des zones voisines est rarement possible. Par conséquent, il est difficile de faire une évaluation climatologique urbaine complète (c.-à-d. sur l'ensemble de la surface de la zone) à partir d'un nombre limité d'observations.

À partir d'un programme prioritaire de la *Deutsche Forschungsgemeinschaft*, une série de modèles à l'échelle méso et micro a été conçue et réalisée en Allemagne (DFG 1988) et l'état actuel de développement de ces modèles est extrêmement élevé. Grâce à l'expérience acquise au cours des dernières décennies dans l'utilisation de ces modèles, un autre outil puissant pour traiter les questions de météorologie environnementale dans l'aménagement urbain et paysager est ainsi disponible, en plus des mesures sur site et des études en soufflerie. Les modèles sont basés, tout comme les modèles de prévisions météorologiques et climatiques, sur un ensemble d'équations d'équilibre et de conservation. 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*)⁹.

Les modèles méso-échelle tels que FITNAH-3D peuvent ainsi être utilisés pour répondre aux questions de climatologie urbaine de manière plus complète que les campagnes de mesures. Ils comblent les écarts spatiaux et/ou temporels entre les mesures sur une base physiquement solide, calculent d'autres variables météorologiques et déterminent les champs d'écoulement et de température dans leur structure de remplissage de l'espace. En outre, les calculs du modèle offrent l'avantage de pouvoir mener des simulations et ainsi étudier l'effet et l'efficacité des variantes de planification et des mesures de compensation afin de mettre en évidence des solutions optimisées.

La solution des systèmes d'équations se fait dans une grille numérique. La largeur de la grille doit être choisie de telle manière que les caractéristiques climatiques locales de la zone d'étude puissent être saisies par le modèle. Plus la grille est fine, plus les détails et les structures ont une bonne résolution, mais 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 horizontal utilisé pour

⁹ Pour des informations plus détaillées sur FITNAH-3D, se référer à Groß (1992).

la modélisation avec FITNAH-3D est de 10 m. En revanche, la hauteur de maille n'est pas constante : elle est particulièrement petite près du sol (afin de saisir de manière réaliste la forte variation des variables météorologiques) et augmente avec l'altitude. 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 3 000 m. À cette altitude, on suppose que les perturbations causées au niveau du sol par l'orographie, la topographie et l'utilisation des sols sont négligeables.

3.2 CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET CALCULS EFFECTUÉS

L'étude climatique du canton de Vaud 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 (i.e. rayonnement élevé) et un vent synoptique (i.e. vent à large échelle) qui ne se superpose que très faiblement, de sorte que les caractéristiques climatiques locales sont prépondérantes. La caractéristique d'une telle situation météorologique (haute pression) est la formation de brises thermiques, c.-à-d. de courants d'égalisation entraînés par la différence de température entre les espaces verts et ouverts plus froids et les espaces bâtis plus chauds.

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, voir chapitre 2.2).

Tableau 1 : Température à 21 heures pour la période 1981-2010 à différentes stations de MétéoSuisse

Nom de la station	Température moyenne de 21 heures [°C] pendant les mois d'été de juin à août	Température moyenne de 21 heures [°C] des jours d'été	Température moyenne de 21 heures [°C] des jours tropicaux	Altitude [m]
Genève/Cointrin	17,9	20,5	22,9	410
La Dôle	10,1	20,9	-	1669
Nyon/Changins	17,8	20,7	23,3	458
Pully	18,7	22,0	25,3	455
Bullet/La Frétaz	12,5	20,5	-	1205
Neuchâtel	18,2	21,7	24,4	485
Payerne	16,4	19,2	21,7	490
Aigle	16,7	19,2	21,7	381
Sion	17,6	19,8	21,7	482
Le Moléson	8,8	-	-	1974

Pour déterminer la température initiale de la modélisation, on procède à une analyse des stations de MétéoSuisse du canton (Tableau 1). Les températures en été et des jours tropicaux à 21 h sont analysés.

Comme cette évaluation révèle des valeurs très différenciées par station, les critères suivants sont déduits pour la sélection d'une station MétéoSuisse représentative :

- Station dans le canton de Vaud
- Période 1981-2010 disponible
- Environnement rural (si possible non influencé par la ville)
- Pas d'eau de surface à proximité
- Pas en montagne

Remplissant tous ces critères, la station de **Nyon / Changins** est donc choisie comme référence. La modélisation de la situation actuelle est ainsi initialisée avec une température de 20,7°C à 21 h.

Pour la situation future, l'augmentation de température supposée pour la représentation des changements climatiques se réfèrent aux résultats des scénarios climatiques pour la Suisse (CH2018). La hausse de température de +2,7°C correspond au signal de changement estival moyen du scénario RCP 8.5 pour le canton de Vaud jusqu'en 2060 (voir la section « climat futur » du chapitre 2.2).

Tableau 2 : Aperçu des états modélisés pour le canton de Vaud

Situation	Période climatique	Température de départ à 21 h	Température de l'eau	Occupation des sols
Situation actuelle	1981-2010 « 1995 »	20,7 °C	voir chapitre 3.3	Situation actuelle (2019-2022)
Situation future	2045-2074 « 2060 »	23,4 °C (20,7 °C + 2,7 °C)	+ 1,35 °C	Situation actuelle (2019-2022), avec les réserves en zone d'habitation et mixte et réserves en zone d'activité occupées de la même manière que les espaces bâtis existants qui leur correspondent.

Afin de pouvoir tenir compte des vents synoptiques, une méthode de « nesting » est utilisée. La base de données utilisée pour le « nesting » est le champ d'écoulement issu de la modélisation nationale de la Suisse avec une résolution à 100 m. La méthode de « nesting » consiste à reporter les informations relatives à l'écoulement d'air à grande échelle sur la zone d'étude plus petite du canton de Vaud.

3.3 DONNÉES 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, sont prises en compte :

- Altitude du terrain
 - Modèle numérique du terrain (2019)
- Occupation des sols
 - Mensuration officiel (2023)
 - Affectation du sol (2021)
 - Arbres isolés (2019)
 - Photo aérienne infra-rouge (2020 / 2021)
 - SWISS TLM 3D (2022)

- Réserves en zone d'habitation et mixte (2021)
- Réserves en zone d'activité économiques (2021)
- Hauteur des structures
 - Modèle numérique de hauteur (2019)
 - Raster des hauteurs de la végétation (2019)
 - Hauteurs des bâtiments (2019)
- Température de l'eau
 - Le Léman ~ 20,4°C
 - Lac de Morat ~ 20,8°C
 - Lac de Neuchâtel ~ 20,46°C
 - Lac de Joux ~ 20,09°C
 - Lac de l'Hongrin ~ 19,67°C
 - Cours d'eau : température de l'eau en fonction de l'altitude

L'analyse climatique reproduit l'état du canton pour des conditions données (autochtones) sur une base statique. La situation actuelle du canton de Vaud est représentée par un ensemble de données plus récentes que 2019. Dû à la nécessité de combiner des géodonnées dont les années d'origine diffèrent, on ne peut pas supposer une année précise qui représente l'état du canton. Au moment de la préparation des données d'entrée (en 2022), les données de bases (modèle numérique de terrain, occupation du sol, etc.) étaient les plus actuelles possibles. Toutes les données d'entrée ont été soumises à un contrôle de plausibilité au moyen d'orthophotographies et vérifiées par le mandant.

Afin d'enregistrer les processus climatiques entre le canton et ses environs (notamment en ce qui concerne l'échange d'air), la zone d'étude s'étend au-delà des limites du canton. Hors du canton, des données libres ont été utilisées, en particulier les couches de la couverture du sol de la mensuration officielle des cantons voisins et complété par des données fédérales, comme par exemple le modèle de la hauteur de la végétation (Ginzler und Hobi 2015) et les données de bâtiments de « OpenStreetMap ». Bien que les données d'entrée pour la zone autour du canton soient moins détaillées, elles sont généralement suffisantes pour donner une image suffisamment précise du processus entre le canton de Vaud et les cantons voisins. Le territoire cantonal couvre une superficie de 3 212 km² avec une extension allant jusqu'à 91,2 km dans le sens est-ouest et 88,2 km dans le sens nord-sud. La zone d'étude rectangulaire utilisée pour la modélisation s'étend sur une superficie de près de 12 032 km² (111 km x 108,4 km). Comme le nombre de cellules raster résultant de la superficie de la zone d'étude et la résolution horizontale de la modélisation dépasse la capacité de calcul d'une seule modélisation de FITNAH-3D, la zone d'étude est divisée en 12 carreaux modélisés séparément et fusionnés ensuite. Chaque carreau s'étend sur une superficie de 30 km x 30 km résultant en 9 006 001 cellules raster. Les données d'entrée contiennent des informations uniques sur l'altitude du terrain, l'occupation du sol et la hauteur des structures pour chaque cellule. Pour éviter les effets de bord, les carreaux se chevauchent d'au moins 20 % (env. 6 km), tant horizontalement que verticalement.

L'altitude du terrain de la zone d'étude est représentée par un modèle numérique de terrain avec une résolution horizontale originale de 0,5 m, alors agrégé à une résolution horizontale de 10 m pour la modélisation (Figure 8). À l'intérieur du canton, les différences d'altitude sont supérieures à 2 838 m. Le point le plus bas à 372 m au-dessus du niveau de la mer se trouve sur le Léman. Le point le plus haut à 3 210 m au-dessus du niveau de la mer est le sommet des Diablerets.

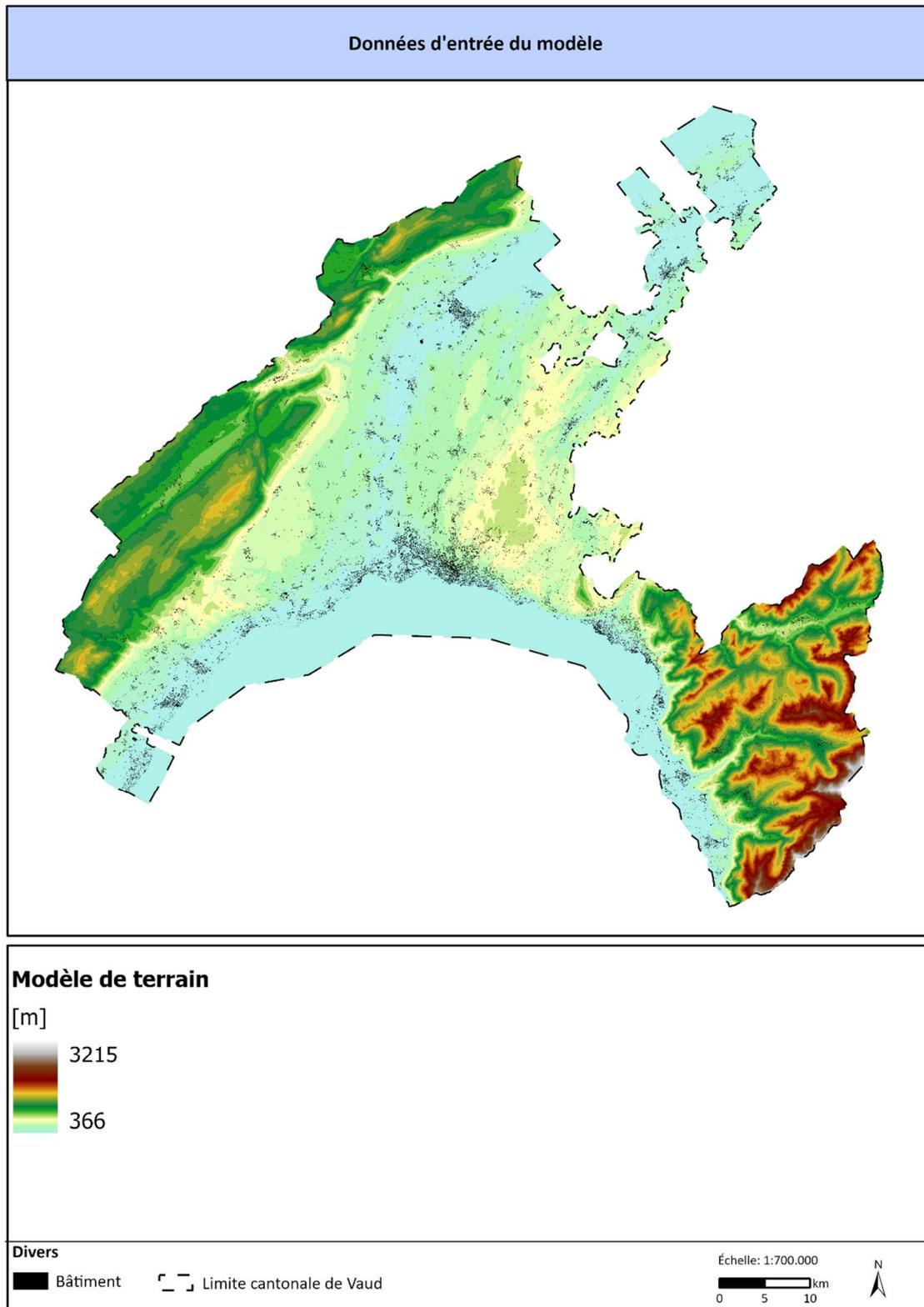


Figure 8 : Modèle numérique de terrain

L'occupation des sols dans le canton est définie par 12 classes différentes (Figure 9), chacune ayant des caractéristiques physiques différentes. Le raster était déduit principalement de la couche des données polygonales de la couverture de sol. Avec la largeur actuelle des cellules de raster de 10 m, il a été possible de représenter les bâtiments et les arbres individuels dans la classification de l'occupation des sols. Pour les arbres ou la haute végétation de plus de 2,5 m, on distingue trois classes de sols différents. Ainsi, on différencie entre les arbres sur une surface imperméable (ex. les arbres des rues), les arbres sur gazon

(ex. les arbres dans les parcs) et les arbres sur un terrain partiellement imperméable (ex. les arbres à côté des voies ferrées ou des terrains de sport). Tandis que le raster de la hauteur de la végétation était agrégé à la résolution horizontale de 10 m, les fichiers de points des arbres isolés non représentés dans le raster de la hauteur de la végétation (ex. de petits arbres urbains) doivent être tamponnés avec le rayon de la couronne pour les intégrer au raster. Les hauteurs de ces arbres sont données dans les fichiers de points. Le canton est caractérisé par un grand pourcentage d'espaces verts : ensemble, les deux classes « 9 – Plein champ, gazon » et « 25 – Arbres sur gazon » représentent environ 91 % du raster de l'occupation des sols.

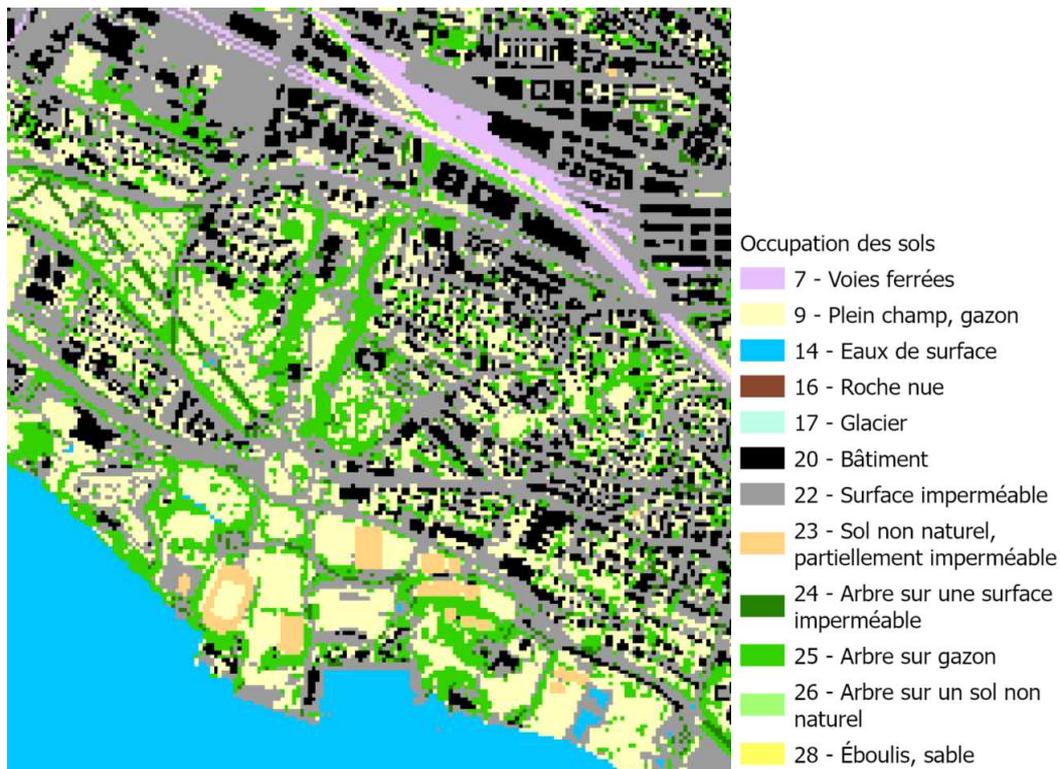


Figure 9 : Partie de la grille « Occupation des sols »

Outre une température de l'air individuelle au niveau du sol, FITNAH-3D est également capable de prendre en compte les températures de surface des eaux qui peuvent être définies en termes d'espace et de temps. Plusieurs sources d'informations sont utilisées pour déduire les températures des eaux : données de mesures de MeteoNews et résultats du modèle de l'Eawag (Institut Fédéral Suisse des Sciences et Technologies de l'Eau).

Les températures des eaux courantes sont déterminées avec les données de mesures des stations de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Comme des données de mesures ne sont pas disponibles pour toutes les eaux, on détermine un gradient de la température en fonction de l'altitude avec les mesures disponibles (Figure 10). Cette méthode permettait d'attribuer une température aux petites eaux de surface.

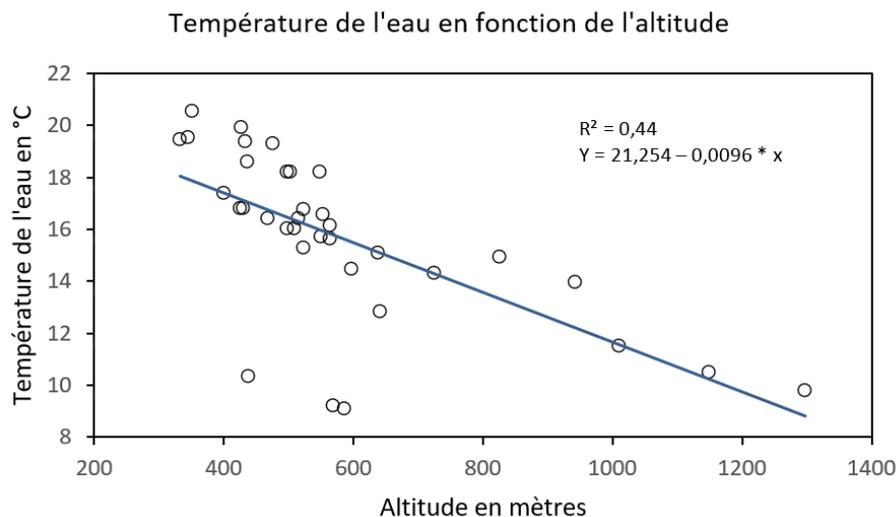


Figure 10 : Température de l'eau en fonction de l'altitude

3.4 DONNÉES D'ENTRÉE DE LA SITUATION FUTURE

L'occupation des sols pour la situation future se base en premier lieu sur celle de la situation de référence. De plus, pour ce scénario (horizon 2060), on fait l'hypothèse de certains développements des espaces bâtis. Le canton de Vaud a mis à disposition des données à partir desquelles des zones potentielles d'habitation et d'activités viennent compléter dans les données d'entrée : « réserves en zones d'habitation et mixtes » avec six types de construction et « réserves des zones d'activités économiques ».

Comme il n'existe pas encore de conceptions plus poussées, de projets d'urbanisme ou de données plus précises sur l'ampleur et l'intensité du développement pour ces zones, l'approche appelée « surfaces jumelles » a été utilisée. Cette approche consiste à sélectionner, pour les zones de développement, des surfaces issues de zones existantes qui correspondent le mieux à l'état d'urbanisation du futur (« surfaces jumelées »). Sur la base des données d'entrée du modèle, les surfaces jumelées sont évaluées en fonction de la répartition représentative de la couverture de surface (pourcentage pour les bâtiments + hauteurs des bâtiments, surface imperméable, pelouse, arbres + hauteurs des arbres, etc.). Ainsi, les zones de développement peuvent être transférées dans l'environnement du modèle sans qu'il soit nécessaire de créer une construction concrète sur la surface concernée. Le [Tableau 3](#) montre les pourcentages des classes d'utilisation pour les différents types d'urbanisation. Lors de la modélisation de la situation future, le module *randomiseur* remplit les zones de développement, pixel par pixel et de manière aléatoire, avec la proportion des classes d'occupation des sols de FITNAH-3D et les hauteurs des structures présentées dans le tableau. Cette approximation permet de modéliser de façon représentative les changements futurs des champs de température et des processus d'air froid, sans préjuger d'une planification concrète des surfaces. La [Figure 11](#) montre l'effet de l'application du *randomiseur* sur la grille de l'occupation future. L'intégration de ces surfaces réduit de 0,2 % la part de surface libre dans le canton. Les classes « 20 – Bâtiment » et « 22 - Surface imperméable » montrent respectivement une augmentation de 0,1 %.

Tableau 3 : Pourcentage des classes de l'occupation des sols pour les types de zones de développement.

TYP NORMAT2	Pourcentages des classes d'occupation des sols					Hauteur [m]	
	Plein champ, gazon	Bâtiment	Surface imperméable	Arbre sur une surface imperméable	Arbre sur gazon	Hauteur des bâtiments	Hauteur des arbres
Zone d'habitation de faible densité	50	17	18	1	14	11	9
Zone d'habitation de forte densité	18	40	31	2	9	18	10
Zone d'habitation de moyenne densité	41	22	25	1	11	14	10
Zone d'habitation de très faible densité	56	12	13	1	18	8	10
Zone centrale	46	25	20	1	8	11	9
Zone pour petites entités urbanisées	60	17	13	0	10	10	10
Zone d'activités économiques	27	26	42	1	4	11	11

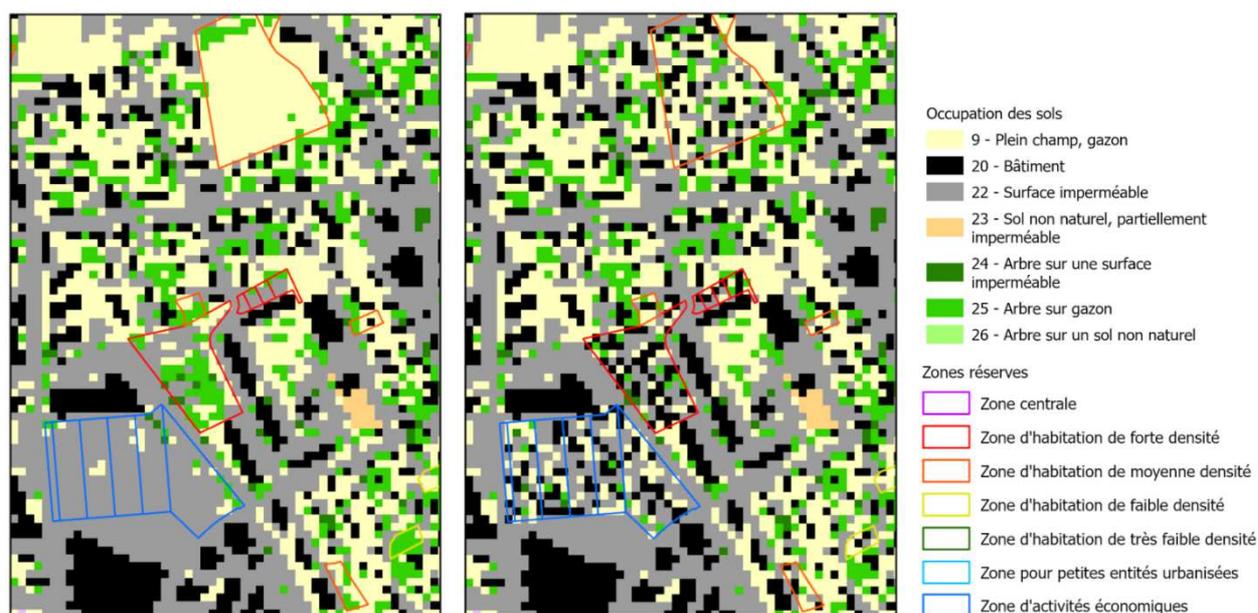


Figure 11 : Raster de l'occupation des sols après l'application du randomiseur sur la commune de Prilly (à gauche = situation actuelle ; à droite = situation future)

3.5 GÉOMÉTRIE 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 (ex. le degré de charge thermique dans l'espace bâti ainsi que l'importance bioclimatique de certains espaces verts et ouverts) doivent cependant se référer à des unités spatiales fonctionnelles clairement délimitables. 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 du canton
- Être la plus actuelle 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 adaptée à la fois à l'échelle de tout le canton et à l'approche d'analyse à haute résolution, c.-à-d. n'être ni trop petite ni trop grossière.

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, procédant ensuite 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 considérées.

Grâce à cette procédure, les résultats de l'analyse climatique sont disponibles en double exemplaire : d'une part, en tant que distribution par grille des paramètres climatiques dans le continuum spatial (chapitre 4), d'autre part, en tant qu'unités de surface pertinentes pour la planification et à l'échelle réelle qui peuvent être délimitées dans l'espace (ex. carte indicative de planification du chapitre 6).

3.6 DÉFIS ET INCERTITUDES

3.6.1 INCERTITUDES DE LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE

La modélisation numérique du climat urbain est généralement supérieure à d'autres approches climatologiques ou météorologiques (ex. les mesures ou l'analyse de SIG sur la base d'une classification climatique) du fait que les résultats représentent les processus sur l'ensemble de la zone d'étude. Les modélisations comportent néanmoins des incertitudes qu'il convient d'évoquer dans le cadre d'une approche analytique globale axée sur la transparence et l'acceptation. Ces incertitudes peuvent être classifiées de la façon suivante :

- Les incertitudes du modèle (« incertitudes internes »)
- Les incertitudes des données d'entrée (« incertitudes externes »)

Les modèles sont, par définition, des représentations incomplètes de la réalité (Stachowiak 1973). Ils n'ont donc pas la prétention de représenter le système à modéliser de manière exhaustive, mais de manière « suffisamment bonne ». Le domaine d'utilisation prévu pour le modèle constitue le critère d'évaluation de la qualité. Ceci s'applique particulièrement pour les modèles du climat (urbain) à cause de la complexité de l'atmosphère (urbaine) décrite par des équations physiques. Par conséquent, FITNAH-3D n'est pas associé à l'ambition de représenter tous les processus physiques atmosphériques dans les moindres détails, mais uniquement ceux nécessaires à l'accomplissement de la mission. Le modèle remplit les standards de modélisations de champs d'écoulement définis dans la directive VDI¹⁰ 3787. Cependant, il existe des processus dont la représentation ne peut pas être garantie selon les directives VDI, mais qui peuvent induire des incertitudes. Conforme à l'état de la technique, FITNAH-3D est utilisé dans le mode « RANS¹¹ »

¹⁰ VDI : Association des ingénieurs en Allemagne

¹¹ RANS : Reynolds-averaged Navier-Stokes equations

dans lequel les turbulences atmosphériques ne sont pas décrites explicitement, mais à l'aide d'équations simplificatrices. En revanche, il y a les modèles de « SGS » (simulation des grandes structures de la turbulence) qui font encore l'objet de recherche et développement dans le cadre d'application du climat urbain. Une preuve sur l'amélioration des modélisations reste à apporter et peut actuellement être attendue du modèle PALM-4U (Raasch & Schröter 2001).

À une micro-/mésos-échelle, les données disponibles et nécessaires pour la préparation des données d'entrée de la modélisation sont souvent la source d'incertitudes plus pertinentes. Les incertitudes résultent des facteurs suivants :

- L'actualité des données
- La précision des informations fournies dans les données
- Le mode de traitement dans le cadre de l'analyse

L'actualité des données est décrite au chapitre 3.3. Généralement, les données les plus actuelles sont associées à des incertitudes plus faibles. La période de collecte des données ne doit pas remonter à plus de deux ou trois ans environ, particulièrement pour les zones au développement dynamique (à l'exception des données individuelles moins pertinentes). Cette prémisse est remplie en majeure partie pour cette analyse. Les contradictions entre les données différentes et les informations obsolètes ont pu être corrigées et actualisées par comparaison avec des orthophotographies, mais elles ne sont pas totalement et strictement exclues. Néanmoins, l'objectif est d'utiliser les données disponibles de la meilleure qualité possible. Une actualisation de l'analyse climatique est donc recommandée avec l'actualisation des données pertinentes pour la modélisation (ex. MNH, MNT, photos aériennes). La qualité de collecte des données par télédétection s'est fortement améliorée ces dix dernières années. Les photos aériennes avec une résolution horizontale de quelques centimètres sont disponibles aujourd'hui, si bien que des incertitudes mineures ne peuvent plus se produire que dans les espaces sans visibilité (ex. à l'ombre des bâtiments). Cette source d'incertitudes se résoudra déjà avec la prochaine génération de photos aériennes (« TrueDOP »).

Toutes les données d'entrée de la modélisation ont été converties en une grille régulière (10 m x 10 m) dont les cellules représentent l'occupation principale d'une surface de 100 m². Il s'agit de la résolution la plus fine actuellement possible pour une modélisation sur l'ensemble du canton de Vaud. A cette résolution l'effet des structures plus fines est encore sous-estimé. Les villes ont souvent des structures particulièrement fines de sorte que plusieurs types de structure différentes se trouvent dans la même cellule. Dans les données d'entrée, seule l'occupation la plus importante au sein d'une cellule peut être prise en compte. Ainsi, par exemple, des arbres isolés ayant une petite couronne ne sont pas enregistrés, ce qui entraîne des conséquences, particulièrement pour la PET (chapitre 4.3). Il est donc possible, qu'une rue avec des arbres ayant de petites couronnes ne soit pas entièrement reconnue comme telle. Néanmoins, on peut s'attendre à ce que ces effets n'aient qu'un impact très local et que les conséquences ne soient pas pertinentes au niveau de la carte indicative de planification ou à l'échelle du canton. Un regard local sur les données d'entrée est toutefois recommandé en cas d'application concrète.

La source d'incertitudes la plus importante est le niveau d'informations des données disponibles, particulièrement concernant les bâtiments. Sur la base des données disponibles, les bâtiments sont représentés dans cette analyse comme modèle en bloc (LOD 1), c.-à-d. avec l'emplacement spatial exact et la hauteur moyenne des toits. C'est suffisant pour définir les bâtiments comme des obstacles au courant dans le modèle. En plus, le taux d'émission de chaleur des bâtiments est suffisamment représenté dans le modèle.

Des incertitudes subsistent cependant pour toute la zone d'étude, dû à un manque d'informations concernant par exemple les matériaux de construction, l'albédo ou le pourcentage de fenêtres. Le taux d'émission de chaleur des bâtiments est actuellement uniquement représenté dans le modèle par le volume de construction. Ce volume de construction est le facteur dominant pour le taux d'émission de chaleur, alors que les informations manquantes mentionnées constituent des facteurs mineurs. Des études de sensibilité indiquent que ces incertitudes et des autres facteurs (ex. les caractéristiques des sols comme la conductivité thermique ou l'humidité du sol) associés aux données d'entrée peuvent entraîner localement une incertitude maximale de la température de l'air (à 2 m du sol) de 1,5°C à midi et de 1,1°C la nuit avec des effets locaux sur le courant thermique du vent (Gross 2014). Il convient de souligner que ces incertitudes ne sont pas causées par le modèle lui-même, mais par la disponibilité et l'existence des géodonnées respectives couvrant toute la zone d'étude. Étant donné les développements rapides dans le domaine de la télédétection et de standards de données (ex. « Building Information Modeling », BIM), on peut s'attendre à ce que ces informations soient disponibles à moyen terme (d'ici env. 10 ans).

En résumé, on peut dire que la modélisation numérique, ainsi que d'autres méthodes d'analyse environnementales en général et de la climatologie appliquée en particulier, est associée à des incertitudes. Ces incertitudes ne sont pertinentes que sporadiquement au niveau local et sont par conséquent négligeables par rapport aux principaux résultats de la présente analyse, en particulier à la carte indicative de planification. Néanmoins, une mission importante de la discipline pour les années à venir concerne la réduction des incertitudes et la poursuite de l'amélioration continue des résultats de modélisation sur un niveau déjà très élevé. En l'occurrence, le plus grand potentiel se trouve dans l'optimisation de la prise en compte des caractéristiques des bâtiments et des sols (Gross 2019).

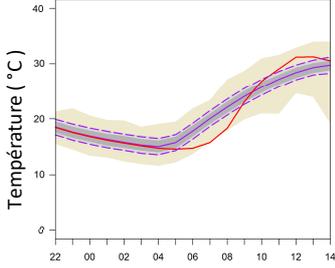
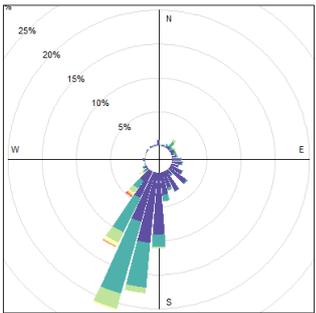
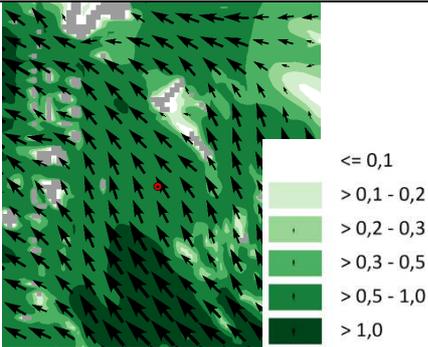
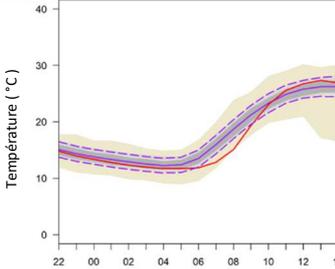
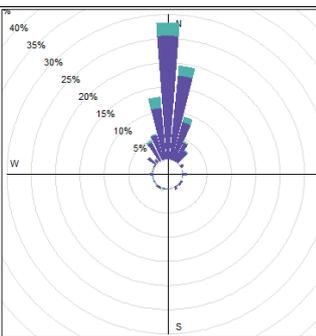
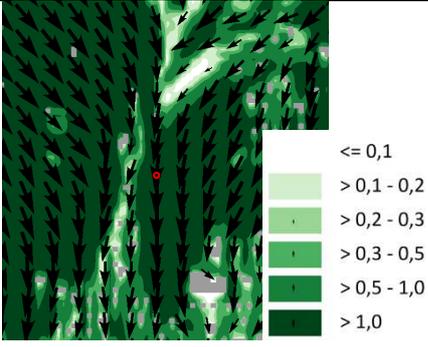
3.6.2 VALIDATION DE LA MODÉLISATION

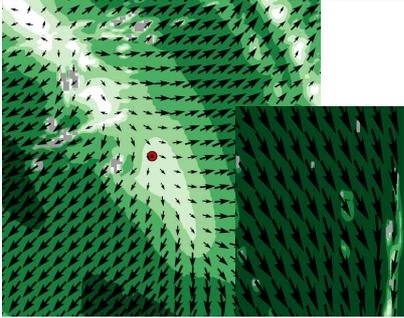
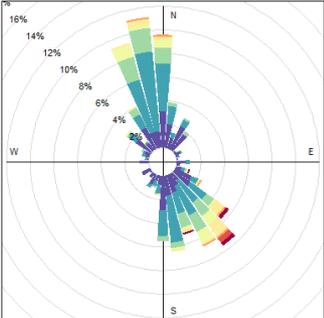
Les résultats de la modélisation de FITNAH-3D ont été comparés avec les mesures météorologiques de MétéoSuisse dans le canton de Vaud. Plus spécifiquement, la comparaison a été effectuée avec les températures à 2 m du sol de 22 h à 14 h et la direction du vent nocturne pendant des jours avec les conditions autochtones (voir chapitre 2.2) et avec des conditions de la température similaires aux conditions considérées dans la modélisation, i.e. les valeurs des paramètres suivants ne doivent pas différer plus de +/- 3 °C entre les résultats de la modélisation et la mesure sur la période 22 h - 14 h :

- Température minimale
- Température maximale
- Moyenne de température pour la période considérée
- Température de 22 h

La comparaison était généralement possible avec les données de trois stations de MétéoSuisse dont les données nécessaires pour l'évaluation des conditions autochtones étaient disponibles : Payerne, Château d'Oex et Aigle. Un résumé de la comparaison est présenté dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Résumé de la comparaison entre les résultats de la modélisation et les mesures météorologiques au canton de Vaud.

Station	Période	Résumé de l'analyse comparative
<p>Payerne</p>	<p>1981-2022</p>	<p>Mesures de qualité de la modélisation* pour la température de l'air entre 22 h et 14 h :</p> <p>$R^2 = 0,96$; MAE = 1,34 ; RMSE = 1,91</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Température (°C)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Rose de vents mesurés à 4 h</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;">  <p>Résultat de la modélisation Vitesse du vent à 4 h en m/s</p> </div> </div>
<p>Château d'Oex</p>	<p>2013-2022</p>	<p>Mesures de qualité de la modélisation* pour la température de l'air entre 22 h et 14 h :</p> <p>$R^2 = 0,98$; MAE = 1,06 ; RMSE = 1,43</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Température (°C)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Rose de vents mesurés à 4 h</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;">  <p>Résultat de la modélisation Vitesse du vent à 4 h en m/s</p> </div> </div>

Station	Période	Résumé de l'analyse comparative
Aigle	2006-2022	<p>Mesures de qualité de la modélisation* pour la température de l'air entre 22 h et 14 h :</p> <p>$R^2 = 0,93$; MAE = 1,97 ; RMSE = 2,69</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Résultat de la modélisation Vitesse du vent à 4 h en m/s</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Rose de vents mesurés à 4 h</p> </div> </div>
<p>* : R^2 - coefficient de détermination ; MAE – erreur absolue moyenne ; RMSE - racine de l'erreur quadratique moyenne</p>		

Des différences entre les résultats locaux de la modélisation et des mesures peuvent généralement être dû aux imprécisions relatives à la représentation des conditions locales dans la résolution du modèle ou dû aux conditions de mesures pas strictement autochtones. À titre d'exemple la comparaison est présentée d'une façon plus détaillée pour la station de Château-d'Oex dans ce rapport. La Figure 12 présente les températures modélisées et mesurées sur la période de 14 h à 22 h. Le résultat de la modélisation correspond bien avec les mesures pour la plupart de la période présentée. Seulement entre 6 h et 9 h, la différence entre la modélisation est les mesures devient plus grande. Néanmoins, avec un coefficient de détermination (R^2), on peut constater que le résultat de la modélisation correspond généralement très bien avec les mesures.

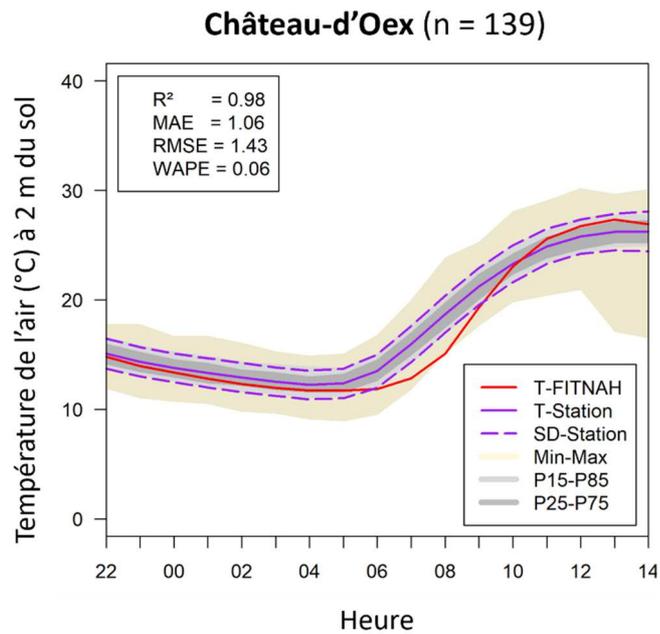


Figure 12 : Comparaison des températures modélisées (ligne rouge) et mesurées (moyenne : ligne violette) à 2 m du sol sur la période entre 22 h et 14 h à Château-d'Oex

La Figure 13 présente le champ de vent modélisé à 4 h à 2 m du sol et la distribution de la vitesse et de la direction du vent mesurées correspondantes. Particulièrement le vent venant du nord est bien représenté par la modélisation. Dans les conditions considérées, la vitesse du vent est généralement faible. Par rapport aux mesures, le modèle prévoit des vitesses de vent similaire à Château-d'Oex. Des différences légères s'expliquent dans ce cas par la hauteur différente (2 m du sol pour la modélisation ; 10 m du sol pour les mesures) et par un écoulement d'air froid augmentant la vitesse du vent près du sol.

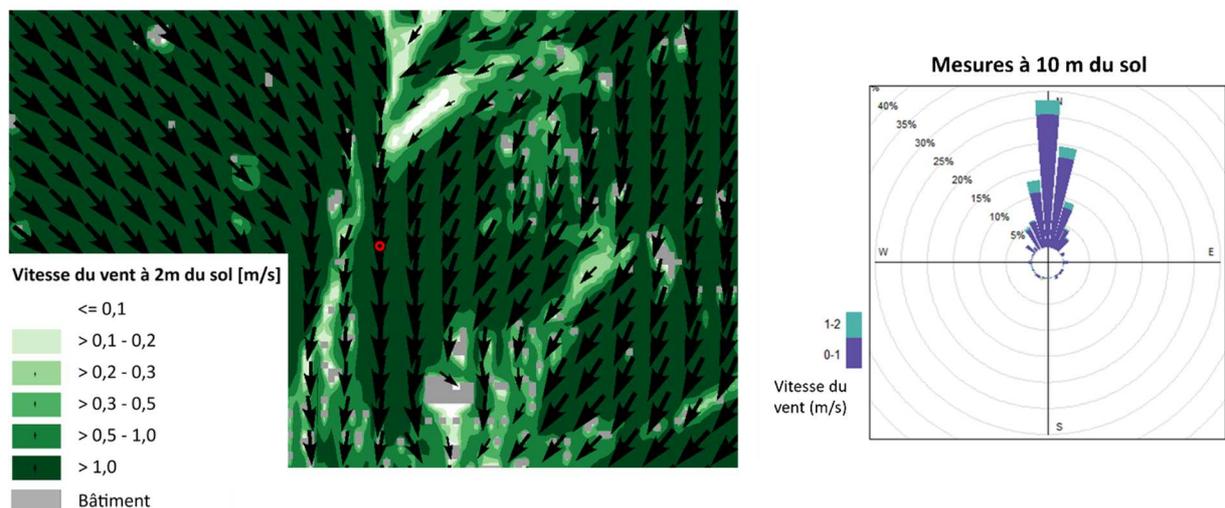


Figure 13 : Champ du vent modélisé à 2 m du sol (gauche) et rose de vent à 10 m du sol (droit) à Château-d'Oex.

Les comparaisons permettent de conclure que les paramètres météorologiques modélisées correspondent généralement bien avec les mesures météorologiques, c.-à-d. que les conditions réelles du canton sont bien représentées par le modèle.

4. Résultats

Les résultats pour la température de l'air, le champ d'écoulement d'air froid et débit d'air froid (situation nocturne) ainsi que la température physiologique équivalente – PET (situation diurne) sont décrits ci-après. Chaque paramètre climatique est considéré à la fois dans ses caractéristiques actuelles et futures (sur la base des hypothèses du scénario 2060).

Les résultats sont basés sur une résolution spatiale horizontale de 10 m (une valeur par cellule de la grille) et sur une situation météorologique estivale autochtone (chapitre 3.2). Ils sont valables à 2 m du sol et correspondent aux conditions de 4 h pour la situation de nuit (refroidissement maximal) et de 14 h pour la situation de jour (irradiation maximale). Les couleurs de la légende ont été sélectionnées de manière à souligner le mieux possible les différences au sein du canton.

4.1 TEMPÉRATURE DE L'AIR NOCTURNE

La détermination du champ de température près du sol permet de délimiter les zones de stress bioclimatique potentiel et d'estimer les caractéristiques spatiales ainsi que l'efficacité des flux d'air froid. Les valeurs de température de l'air indiquées sont représentatives pour une nuit d'été autochtone (situation météorologique donnée).

Selon les conditions météorologiques, l'emplacement, l'altitude et les propriétés du sol, le refroidissement nocturne peut présenter des différences notables, ce qui devient très clair lorsque l'on considère le territoire du canton dans son ensemble avec ses différentes occupations des zones (Figure 14). Ainsi la plage de températures nocturnes comporte des valeurs minimales en-dessous de 0°C près du sol dans les montagnes (ex. Préalpes fribourgeoises et vaudoises). On observe des valeurs maximales dépassant 20°C dans les zones urbaines de forte densité et très imperméables à proximité du Léman, par exemple au port de Lutry, à Ouchy ou dans la vieille-ville de Morges. La haute capacité thermique spécifique de l'eau¹² garantit entre autres une fourchette de températures de l'air réduite au-dessus de plus grandes étendues d'eau ou dans les environs directs, de sorte que, dans certaines circonstances, les températures nocturnes sont mêmes supérieures à celles des environs et le refroidissement des zones urbaines directement adjacentes est atténué pendant la nuit.

Des valeurs maximales nocturnes dépassant à peine les 20°C sont atteintes également de manière isolée sur des zones très imperméables situées à grande distance du Léman, comme la zone industrielle de la rue de l'Industrie à Bussigny. Les valeurs des zones urbaines très imperméables à Yverdon-les-Bains et de nombreuses zones urbaines à Lausanne se situent autour de 19,5°C (en-dessous des valeurs maximales atteintes dans les espaces bâtis qui se trouvent au bord du Léman). La différence de température dans le canton de Vaud s'explique par l'altitude des espaces bâtis et l'emplacement par rapport aux grands lacs. Les lacs stockent l'énergie thermique, émise par le soleil et tombant sur la surface de la terre, et diffusent

¹² De l'énergie thermique est stockée dans l'eau.

celle-ci pendant la nuit, empêchant ainsi tout effet de refroidissement par les eaux dans le cas d'une urbanisation dense correspondante. La température de l'eau du Léman adoptée pour la modélisation s'élève à 20,4°C.

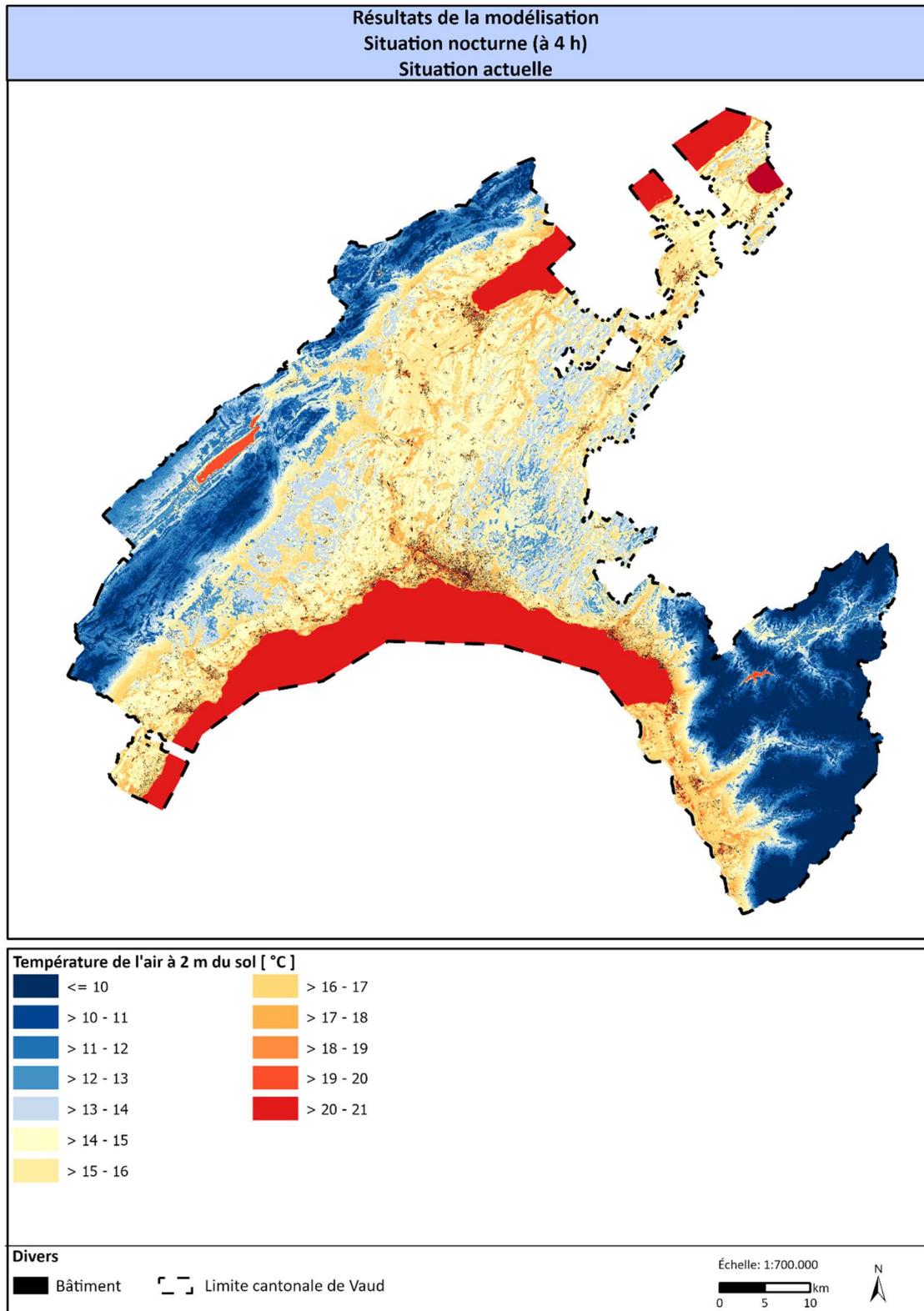


Figure 14 : Température nocturne à 4 h, situation actuelle

L'ampleur de la différence de température dans la zone urbaine dépend avant tout de l'étendue et de la densité de l'urbanisation. Le degré d'imperméabilisation est en particulier élevé au centre des villes et dans les zones à caractère industriel et commercial, ce qui se reflète dans la surchauffe la plus élevée de nuit – même la nuit, des températures proches des 20 °C (Figure 14) y sont atteintes dans les conditions prévues. Dans les espaces bâtis de faible densité et dotés de nombreux espaces verts, comme le long de l'Avenue des Collèges à Pully, les valeurs de température de l'air sont nettement plus basses pendant la nuit (16°C à 18°C). Des différences sont aussi observées au sein d'un même terrain. Des valeurs de température plus élevées sont atteintes à proximité de la rue ou de zones imperméables. Des valeurs plus faibles sont observées dans les jardins familiaux. Les parcs et espaces verts de la ville (ex. cimetière de la Joliette directement adjacent à l'Avenue des Collèges au sud) présentent des températures plus faibles et atteignent 15,5°C. Les zones urbaines de faible densité refroidissent donc la ville localement par elles-mêmes, c.-à-d. sans apport d'air froid provenant des zones naturelles environnantes plus fraîches.

Les terres agricoles et les prairies ainsi que les clairières du canton de Vaud comptent parmi les zones les plus fraîches au sein des espaces verts et ouverts. Plus ces zones sont élevées (Préalpes), plus les températures y sont faibles, en partie en-dessous du point de zéro près des glaciers, par exemple le glacier de Tsanfleuron du massif des Diablerets. Avec des valeurs de 15,5 à 18°C (ex. le Jardin du Rivage à Vevey, la Vallée de la Jeunesse à Lausanne, La Prairie à Morges), les espaces verts urbains comportent un spectre de valeurs supérieur dépendant de leur taille et de la structure de la végétation. La température de ces espaces verts urbains n'est que rarement inférieure à 15°C, si ceux-ci sont intégrés dans des environs plus chauds dans l'ensemble. Ces zones peuvent néanmoins représenter des espaces de compensation potentiels pour les espaces bâtis environnants thermiquement chargés.

Dans les forêts, la canopée atténue le rayonnement nocturne, ce qui réduit le refroidissement associé de l'air près du sol, de sorte qu'en règle générale et en fonction de l'altitude, des valeurs autour de 15 à 17 °C sont atteintes à 2 m au-dessus du sol. Sur les pentes escarpées, la température tombe aussi sous les 10 °C en forêt (ex. dans le parc Jura vaudois). La nuit, la production d'air froid au-dessus des forêts sur terrain plat est moindre qu'au-dessus des espaces ouverts perméables, mais les terrains boisés plus étendus assument un rôle important en tant que zones de production d'air frais, d'où provient de l'air riche en oxygène et relativement froid. Dans les terrains boisés sur pentes, davantage d'air froid est produit et s'écoule, mais l'air froid qui y est produit est plus chaud.

Sur la base des changements climatiques considérés pour la situation future (2060), on fait l'hypothèse d'une augmentation moyenne de +2,7°C de la température estivale (RCP8.5) par rapport à la période de référence 1981-2010. Avec les changements climatiques, le réchauffement des zones urbaines, des zones industrielles et commerciales et des zones de trafic est aussi intense que celui des espaces verts et ouverts (Figure 14 et Figure 15), l'effet d'îlot de chaleur dans la situation actuelle et la situation future restant inchangé. Les espaces bâtis dans les villes comme Lausanne présentent désormais des valeurs nocturnes maximales de 22,5°C. Les espaces bâtis comme le port de Lutry ou Vevey présentent des valeurs en partie supérieures à 23°C à proximité directe du Léman. Des valeurs atteignant 22,5°C à Yverdon-les-Bains ont été modélisées pour des zones bâties individuelles au bord du lac de Neuchâtel.

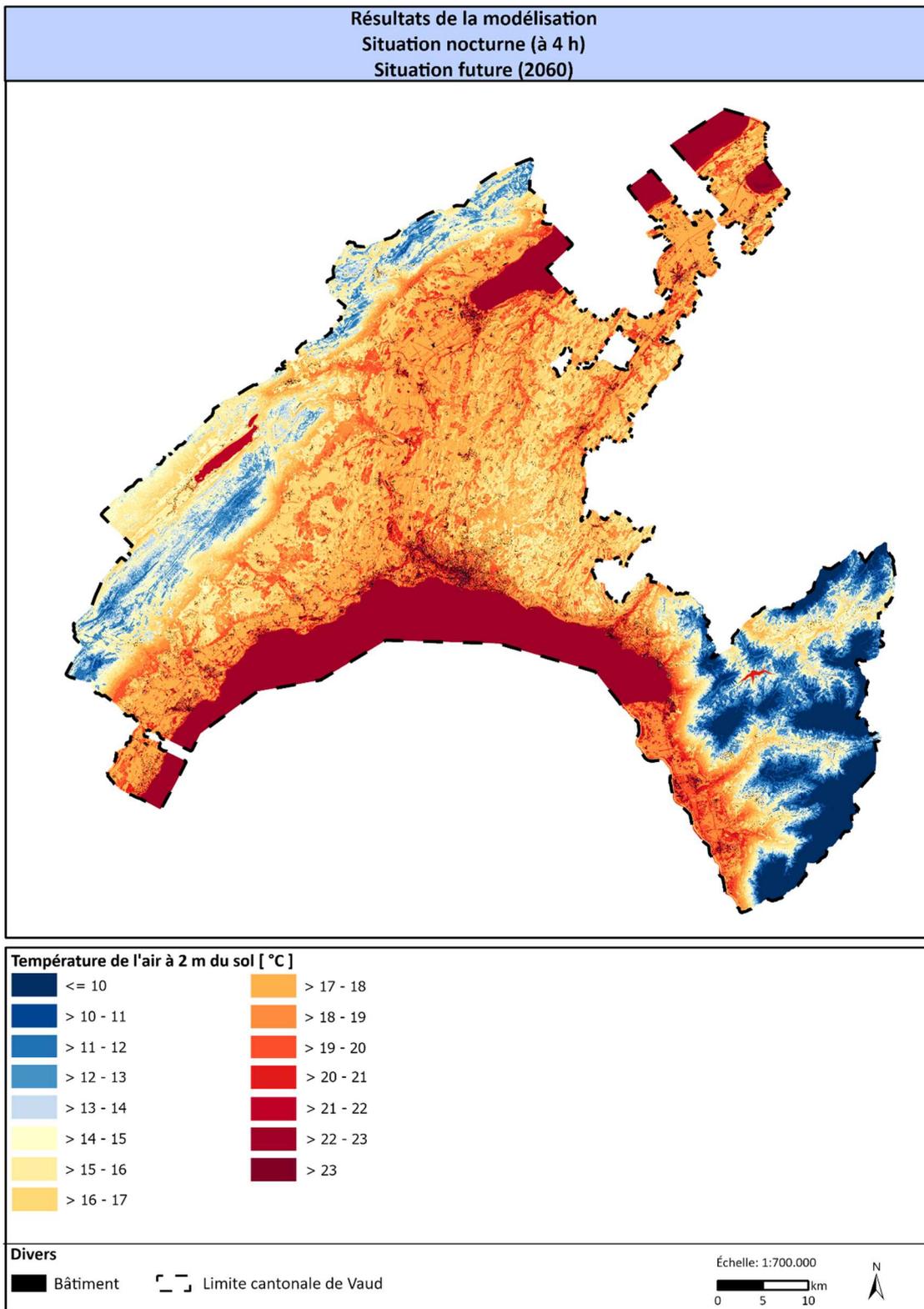
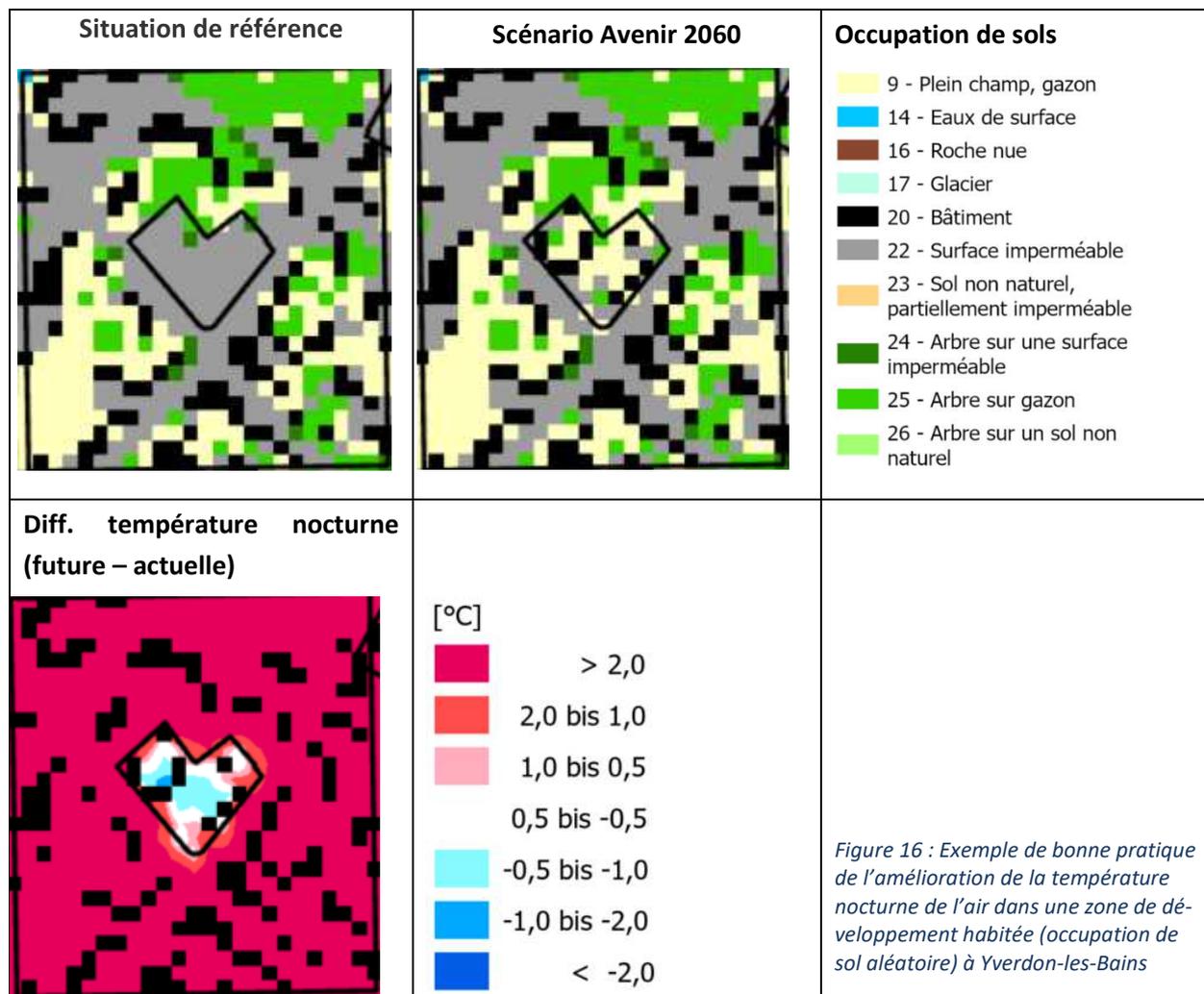


Figure 15 : Température nocturne à 4 h, situation future (2060)

Dans les zones de développement à des fins d'aménagement en zones d'habitation, industrielles et commerciales, qui ont été paramétrées en tant que surfaces d'occupation aléatoire du sol, il faut principalement s'attendre à une augmentation de la température nocturne, à moins d'aménager des zones existantes de plus forte densité ou entièrement imperméables. Ceci est observable dans certains secteurs

habités comme à Yverdon-les-Bains, où une grande aire de stationnement de la rue de Midi doit être convertie en un quartier résidentiel avec des espaces verts. Une réduction de la température d'environ 1°C apparaît ici (Figure 16). Cet exemple peut être considéré comme une bonne pratique, car l'aménagement compense l'augmentation de température induite par les changements climatiques.



4.2 CHAMP D'ÉCOULEMENT NOCTURNE DE L'AIR FROID

Les systèmes d'écoulement locaux tels que les brises thermiques et les écoulements sur la pente sont particulièrement importants pour l'aménagement du territoire : les grandes agglomérations agissent comme des obstacles à l'écoulement en raison de leur forte rugosité aérodynamique, de sorte que la ventilation des espaces urbains est réduite. L'élimination des masses d'air surchauffées et polluées dans les rues, produisant un effet de corridor, peut être considérablement limitée en fonction du type et de la densité de développement. Ces facteurs ont généralement un effet bioclimatique défavorable, surtout dans des conditions météorologiques avec un échange d'air réduit. Par conséquent, les systèmes de flux mentionnés ci-dessus peuvent fournir une compensation climato-écologique importante pour les zones thermiquement chargées en fournissant de l'air froid et plus frais.

Comme la capacité de compensation d'un espace vert ne résulte pas seulement de la vitesse du flux d'air froid, mais est également déterminée dans une large mesure par son épaisseur (c.-à-d. par la hauteur de la couche d'air froid), un paramètre climatique plus complet doit être utilisé pour évaluer les espaces

verts, ce que l'on appelle le débit d'air froid. En termes simples, il est le produit de la vitesse d'écoulement de l'air froid, de son expansion verticale (hauteur de la couche) et de l'expansion horizontale de la section transversale qu'il traverse. Il décrit donc la quantité d'air froid dans l'unité m^3 qui traverse la section d'une pente ou d'un couloir d'air froid à chaque seconde (Figure 17).

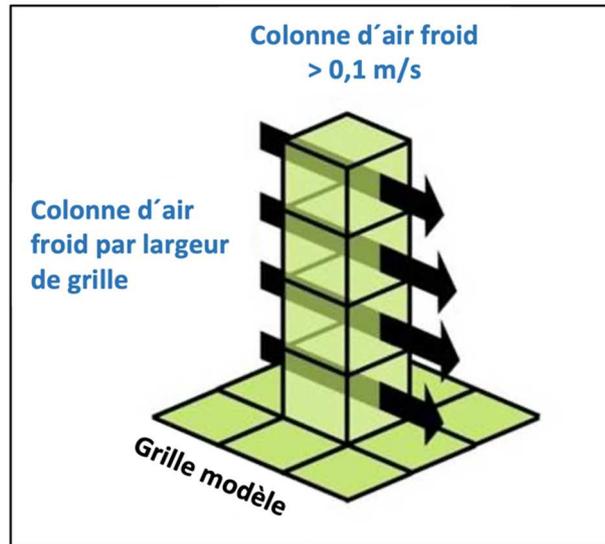


Figure 17 : Schéma du principe du débit d'air froid

De la même manière que les autres paramètres climatiques, le débit d'air froid est une variable dont la force et la direction varient pendant la nuit. Les vitesses d'écoulement qui se produisent au cours de la nuit dépendent essentiellement de la différence de température de l'air froid par rapport à l'air ambiant, de l'inclinaison de la pente et de la rugosité de la surface. L'épaisseur de la couche d'air froid augmente généralement au cours d'une nuit et, tout comme les processus d'échange d'air en général, n'est généralement pas complètement développée avant la deuxième moitié de la nuit.

Les obstacles à la circulation de l'air, tels que les talus de route ou les bâtiments, peuvent provoquer d'importantes accumulations d'air froid du côté au vent. Si de plus grands volumes d'air circulent au-dessus ou autour des obstacles, des réductions de vitesse près du sol se produisent sous le vent, ce qui peut être associé à des décalages verticaux ou horizontaux des maxima d'écoulement. La profondeur de pénétration de l'air froid dans une zone bâtie dépend de la taille de l'agglomération et de la densité des bâtiments, ainsi que du dégagement de chaleur anthropique et de la quantité d'air froid entrant.

Le débit d'air froid montre une grande variabilité dans le canton de Vaud et s'étend sur des valeurs allant de zéro à des valeurs maximales dépassant $200 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$. La densité moyenne du débit d'air froid dans le canton de Vaud est d'à peine $32 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$. Des débits d'air froid élevés sont observés au sud-ouest du canton, sur les pentes près de Les-Poses-sur-Brex, sur les pentes exposées au sud-ouest du Parc Jura vaudois ou au nord du canton, à l'extérieur de Champagne, mais également sur les pentes exposées au sud au bord du Léman (Figure 18). Les valeurs y sont élevées, atteignant jusqu'à $120 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$. L'air froid s'écoule ici et descend en suivant la pente. Du point de vue du climat urbain, de tels flux orientés vers les zones bâties sont particulièrement intéressants. Bien que les débits d'air froid ne soient pas exclusivement dus à la topographie, l'écoulement orienté vers le terrain dans le canton de Vaud est le processus d'écoulement d'air froid survenant le plus fréquemment. Il existe encore d'autres déplacements d'air froid induits, qui sont générés par des différences de température entre l'espace de compensation froid et des entités urbaines chaudes. L'air chaud y monte, créant une dépression, qui est compensée par l'air relativement plus frais provenant de la campagne environnante. On appelle « brises thermiques » ce type de

vents induits par la chaleur et soufflant sur de petites étendues. Ce système est observé aux abords de la ville d'Yverdon-les-Bains.

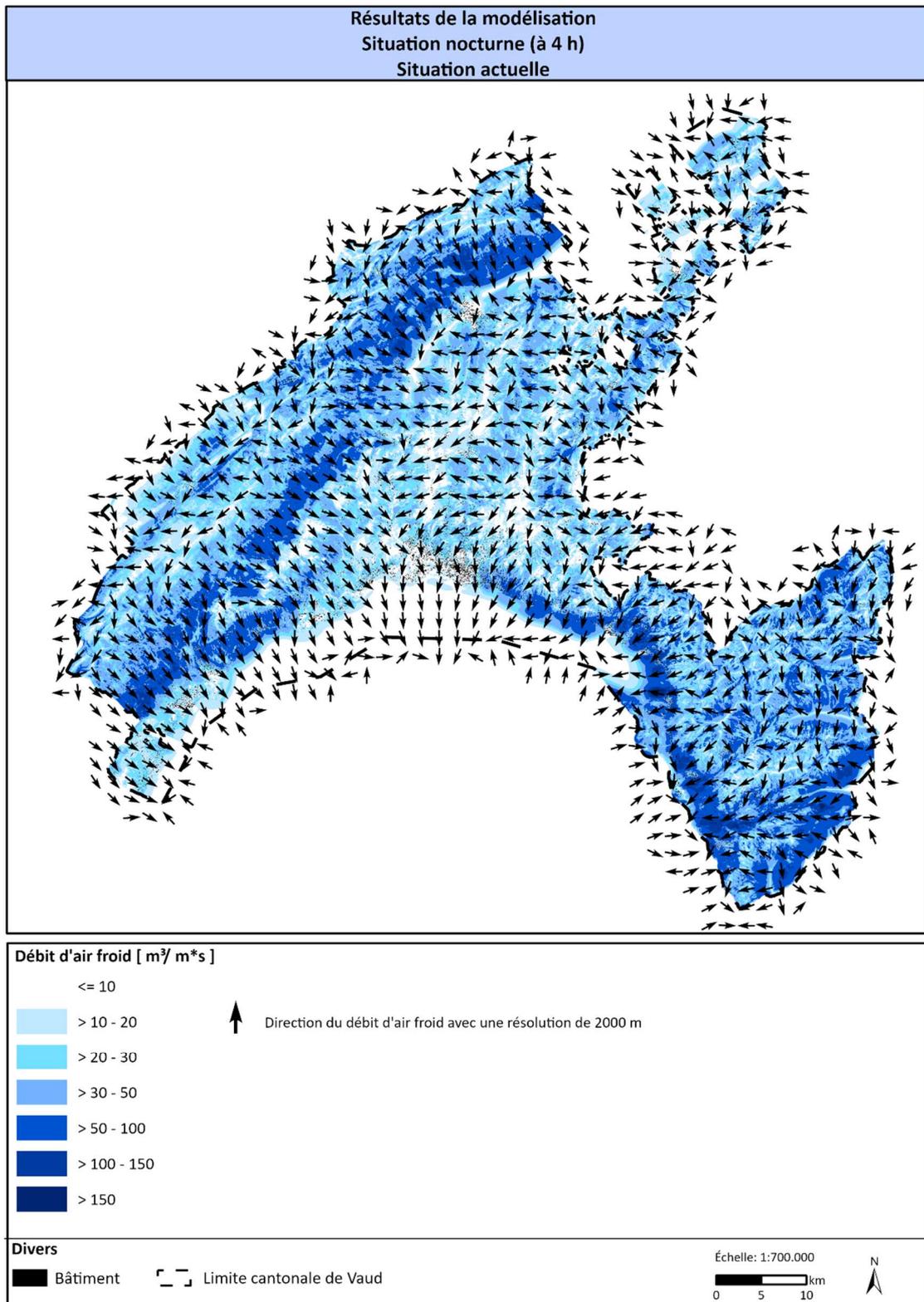


Figure 18 : Débit d'air froid situation actuelle

Dans la situation future (2060), la dynamique de l'air froid ne changera que modérément avec les changements climatiques (Figure 19) – aucun changement généralisé du débit d'air froid n'est à observer pour ce paramètre (comme c'est le cas pour la température nocturne). Les processus d'air froid persisteront

aussi à l'avenir, l'air froid se réchauffera toutefois avec les changements climatiques. Des changements du champ d'écoulement d'air froid sont à prévoir principalement dans les environs des zones de développement urbain, incluant zones d'habitation, industrielles et commerciales, car les nouveaux bâtiments construits ou les arbres plantés agissent comme des obstacles aux flux, freinant ou déviant ainsi les vents (Figure 20).

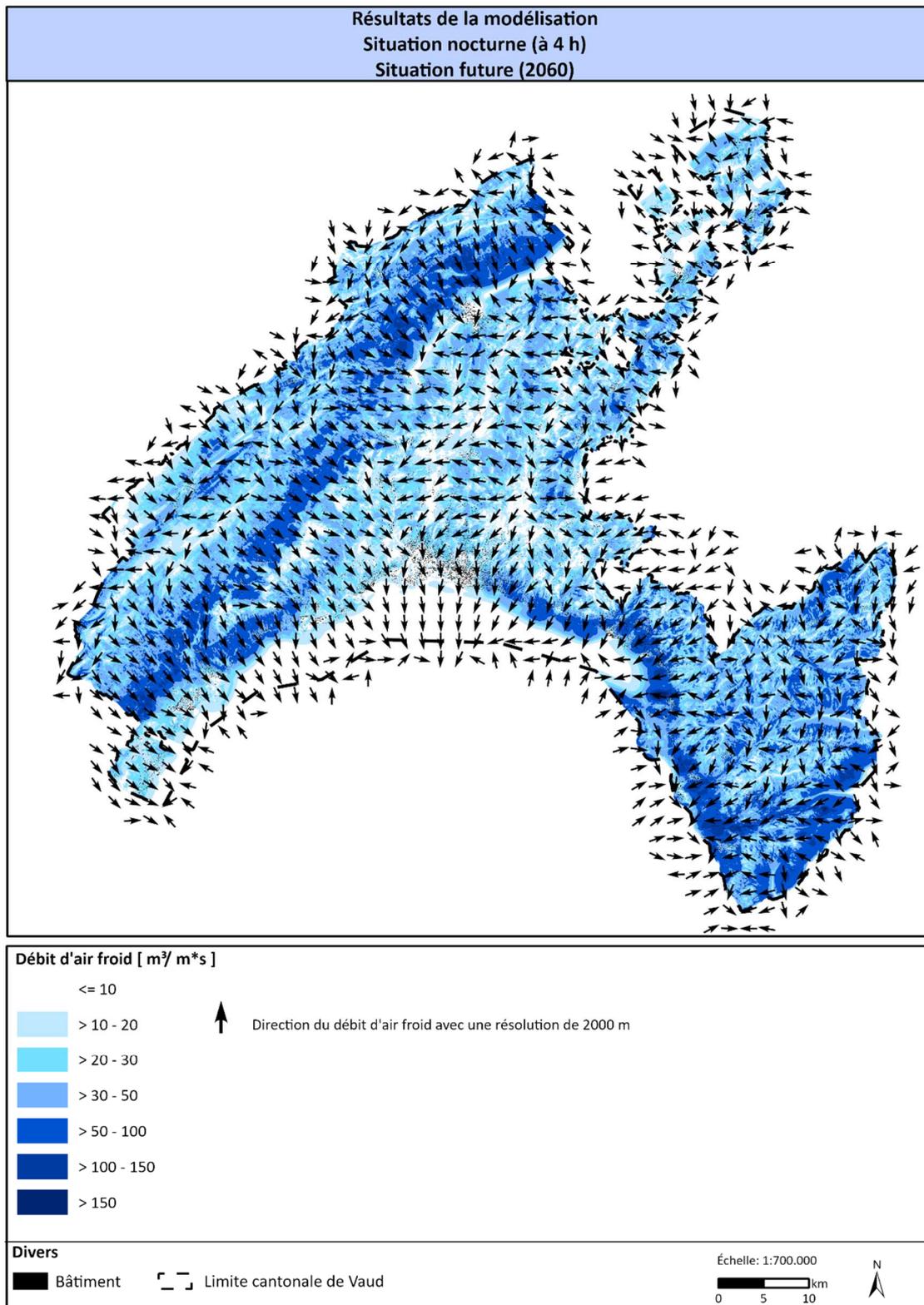
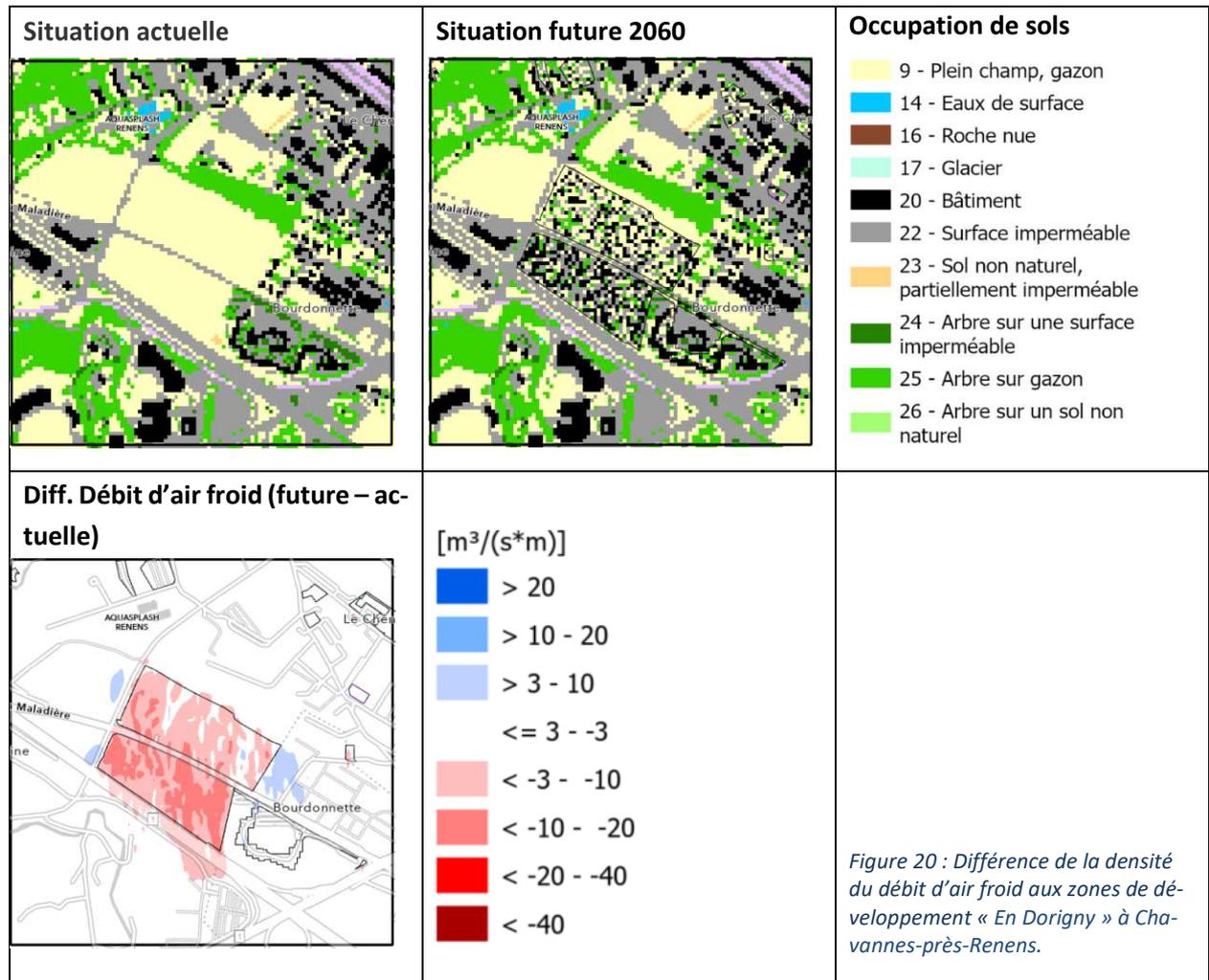


Figure 19 : Débit d'air froid situation future (2060)

La forme spatiale du champ d'écoulement d'air froid près du sol (vecteurs de vent) suit le modèle du débit d'air froid. Les vitesses de vent les plus élevées sont aussi à noter avant tout sur les pentes, car le relief marqué accélère les vents. À 2 m au-dessus du sol, l'effet d'obstacle des bâtiments ou des murs anti-bruit est plus accentué, si bien que certaines zones des centres-villes ne reçoivent aucune aération efficace près du sol, le débit d'air froid et le flux de vent se dissipent ici presque totalement (ex. centre de Lausanne, Vevey, Clarens ou Yverdon-les-Bains).



4.3 CHARGE THERMIQUE PENDANT LA JOURNÉE

Les paramètres météorologiques n'agissent pas indépendamment les uns des autres, mais dans le cadre de complexes biométéorologiques ayant des effets sur le bien-être humain. Pour l'évaluation de la charge thermique pendant la journée, on utilise des indices (grandeurs caractéristiques) qui combinent des informations sur la température et l'humidité de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement à ondes courtes et longues (Figure 21). Les modèles de bilan thermique calculent les échanges de chaleur d'une « personne normale » avec son environnement et peuvent ainsi évaluer la charge thermique éprouvée par une personne.

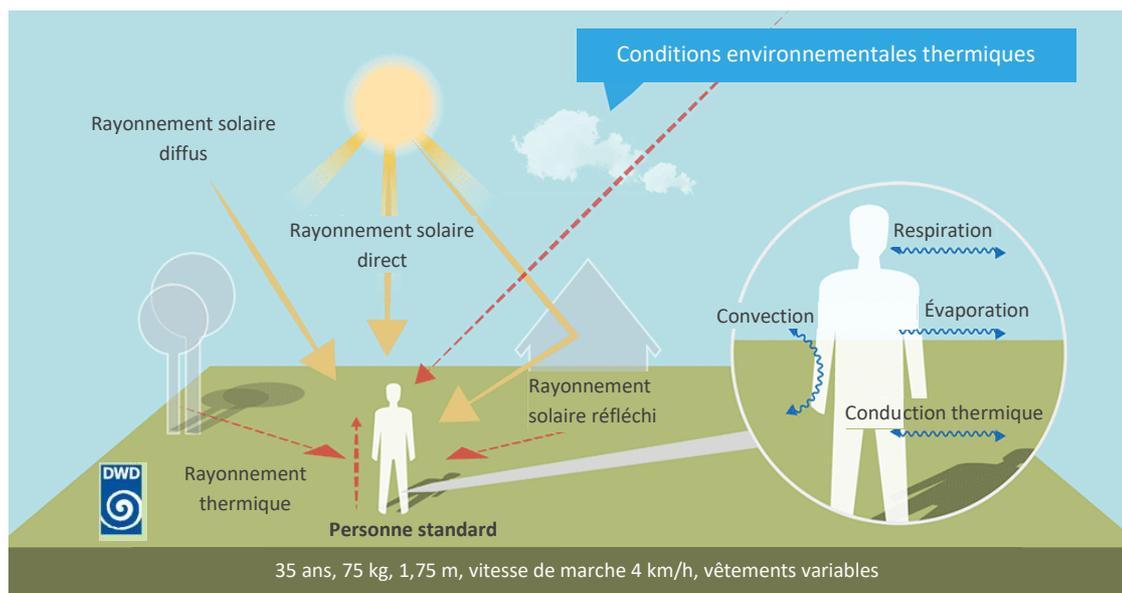


Figure 21 : Représentation schématique des différentes influences sur la sensation humaine de chaleur (DWD 2024b, modifié par GEO-NET)

Tableau 5 : Attribution de valeurs seuils de l'indice d'évaluation PET (physiologically equivalent temperature) 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 14 h 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 des conditions à l'extérieur et en journée. Pour la PET, il existe une échelle d'évaluation absolue qui quantifie la sensation thermique (directive VDI 3787, feuille 9) et les niveaux de charge physiologique (ex. stress forte de chaleur à partir de PET 35°C ; Tableau 5). 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).

Comparée à la température de l'air, la fourchette des valeurs de la PET est plus grande. Dans le canton de Vaud, cet effet est renforcé davantage avec les nombreux niveaux d'altitude (Figure 22). La fourchette de la PET s'étend de valeurs inférieures à 0°C (sur les glaciers) à plus de 45°C (ex. centre-ville de Vevey ou Grand-Rue à Villeneuve).

Les valeurs les plus basses (PET inférieure à 20°C) se situent dans les régions montagneuses les plus élevées et sur les glaciers. Les terrains boisés situés sur les versants de montagne ne présentent « pas de stress thermique ». Avec 15°C, les forêts se trouvant à une altitude plus élevée sont aussi en partie nettement en-dessous de ce critère. Avec des valeurs avoisinant les 23°C, les terrains boisés proches des zones urbaines présentent un « stress de chaleur faible » (ex. forêt de Sauvabelin à Lausanne, forêts situées au-dessus des zones bâties du Léman). Des valeurs de PET en grande partie inférieures à 26°C prévalent parmi les plus grands groupes d'arbres dans les parcs (ex. Vallée de la Jeunesse à Lausanne, parc de Vertou à Morges) ou dans les cimetières (ex. cimetière militaire britannique de Vevey, cimetière de Clarens). Les forêts et les peuplements forestiers peuvent servir de lieux de refuge pour la population, leur canopée offrant une protection contre l'ensoleillement direct. De plus, les forêts et les groupes d'arbres proches de la ville ont la capacité de générer de l'air frais également pendant la journée au profit de la zone urbaine adjacente (non représenté ici). Toutes ces zones proches de la zone urbaine, qui combinent l'effet d'ombrage des arbres et les processus d'évaporation sur les cours d'eau, s'avèrent particulièrement précieuses, comme la Baye de Clarens, La Veveysse ou La Lutrive.

Dans les conditions considérées (jour d'été autochtone : aucune couverture nuageuse, rayonnement sans obstacle), toutes les zones urbaines présentent au moins un « stress de chaleur faible ». Les zones bâties, situées directement au bord du Léman, profitent d'un effet de refroidissement de l'eau pendant la journée. Les valeurs les plus élevées des espaces bâtis (PET dépassant les 41°C : stress de chaleur extrême) sont observées au-dessus des zones industrielles et commerciales imperméables (ex. centres commerciaux de Sous-le-Grand-Pré à Aigle) et dans les rues imperméables et non ombragées. Des parties de centres-villes sont aussi associées à un stress de chaleur extrême (ex. quartiers Plan-Dessus et Général-Guisan à Vevey), la forte urbanisation et l'imperméabilisation du sol accompagnée de peu d'ombrage générant ainsi une PET dépassant souvent aussi les 41°C. Les parties sud des bâtiments et des rues (avec un tracé est-ouest) présentent les valeurs de PET les plus élevées, dépassant les 41°C, en cas d'absence d'arbres procurant de l'ombre (ex. Avenue Général-Guisan à Vevey). L'effet d'ombrage en tant que principal paramètre gouvernant la PET devient aussi clair dans les espaces agricoles de la périphérie. Du fait de l'ensoleillement sans obstacle, la charge thermique régnant sur les espaces ouverts perméables atteint des valeurs aussi élevées que dans le centre-ville non ombragé (ex. Parc Charlie Chaplin à Vevey).

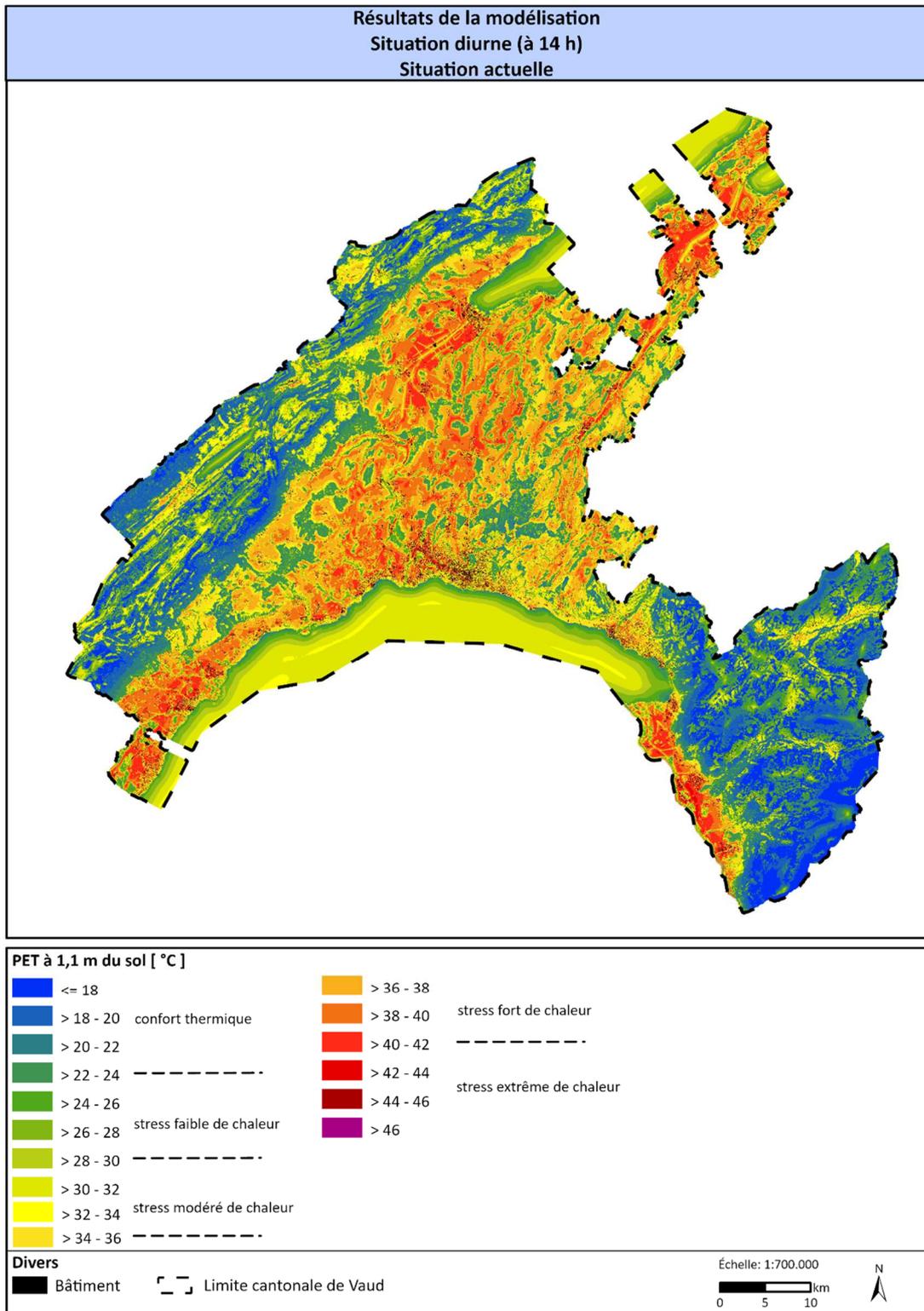


Figure 22 : PET situation actuelle

Un effet de refroidissement considérable et similaire à celui de la situation nocturne est atteint dans les cours intérieures urbaines comportant des espaces verts (ex. rue des Moulins à Vevey). Le fait que les arbres procurant de l'ombre puissent améliorer considérablement la situation climatique diurne devient également visible dans les rues. Avec des valeurs de PET inférieures à 35°C, les rues peuplées d'arbres (ex. Avenue de Gilamont à Vevey ou partiellement l'Avenue du Mont-d'Or à Lausanne) paraissent ainsi nettement plus fraîches que les zones urbaines très imperméables et qui ne sont que faiblement ombragées.

L'effet de refroidissement généré lors du processus d'évaporation fait baisser la PET à proximité directe des canaux et des ruisseaux. Il n'a pas été possible de considérer tous les ruisseaux dans les données d'entrée sur la base du raster de 10 m de large, ce dont il faut tenir compte concernant les cartes de PET et l'évaluation ultérieure dans le cadre de la carte indicative de planification (à partir du chapitre 6).

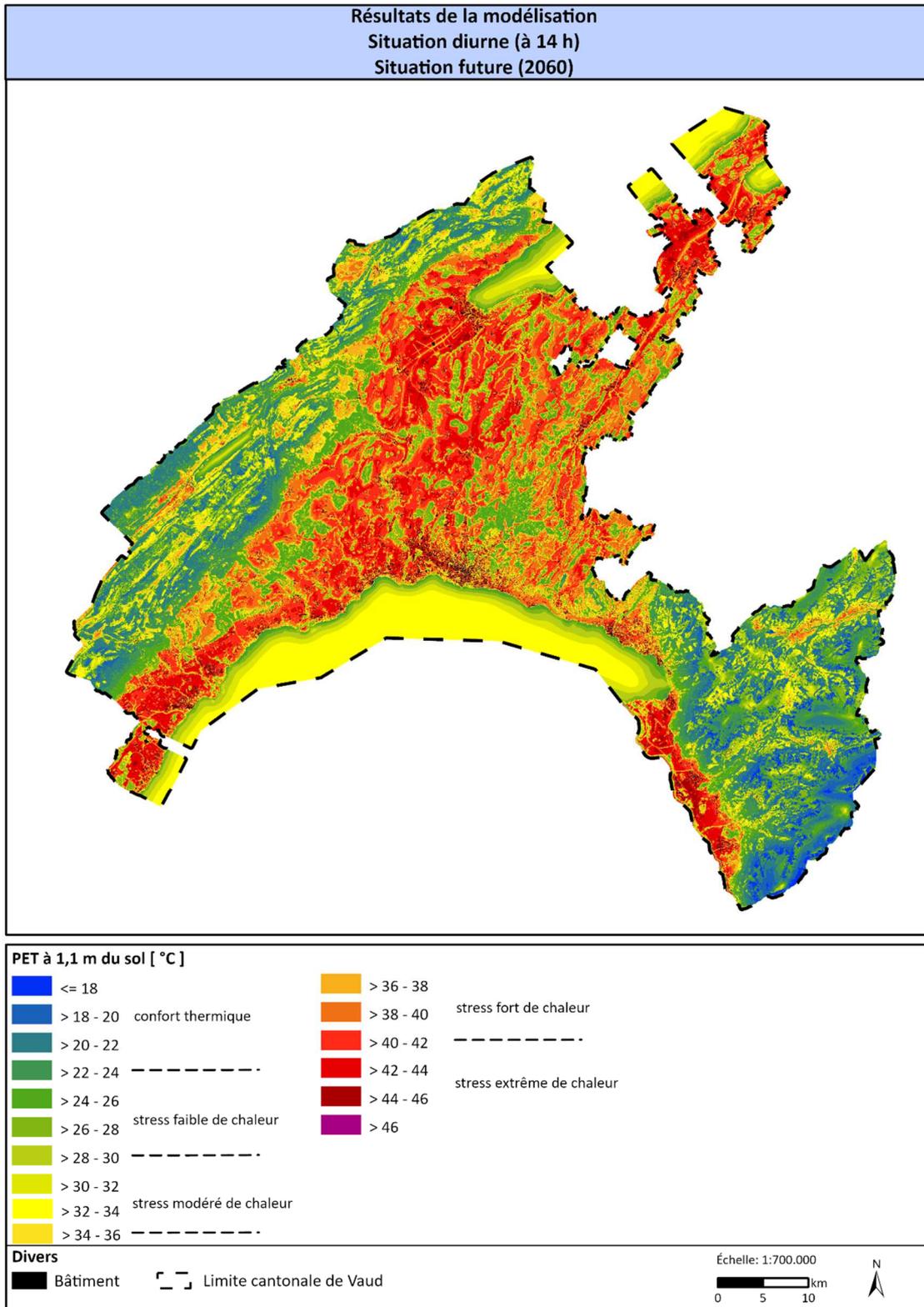
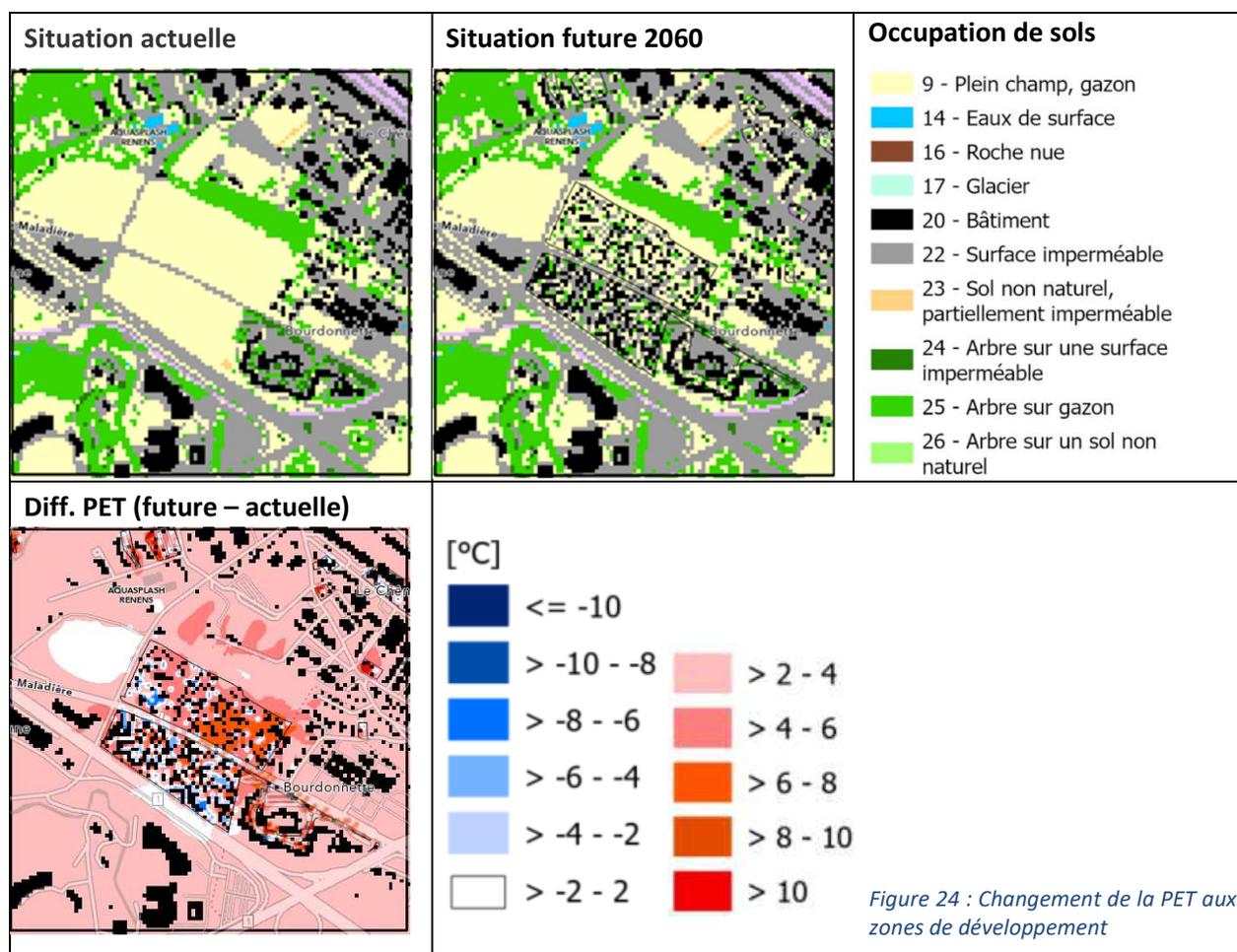


Figure 23 : PET scénario future (2060)

Comme c'est déjà le cas pour la température de l'air (cf. chapitre 4.1), l'augmentation de la PET pendant la journée ne sera pas répartie uniformément sur le territoire du canton dans le scénario de la situation future (Figure 23). L'augmentation projetée de la PET coïncide en grande partie avec le signal de changements climatiques de +2,7°C appliqué. Dans les centres-villes, ainsi que sur des zones très imperméables, la PET peut dépasser les 46°C (stress de chaleur extrême), comme à Vevey, Lausanne, Yverdon-les-Bains, mais également dans de plus petites localités comme Noville. Les espaces verts et ouverts se réchauffent aussi dans le cadre des changements climatiques et la qualité des conditions extérieures diminue. Les forêts présentent au maximum un « stress de chaleur faible ». Les zones agricoles présentent un niveau de PET pratiquement aussi élevé que les zones imperméables dont les valeurs de PET atteignent 45 °C « stress de chaleur extrême » (ex. au nord-ouest d'Echandens ou au nord et à l'est de Vuffens-la-Ville). Les parcs urbains se réchauffent également, mais différemment en raison du mélange d'espaces ouverts et de groupes d'arbres (ex. parc de Milan à Lausanne). Augmentant d'environ 3°C, les groupes d'arbres deviennent plus chauds. Les valeurs sont nettement supérieures dans les zones de prairies ouvertes.



Le plus grand changement de la PET est observé dans les zones de développement urbain, incluant zones d'habitation, industrielles et commerciales (ex. à St-Légier-La Chiésaz, Figure 24). Cet exemple illustre combien la plantation de nouveaux arbres dans les zones d'habitation prévues diminue nettement la PET de jusqu'à -7 °C, réduisant ainsi la charge thermique. L'imperméabilisation et la construction de nouveaux bâtiments entraînent une augmentation de la PET sur les zones, car davantage de chaleur y est stockée et émise dans les environs. À proximité directe de zones urbaines comme illustré à l'ouest des sections d'images de la Figure 24, la densification ultérieure avec des bâtiments et des zones imperméables génère

une augmentation de la PET atteignant 10°C. L'approche des zones d'occupation de sol aléatoirement définie surestime ici les augmentations de la PET, car il n'est pas question de bâtiments contigus, mais de nombreux petits bâtiments individuels. Une planification plus détaillée permet d'obtenir des améliorations supplémentaires, par exemple en plantant plus d'arbres. La construction avec occupation de sol aléatoirement définie procure un premier aperçu des effets de nouvelles constructions (cf. chapitre 3.4).

5. Carte de l'analyse climatique

La carte de l'analyse climatique (CAC) résume les énoncés essentiels des paramètres climatiques pour la situation nocturne (cf. chapitre 4.1, 4.2) dans une représentation cartographique. La carte illustre les fonctions et les processus d'échange d'air nocturne dans toute la zone d'étude (champ d'écoulement et processus d'air froid, en particulier dans les espaces verts et ouverts). Pour les espaces bâtis, la CAC met en évidence la surchauffe nocturne (effet d'îlot de chaleur), basée sur la température de l'air près du sol lors d'une nuit d'été autochtone à 4 h du matin.

La carte de l'analyse climatique (CAC) existe dans deux représentations de l'espace urbain pour la situation actuelle et la situation future :

- Avec des températures absolues de la température de l'air nocturne dans l'espace urbain
- Avec un effet d'îlot de chaleur escompté dans l'espace urbain, qui repose sur les différences entre les entités urbaines surchauffées et les températures moyennes au-dessus des espaces verts et ouverts de même altitude.

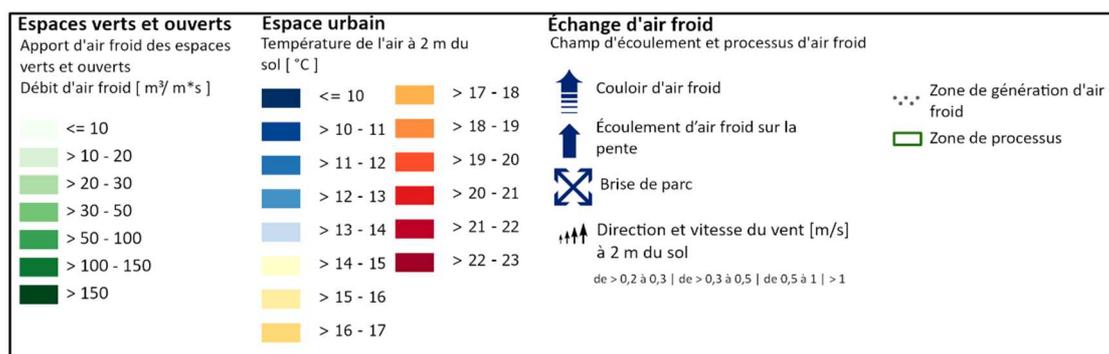


Figure 25 : Légende de la CAC avec la température absolue illustrée dans l'espace urbain.



Figure 26 : Légende de la CAC avec l'effet d'îlot de chaleur illustré dans l'espace urbain.

Une légende unique a été développée pour garantir la comparabilité des deux cartes de l'analyse climatique (Figure 27, Figure 28). Celle-ci s'articule autour des éléments suivants : espace urbain, espaces verts et ouverts et échange d'air froid. Le débit d'air froid est représenté dans les espaces verts et ouverts avec la règle suivante : plus les valeurs sont élevées, plus le volume d'air froid est dynamique (ou de qualité aussi). De 10 m x 10 m, la résolution spatiale de la représentation des résultats correspond directement à celle des données d'entrée du modèle. Un lissage graphique est effectué lors de la visualisation via la fonction « interpolation bilinéaire » utilisant la valeur des quatre centres de cellule les plus proches pour

déterminer la valeur sur le raster de résultat. La nouvelle valeur de la cellule de sortie est une moyenne pondérée de ces quatre valeurs. Dans l'espace urbain, la température absolue (Figure 25, Figure 27) ou la différence de température (effet d'îlot de chaleur, Figure 26, Figure 28) est représentée par interpolation pour le niveau de 2 m de 4 h : plus les valeurs sont élevées, plus la surchauffe nocturne est marquée.

L'**effet d'îlot de chaleur** représente la surchauffe nocturne des zones urbaines et des infrastructures de transport par rapport aux espaces verts et ouverts¹³. L'effet d'îlot de chaleur a l'avantage de rompre avec les températures absolues qui ne sont représentatives que pour les conditions météorologiques considérées. En cas de survenance de journées plus chaudes, les différences relatives du régime des températures s'appliquent encore, permettant ainsi de reconnaître aussi pour cette situation ce qu'on appelle des « hotspots » ou points de concentration de chaleur de l'effet d'îlot de chaleur. Pour tenir compte de l'altitude individuelle des espaces verts et ouverts et de la diminution de la température de l'air avec l'altitude pour le canton de Vaud, on prend comme référence une moyenne formée en fonction de chaque altitude, puis utilisée pour les zones urbaines situées à l'altitude correspondante (**effet d'îlot de chaleur dépendant de l'altitude** ; Tableau 6). Cette démarche a été appliquée pour la situation actuelle et la situation future.

Tableau 6 : Valeurs de référence des espaces verts et ouverts pour calculer l'effet d'îlot de chaleur dépendant de l'altitude

Niveau d'altitude (m/m)	Température moyenne (°C) des espaces verts et ouverts	Température moyenne (°C) des espaces verts et ouverts
	Situation actuelle	Situation future
<= 500	15,6	18,3
> 500 à 750	15,0	17,6
> 750 à 1000	14,2	16,9
> 1000 à 1500	11,8	14,5
> 1500 à 2000	8,3	10,9
> 2000 à 3000	3,5	6,1
> 3000	0,5	3,1

La représentation du débit d'air froid pour l'espace de compensation et de la température de l'air pour l'espace d'action en rasters est complétée dans la CAC par le marquage de processus du transport d'air froid (Tableau 7). Le champ d'écoulement et la direction de l'écoulement d'air froid ont été agrégés à une résolution de 500 m pour une meilleure lisibilité de la carte A0 (les zooms sur cartes du rapport incluent des vecteurs de vent agrégés à 100 m) et visualisés par des flèches à partir d'une vitesse de vent de 0,2 m/s considérée comme efficace sur le plan climato-écologique. Les systèmes de vents sur de petites étendues et/ou plus faibles (ex. les effets de canalisation le long des artères urbaines située entre l'espace de compensation et l'espace d'action) n'apparaissent pas sur la carte. Mais il est possible de trouver de telles informations détaillées sur les cartes individuelles relatives aux champs de vents près du sol et basées sur des grilles en combinaison avec les données de résultat dans leur résolution d'origine.

¹³ Calcul : Effet d'îlot de chaleur = température de l'air (zone bâtie) - température moyenne des espaces verts et ouverts

Les espaces caractérisés comme des **zones de génération d'air froid** sont des espaces verts et ouverts contigus ayant un taux de production d'air froid supérieur à la moyenne, dépassant $33,8 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$, pour la situation actuelle et dépassant $33,9 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ pour la situation future.

Certains processus d'air froid qui sont d'une importance particulière dans le canton de Vaud sont mis en évidence dans les cartes en plus du champ d'écoulement modélisé. Il s'agit d'une part des **couloirs d'air froid linéaires**. Les couloirs d'air froid relient des espaces de compensation produisant de l'air froid et des espaces d'action et, avec leurs débits d'air froid généralement élevés, ils constituent une composante élémentaire du processus d'air froid. En raison de leur largeur limitée spatialement (au moins 50 m), ils sont en même temps très sensibles aussi aux développements urbains qui peuvent conduire à un rétrécissement de la section transversale et à une augmentation de la rugosité et donc à une limitation ou à une perte de fonction.

Tableau 7 : Éléments de la légende et leurs méthodes de déduction concernant le processus d'air froid dans les cartes de l'analyse climatique

Élément de la légende	Méthode de déduction
Vitesse et direction du vent	Champ de vent agrégé à 500 m avec une vitesse de vent > 0,2 m/s
Zones de génération d'air froid	Surfaces ayant un taux de production d'air froid supérieur à la moyenne, dépassant $33,8 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ pour la situation actuelle et dépassant $33,9 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ pour la situation future.
Couloir d'air froid (linéaire)	basé sur des avis d'experts sur la base de la densité du débit d'air froid, du champ de vent et des classes d'occupation des sols
Écoulement d'air froid (horizontal)	basé sur des avis d'experts sur la base de la densité du débit d'air froid, du champ de vent et des classes d'occupation des sols
Brises de parc	basé sur des avis d'experts sur la base de la densité du débit d'air froid, du champ de vent et des classes d'occupation des sols

Les **zones d'écoulement d'air froid** sont alors marquées par une vulnérabilité comparable uniquement lorsqu'elles reposent exclusivement sur des brises thermiques peu dynamiques. En raison des possibilités d'évitement de l'air généralement offertes, les écoulements d'air froid suivant la pente réagissent avec une plus grande robustesse à un niveau modéré de développement en termes de construction. Une limitation des fonctions climato-écologiques est pourtant tout à fait possible ici aussi et doit être évitée dans le cas de développements urbains particulièrement intensifs ou dans des conditions d'occupation des sols particulières (ex. urbanisation sur un espace ouvert habituellement entouré de forêt sur une pente). En réalité, les délimitations entreprises ici entre l'écoulement horizontal et le couloir linéaire ne sont pas toujours claires et/ou se chevauchent, si bien qu'un effet de généralisation, qu'il faut encore vérifier plus intensivement le cas échéant dans un cas spécifique, est toujours inhérent aux évaluations d'experts.

Dans le canton de Vaud, il existe deux espaces verts urbains, qui transportent leur air frais vers les constructions environnantes pendant la nuit (dans la ville de Lausanne et entre Préverenges et Denges). Ces vents appelés **brises de parc**, c.-à-d. des flux de compensation générés par la chaleur et provenant d'un espace vert aménagé, apparaissent sur des espaces verts de plus grande taille, qui sont intégrés dans des

environs nettement plus chauds. Les brises de parc étant plutôt faibles comparées aux écoulements d'air froid, la portée de ces flux de compensations dépend grandement aussi des obstacles au flux présents dans les environs. Des rues larges et des structures peu rugueuses (ex. les voies ferrées et les espaces ouverts), ainsi qu'une orientation des corps de bâtiments parallèle au flux favorisent une large pénétration de l'air du parc, plus frais, dans la zone urbaine. L'identification des couloirs, des zones d'écoulement et des brises de parc a été effectuée par des experts (c'est à dire « manuellement ») en tenant compte de la densité du débit d'air froid, du champ de vent ainsi que des classes d'occupation des sols.

Pour les identifications dans la carte de l'analyse climatique, la présence ou non d'une charge bioclimatique particulière dans les espaces d'action importe peu, car les fonctions du transport d'air froid sont particulièrement pertinentes dans les trois cas présentés (les couloirs d'air froid, les écoulements d'air froid et les brises de parc). Ainsi, des charges bioclimatiques relativement plus faibles peuvent apparaître justement du fait de leur présence dans la zone d'action de l'air froid ou des charges bioclimatiques plus élevées peuvent être tout particulièrement tributaires de la fonction de décharge bioclimatique des couloirs et des zones d'échange (écoulements et brises de parc). Le processus d'air froid a été principalement accentué dans les zones urbaines. Pour ce faire, aucune distinction n'a été faite entre les zones d'habitation et les zones industrielles et commerciales, mais les processus d'air froid marquants ont été inclus en identifiant des couloirs, des écoulements ou des brises de parc. Différentes structures d'occupation de l'espace d'action et de compensation ont été prises en compte ultérieurement dans le cadre de la mise en valeur conceptuelle pour les cartes indicatives de planification.

Les deux formes de présentation de la CAC pour la situation actuelle et la situation future sont présentées ci-après à l'aide d'un zoom sur la ville de Lausanne.

5.1 SITUATION ACTUELLE

La Figure 27 montre les valeurs absolues de la température de l'air nocturne, la Figure 28 illustre l'effet d'îlot de chaleur dans l'espace urbain pour la ville de Lausanne. Les espaces verts sont caractérisés par l'importance du transport d'air froid.

Les températures et ainsi l'ampleur de l'effet d'îlot de chaleur dans le canton de Vaud se situent à un niveau escompté pour des zones bâties de taille correspondante dans l'environnement topographique respectif. La surchauffe la plus faible des zones urbaines et des infrastructures de transport par rapport aux espaces verts du canton de Vaud est observée explicitement à la périphérie directe des zones bâties. Le plus grand îlot de chaleur contigu (Figure 27, Figure 28) du zoom est constitué par le centre-ville de Lausanne avec une température dépassant 19°C ou en tant qu'effet d'îlot de chaleur dépassant généralement 4°C.

Certes, les espaces verts et ouverts présentent une production d'air froid supérieure à la moyenne, mais le transport d'air froid sur les espaces verts et ouverts est plutôt modérément marqué en zone urbaine avec des valeurs pouvant atteindre 30 m³/(s·m). En raison de la pente, l'air froid traverse Lausanne dans le sens nord/nord-est vers le sud/sud-ouest. La section de la carte de Lausanne n'indique pas de couloirs d'air froid linéaires ou d'écoulement d'air froid horizontal. Mais des flux d'air froid horizontaux, apparaissent au nord de Lausanne et de Pully.

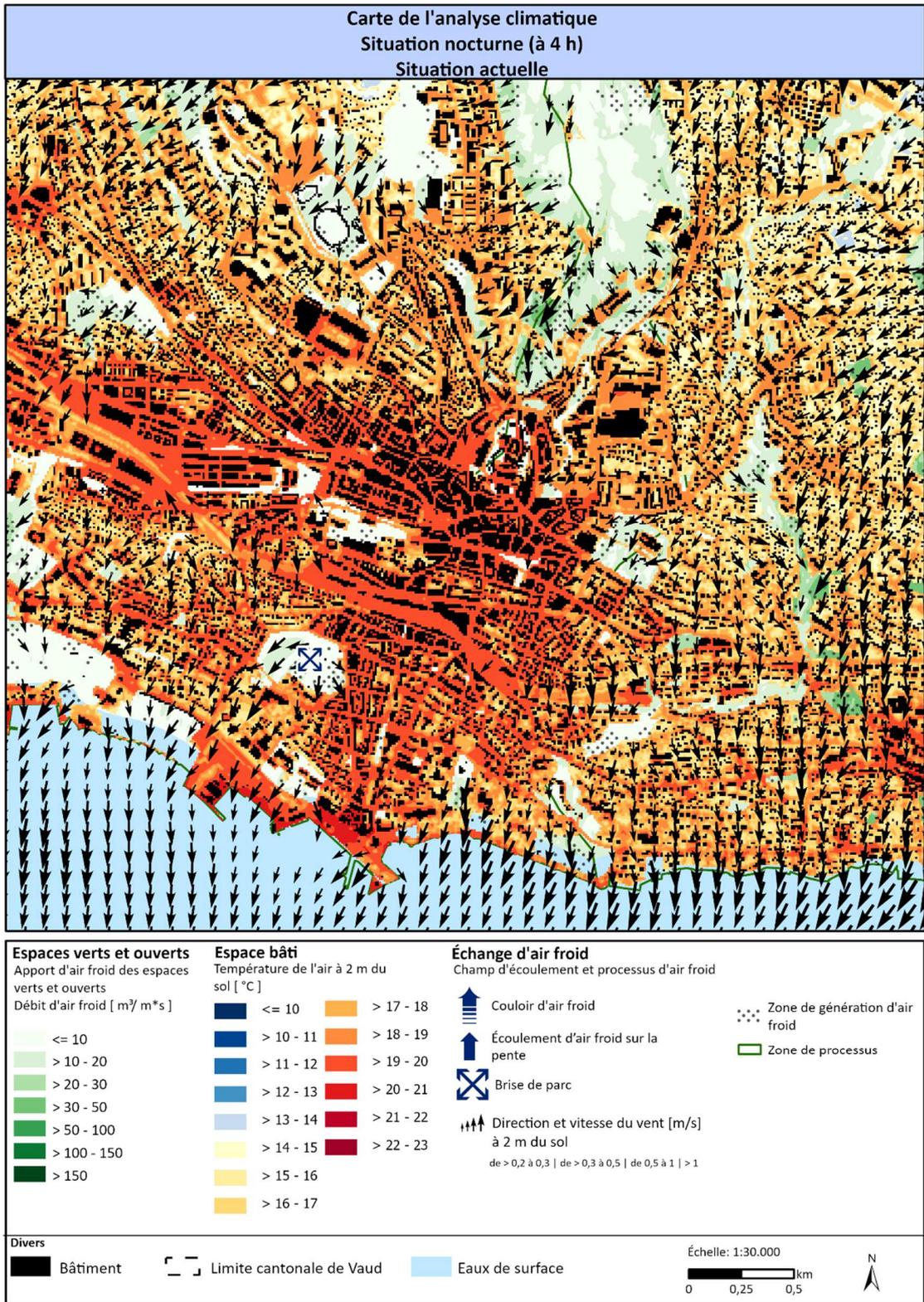


Figure 27 : CAC avec la température absolue dans l'espace urbain, situation actuelle

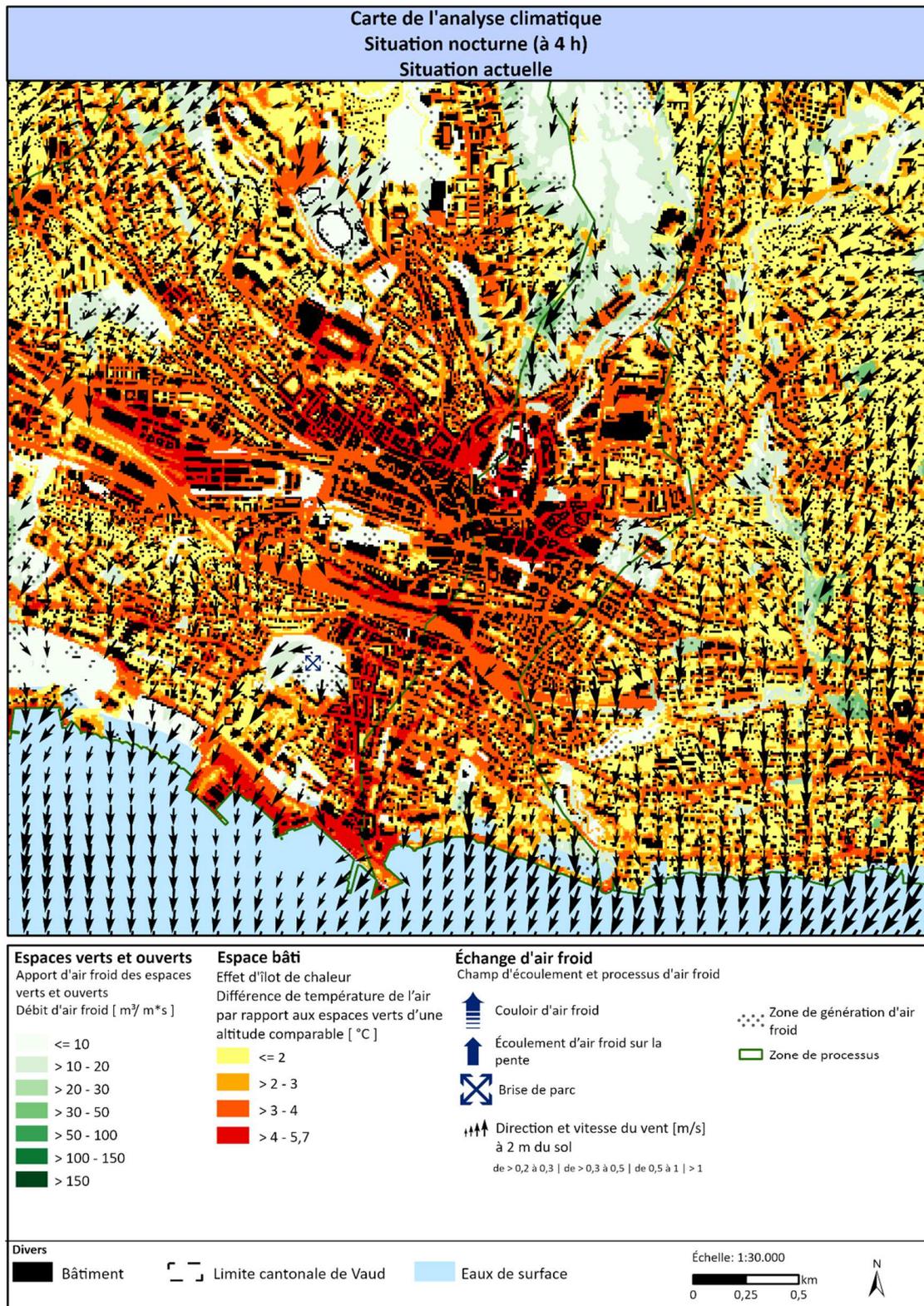


Figure 28 : CAC avec l'effet d'îlot de chaleur dans l'espace urbain, situation actuelle

Dans le parc de l'Hermitage ainsi que dans le parc de Milan, l'air froid est transporté des parcs vers les entités urbaines environnantes et refroidit ces dernières. Dans la partie est de Lausanne (Chailly-sur-Lausanne, Pully), la faible densité et les nombreux espaces verts induisent des températures de 14 à 16 °C

(différentiel jusqu'à 2 °C), nettement plus faibles que dans le centre de Lausanne qui est moins bien traversé par l'air froid.

5.2 SITUATION FUTURE

En tenant compte des hypothèses de changements climatiques, d'augmentation de la température (+2,7 °C en 2060) et d'urbanisation prévue, il a été nécessaire de créer une carte supplémentaire de l'analyse climatique pour la situation future (Figure 29, Figure 30). Les statistiques et les valeurs limites utilisées ici (ex. pour identifier les zones de génération d'air froid) sont reprises du nouvel ensemble de données du modèle, la méthode de calcul de ces seuils ne se distinguant pas des données de la situation actuelle, mais différant toutefois dans les valeurs moyennes calculées (cf. ex. [Tableau 6](#)).

La Figure 29 permet de reconnaître que, dû aux changements climatiques, de larges parties de la zone urbaine de Lausanne présentent une température nocturne supérieure à 22°C. Ceci concerne le centre, les rues ainsi que les zones industrielles et commerciales. Les zones urbaines de faible densité et aux nombreux espaces verts à l'est de Lausanne (Chailly-sur-Lausanne, Pully) enregistrent aussi une augmentation de la température. La température de l'air près du sol augmente jusqu'à 18°C, voire 21°C. Il devient évident concernant la surchauffe nocturne de l'espace urbain que celle-ci est restée pratiquement constante par rapport à la situation actuelle (maximum autour de 5,4°C respectivement, Figure 30). Ceci est justifié par l'augmentation de la température dû aux changements climatiques, qui réchauffe non seulement les espaces d'action de 2,7°C, mais également les espaces de compensation. La différence reste essentiellement la même. Comparé à la situation actuelle, le nombre des espaces d'action augmente, car un changement de l'occupation des sols est opéré dans les zones de développement, où un espace vert et ouvert devient une zone urbaine ou une zone industrielle et commerciale. Les espaces bâtis qui voient le jour à cette occasion se situent dans la fourchette des valeurs de zones urbaines comparables. Les zones de développement urbain présentent une plage de surchauffe de 0°C à 3,9°C. Il est visible ici aussi que le développement de zones urbaines peut conduire à des améliorations par rapport à la situation actuelle, lorsque des zones entièrement imperméables (ex. aires de stationnement) sont aménagées en un habitat dispersé contribuant à rafraîchir le territoire sur place (ex. aménagement de l'aire de stationnement du Chemin-du-Treyblanc à Lausanne).

Comme dans la situation actuelle, le débit d'air froid du scénario 2060 a été mise en place sur tous les espaces verts et ouverts de la carte de l'analyse climatique et intégrée conjointement au champ d'écoulement et aux zones de génération d'air froid du calcul du modèle de la situation future pour déterminer avec expertise les zones de processus climatique (couloirs, écoulements d'air froid, et brises de parc). Les processus d'air froid changent principalement là où l'on observe des structures urbaines modifiées après exécution du développement urbain. L'air froid est ici freiné et dévié (cf. explications au chapitre 4.2). Les structures des couloirs sont conservées aussi après les développements urbains dans l'ensemble du canton de Vaud et ne sont pas altérées par les zones de développement urbain. Les deux systèmes de brise de parc identifiés dans la situation actuelle persistent aussi.

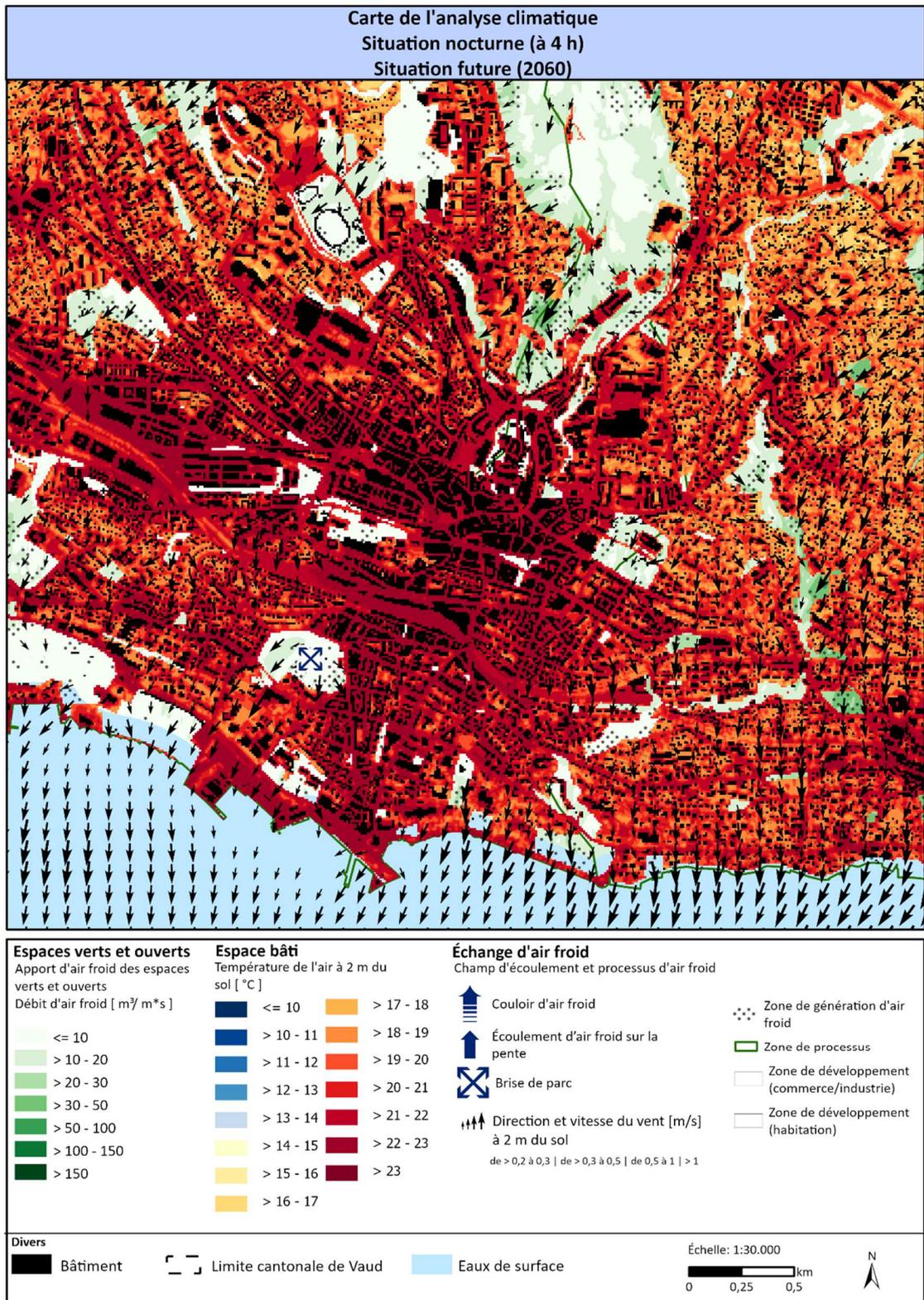


Figure 29 : CAC avec la température dans l'espace urbain, situation future.

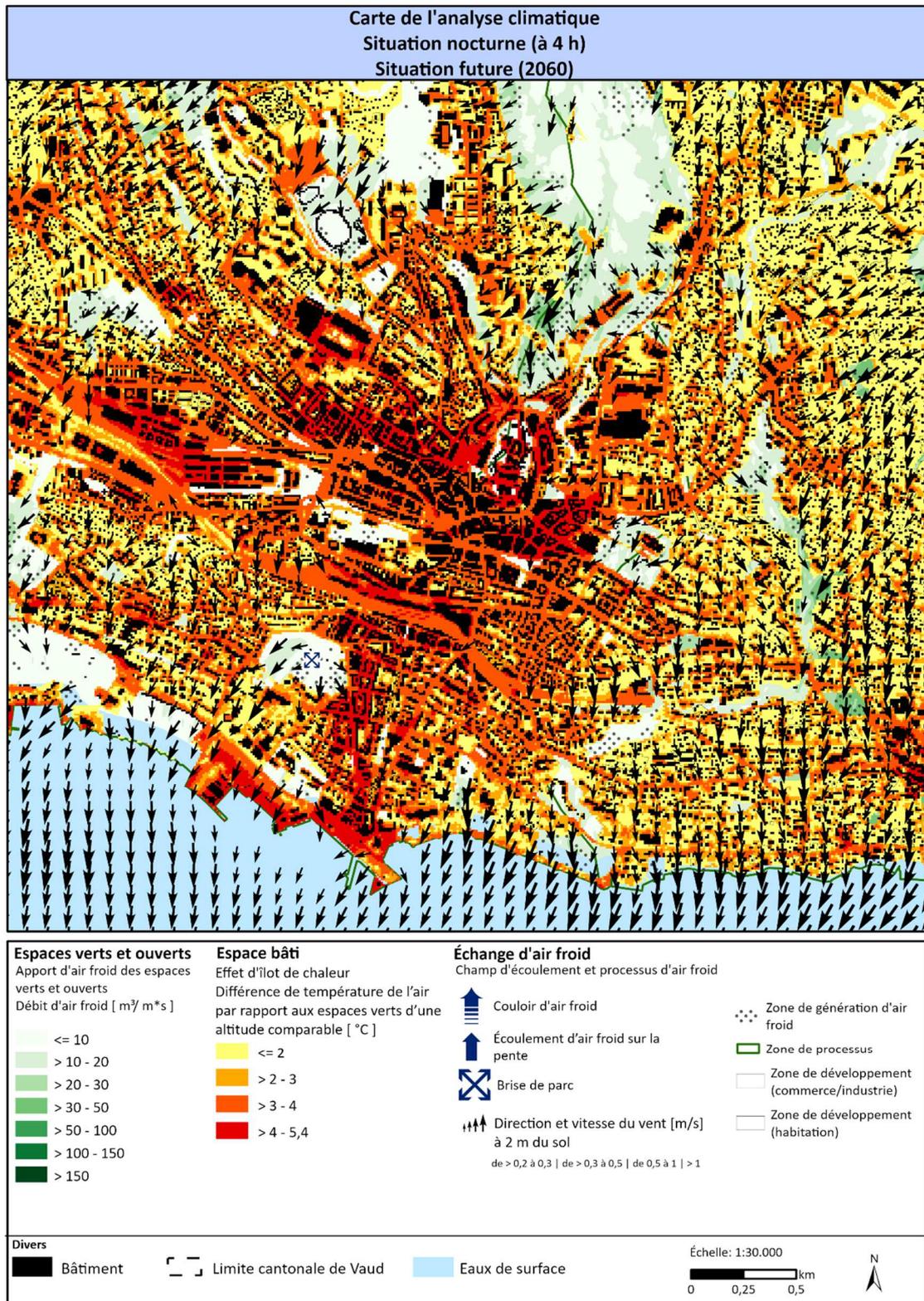


Figure 30 : CAC avec l'effet d'îlot de chaleur dans l'espace urbain, situation future.

6. Carte indicative de planification

La carte indicative de planification (CIP) est produite pour les deux situations (actuelle et future) et avec des déclinaisons diurnes et nocturnes. La CIP est destinée à servir de données de base pour la planification en situant dans l'espace les aires thermiquement chargées et les espaces verts dignes de protection, et en fournissant des indications générales de planification. L'évaluation de la charge bioclimatique dans les zones bâties (espace d'action) ainsi que l'importance des espaces verts et ouverts (espace de compensation) ont été réalisées conformément aux directives VDI 3785, fiche 1 et 3787, fiche 1 (VDI 2008a, VDI 2014). Sur la base de leurs évaluations, des indications générales de planification ont été attribuées aux zones. Les évaluations sont basées sur les fonctions climato-écologiques sans tenir compte des préoccupations des autres planifications sectorielles, c.-à-d. que les cartes indicatives de planification sont considérées comme une analyse des options d'aménagement du territoire avec un unique focus climatique.

6.1 NORMALISATION DES PARAMÈTRES (TRANSFORMATION EN Z)

Les résultats du modèle et la carte de l'analyse climatique représentent les événements du processus sous forme de valeurs absolues – toutefois, celles-ci ne s'appliquent qu'à l'état d'une situation météorologique estivale autochtone. L'évaluation dans les cartes indicatives de planification, d'autre part, est basée sur les différences relatives des paramètres climatiques entre les zones, afin de pouvoir décrire les charges bioclimatiques et en déduire des informations importantes pour la planification, indépendamment d'une situation météorologique spécifique.

Pour l'évaluation des quantités météorologiques, une échelle bien fondée et compréhensible est nécessaire. Il n'est pas toujours évident de savoir sur la base de quels critères est établie une classification en catégories telles qu' *Élevé* et *Faible* ou *Favorable* et *Défavorable*. Dans la directive VDI 3785, fiche 1, il est donc proposé qu'une évaluation soit basée sur le niveau de valeur locale ou régionale de l'analyse climatique et que l'écart d'un paramètre climatique par rapport aux conditions moyennes dans la zone étudiée soit utilisé comme norme d'évaluation (VDI 2008a).

Il serait également souhaitable de pouvoir comparer les critères d'évaluation à la fois avec les caractéristiques des variables modélisées supplémentaires et avec les résultats d'autres études. Afin d'obtenir cette comparabilité, les paramètres ont été normalisés à l'aide d'une **transformation en Z**. Mathématiquement, cela signifie que la surface moyenne arithmétique est soustraite de chaque valeur initiale de la variable et divisée par l'écart-type de toutes les valeurs. Il en résulte des catégories d'évaluation dont les limites sont définies par la valeur moyenne (= 0) et les écart-types positifs et négatifs (S_i) par rapport à cette valeur moyenne (quatre catégories d'évaluation par défaut par valeur moyenne, limite supérieure et inférieure S_1 ; Figure 31). Une évaluation directe et basée sur des valeurs absolues modélisées (ex. déterminer les niveaux de charge bioclimatique selon le niveau de dépassement de la limite inférieure ou supérieure d'une nuit tropicale) ne serait pas judicieuse sur le plan technique.

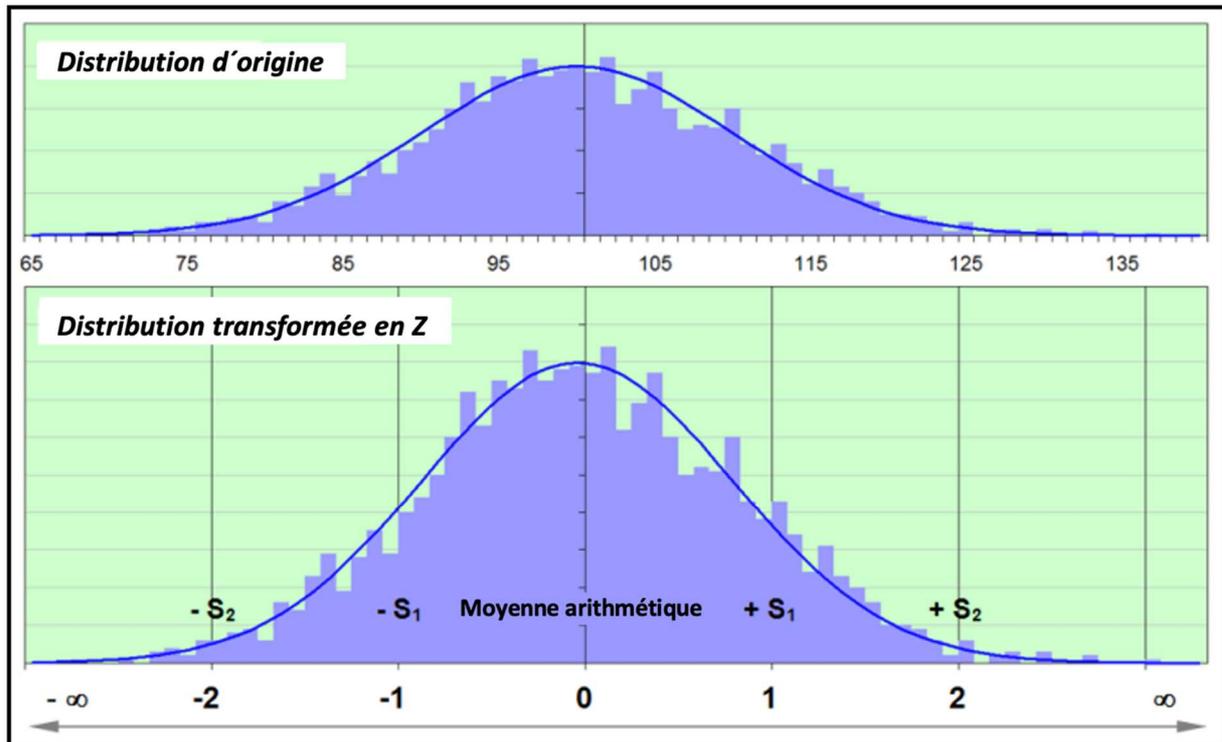


Figure 31 : Transformation en Z pour la normalisation de l'évaluation comparative des paramètres

La PET à 14 h est importante pour la situation de charge bioclimatique extérieur diurne tandis que la température de l'air près du sol à 4 h est importante pour les classes de l'espace d'action en tant qu'indicateur du confort nocturne dans les bâtiments. Tous les paramètres climatiques modélisés sont ajoutés à la géométrie de base comme des attributs supplémentaires en utilisant la moyenne des valeurs de grille à l'intérieur des surfaces respectives de la géométrie de base. Cette première étape génère des valeurs absolues qui sont valables exclusivement pour les conditions météorologiques choisies. Mais des situations nettement plus chaudes ou également plus fraîches existent aussi au sein des conditions météorologiques à considérer. L'évaluation des surfaces doit avoir maintenant pour vocation de représenter l'ensemble de ces différentes situations de conditions météorologiques.

La méthode d'évaluation est applicable pour évaluer la situation de la charge bioclimatique dans l'espace d'action par l'abstraction de valeurs absolues concrètes. La méthode est optimisée selon la directive VDI par rapport à l'évaluation comparative de paramètres climatiques variables spatialement au sein d'une seule dimension spatio-temporelle. Il faut adapter la méthode afin de comparer entre elles plusieurs dimensions temporelles (situation actuelle, situation future) avec leurs champs de températures dont le niveau diffère. C'est pourquoi les statistiques ont été calculées pour la situation diurne et nocturne, mais l'ensemble des valeurs de la situation actuelle et de la situation future a été respectivement regroupé. Pour générer ces valeurs, seuls des points de raster situés dans la catégorie d'évaluation respective ont été utilisés : soit dans l'espace d'action, soit dans l'espace de compensation.

6.2 ÉVALUATION DE L'ESPACE D'ACTION

Sur la base de la transformation en Z, il est possible de générer les niveaux d'évaluation définis par la VDI et d'attribuer une évaluation correspondante à chaque surface de l'espace d'action pour les quatre cartes d'évaluation CIP. Pour le canton de Vaud, l'échelle d'origine à quatre niveaux a été transformée pour des

raisons de représentation en une échelle à cinq niveaux allant de « très favorable » à « très défavorable », sans pour autant dissoudre le système de base (Tableau 8). L'attention pour la situation diurne est portée sur la qualité de séjour en plein air. Ce faisant, il a été distingué entre l'espace d'action 1 (habitat/travail) avec un séjour principalement stationnaire et l'espace d'action 2 (espace de rue) avec un séjour surtout mobile dans le cadre de la mobilité douce comme pour les piétons et les cyclistes. De nuit, l'attention est portée sur le confort de sommeil, c'est pourquoi seule la zone bâtie a été pertinente dans l'évaluation, mais pas les rues. Les voies ferrées et les étendues d'eau sont restées non évaluées tant de jour que de nuit.

Tableau 8 : Niveaux d'évaluation de la situation bioclimatique humaine dans l'espace d'action selon le scénario, le moment de la journée et le type de structures.

Moment de la journée	Valeur moyenne, déviation de la période standard	Niveaux d'évaluation	Valeur Z moyenne	Paramètre considéré	Types de structure évalués
Situation diurne Espace d'action 1	$VM = 37,3$ $sd = 5,4$	Sur le modèle de VDI 3785, F.1 1= très favorable 2= favorable 3= moyenne 4= défavorable 5= très défavorable	PET 14 h jusqu'à -1 > -1 à ≤ 0,3 > -0,3 à ≤ 0,2 > 0,2 à ≤ 0,7 > 0,7	PET 14 h [°C] jusqu'à 31,9 > 31,9 à ≤ 35,7 > 35,7 à ≤ 38,4 > 38,4 à ≤ 41,1 > 41,1	Espace bâti, industrie/commerces
Situation diurne Espace d'action 2	$VM = 37,4$ $sd = 5,1$	Sur le modèle de VDI 3785, F.1 1= très favorable 2= favorable 3= moyenne 4= défavorable 5= très défavorable	PET 14 h jusqu'à -1 > -1 à ≤ 0,3 > -0,3 à ≤ 0,2 > 0,2 à ≤ 0,7 > 0,7	PET 14 h [°C] jusqu'à 32,3 > 32,3 à ≤ 35,9 > 35,9 à ≤ 38,4 > 38,4 à ≤ 41,0 > 41,0	Rues
Situation nocturne Espace d'action	$VM = 16,7\text{ °C}$ $sd = 2,7$	Sur le modèle de VDI 3785, F.1 1= très favorable 2= favorable 3= moyenne 4= défavorable 5= très défavorable	T 4 h jusqu'à -1,5 > -1,5 à ≤ -0,4 > -0,4 à ≤ 0,4 > 0,4 à ≤ 1 > 1	T 4 h [°C] jusqu'à 14,17 > 14,0 à ≤ 15,6 > 15,6 à ≤ 17,7 > 17,7 à ≤ 19,4 > 19,4	Espace bâti, industrie/commerces

En résumé, il est entendu que la déduction des classes d'évaluation et la classification d'une zone urbaine dans une situation bioclimatique « très défavorable » ne signifient pas qu'il faille y attendre des températures estivales élevées et insupportables, mais que ces zones obtiennent de moins bons résultats en termes de paramètres climatiques par rapport à d'autres zones du canton ayant une situation bioclimatique « très favorable » ou « moyenne ». Ainsi, les catégories individuelles d'une situation bioclimatique « très favorable » à « très défavorable » ne décrivent pas une classification absolue, mais constituent seulement l'éventail des différences climatiques existant dans le canton de Vaud.

6.2.1 INDICATION SUPPLÉMENTAIRE DE PROCESSUS D'AIR FROID

Selon le même mode de représentation que celui utilisé dans les cartes de l'analyse climatique (chapitre 5) le phénomène de processus d'air froid est également présenté sous forme de flèches pour les couloirs et les écoulements d'air froid dans les cartes d'évaluation nocturne. De plus, les zones de génération d'air

froid sont à nouveau représentées par des hachures (la méthodologie correspond à celle des cartes de l'analyse climatique).

En plus de ces contenus sur les processus d'air froid chevauchant les espaces de compensation, une information supplémentaire relative à l'air froid est fournie dans les cartes d'évaluation nocturne de l'espace d'action. La zone d'impact de l'air froid présentée avec des hachures en bleu clair indique l'étendue de la pénétration de l'air froid dans les zones bâties et les zones industrielles et commerciales (cf. Figure 32).

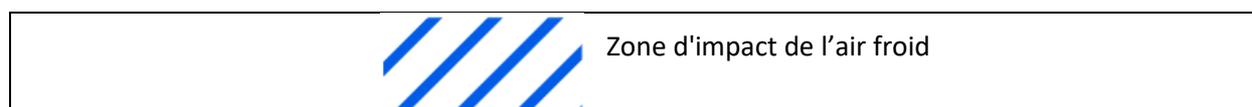


Figure 32 : Symboles des processus d'air froid dans l'espace d'action.

La zone d'impact de l'air froid n'influence aucunement l'évaluation des zones. L'air froid est d'abord formé dans les zones de génération d'air froid et transporté en direction de la zone bâtie (ex. via les couloirs d'air froid). L'aération des localités peut s'avérer plus ou moins forte, en fonction de plusieurs facteurs (ex. apport d'air de la périphérie, obstacles au flux, etc.). Les zones urbaines peuvent être subdivisées en des aires suffisamment aérées et ainsi en des zones de charge thermique et des structures souvent plus favorables sur le plan climatique. La zone d'impact de l'air froid caractérise le flux d'air froid près du sol provenant des espaces verts et pénétrant les espaces urbains pendant une nuit d'été autochtone. Cela a pour conséquence que la zone d'action présente des conditions relativement plus favorables de nuit.

Les zones d'action de l'air froid sont toutes les zones de l'espace d'action qui atteignent ou dépassent la valeur moyenne du débit d'air froid de $34,3 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$ de l'espace d'action (situation future : $33,9 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$) et la vitesse moyenne correspondante du vent de $0,2 \text{ m/s}$ (identique pour la situation future). Les zones contiguës dont la taille est inférieure à 500 m^2 ont été supprimées. Les localités du canton de Vaud sont bien traversées par de l'air froid en raison de la situation topographique qui favorise de grands écoulements d'air froid provenant des montagnes. De grandes parties des communes sont identifiées avec une zone d'impact de l'air froid. Seuls les villes et les centres à la périphérie nord du Léman (ex. Préverenges, Ecubens, St-Sulpice, Lausanne) ne sont plus aussi bien traversés par de l'air froid.

6.2.2 INDICATION D'ESPACES BÂTIS NON HABITÉS

Des informations supplémentaires sont affectées à l'espace urbain. Il s'agit d'abord d'informations sur les espaces routiers comme les rues et les places qui sont représentées en gris. En outre, les espaces bâtis non habités comme les zones industrielles et commerciales sont identifiés par des hachures en pointillés. En règle générale, personne ne séjourne pendant la nuit dans les rues ou sur les places, ni dans les zones industrielles et commerciales, c'est pourquoi il faudrait porter une attention particulière plutôt sur la situation diurne pour améliorer ces structures urbaines. La priorité est accordée aux conditions de sommeil dans l'évaluation de la situation nocturne.



Figure 33 : Symboles des catégories d'espace d'action supplémentaires : « non habité » et sur les espaces routiers

6.3 ÉVALUATION DE L'ESPACE DE COMPENSATION

On entend par « espaces de compensation » des zones non construites, caractérisées par de la végétation, qui sont capables, principalement la nuit, d'atténuer ou de réduire la pollution de l'air ou les charges bioclimatiques humaines dans des espaces d'action en produisant de l'air plus froid et plus frais, et en contribuant à un transport de l'air froid. Pendant la journée, les espaces de compensation peuvent servir d'espaces de loisirs locaux précieux grâce à l'ombrage qu'ils procurent. Dû à ces différentes propriétés fondamentales des espaces de compensation à différents moments de la journée, il apparaît nécessaire d'évaluer séparément la situation diurne et la situation nocturne dans un processus partiellement automatisé et, comme c'est déjà le cas dans l'espace d'action, de les répartir sur cinq niveaux d'importance bioclimatique (de « aucune importance » à « très grande importance »). Les mêmes méthodologies sont utilisées tant pour la situation actuelle que pour la situation future.

L'attention est portée sur le bilan d'air froid pour l'évaluation des espaces verts de nuit. Une très grande importance a ainsi été accordée aux espaces verts associés aux couloirs d'air froid s'ils présentent un lien direct avec les zones bâties (fonction principale), une grande importance s'ils comportent un écoulement d'air froid significatif et alimentent un couloir d'air frais (fonction secondaire). Ils ont une importance moyenne s'ils représentent des zones de production d'air froid qui alimentent les couloirs d'air froid ou les écoulements d'air froid. Si les espaces verts possèdent un faible débit d'air froid, ils sont classés dans la catégorie de faible importance. L'emplacement des espaces verts joue à nouveau un rôle décisif ici. L'importance bioclimatique d'un espace vert alimentant en air froid une zone urbaine adjacente dont la charge thermique est élevée augmente (Figure 34).

Concernant le critère de la superficie des espaces verts (≥ 1 ha), ce n'est pas la zone partielle individuelle qui est prise en compte, mais la superficie de l'ensemble du réseau d'espaces verts¹⁴. À compter d'une superficie d'environ 1 ha, on peut présumer qu'un espace vert et ouvert a un effet bénéfique sur le climat. Les zones de génération d'air froid et les forêts sont au moins de faible importance. Les zones de génération d'air froid ont été représentées sous forme de raster par des hachures en pointillés dans la carte de l'analyse climatique et la carte indicative de planification (cellule par cellule pour chaque cellule de raster de 10 m x 10 m), alors que les zones de génération d'air froid ont dû être représentées sous forme de polygones dans l'évaluation des espaces verts (c.-à-d. en lien avec des zones individuelles).

La Figure 34 montre le système d'évaluation hiérarchisé appliqué sous forme schématique, les conditions suivantes s'appliquant :

- Débit d'air froid moyen : $\geq 34 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ ou vitesse du vent dans les deux périodes $\geq 0,3 \text{ m/s}$
- Débit d'air froid faible : $< 34 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$
- Adjacent aux zones bâties subissant la charge thermique : Distance orthodromique (à vol d'oiseau) max. 15 m

L'exemple suivant peut aider à la lecture du système d'évaluation : pour un espace vert non-composant d'un couloir d'air froid ou d'un écoulement d'air froid et confinant à des zones d'habitation dont la situation bioclimatique humaine est « (très) défavorable », la classification suivante s'applique :

- L'espace comporte un débit d'air froid moyen → il a une « grande importance bioclimatique ».
- L'espace comporte un débit d'air froid faible → il a une « importance bioclimatique moyenne ».

¹⁴ Un réseau d'espaces verts est limité par une autre occupation des sols, ex. l'espace d'action (zone bâtie, voies de circulation) ou l'eau.

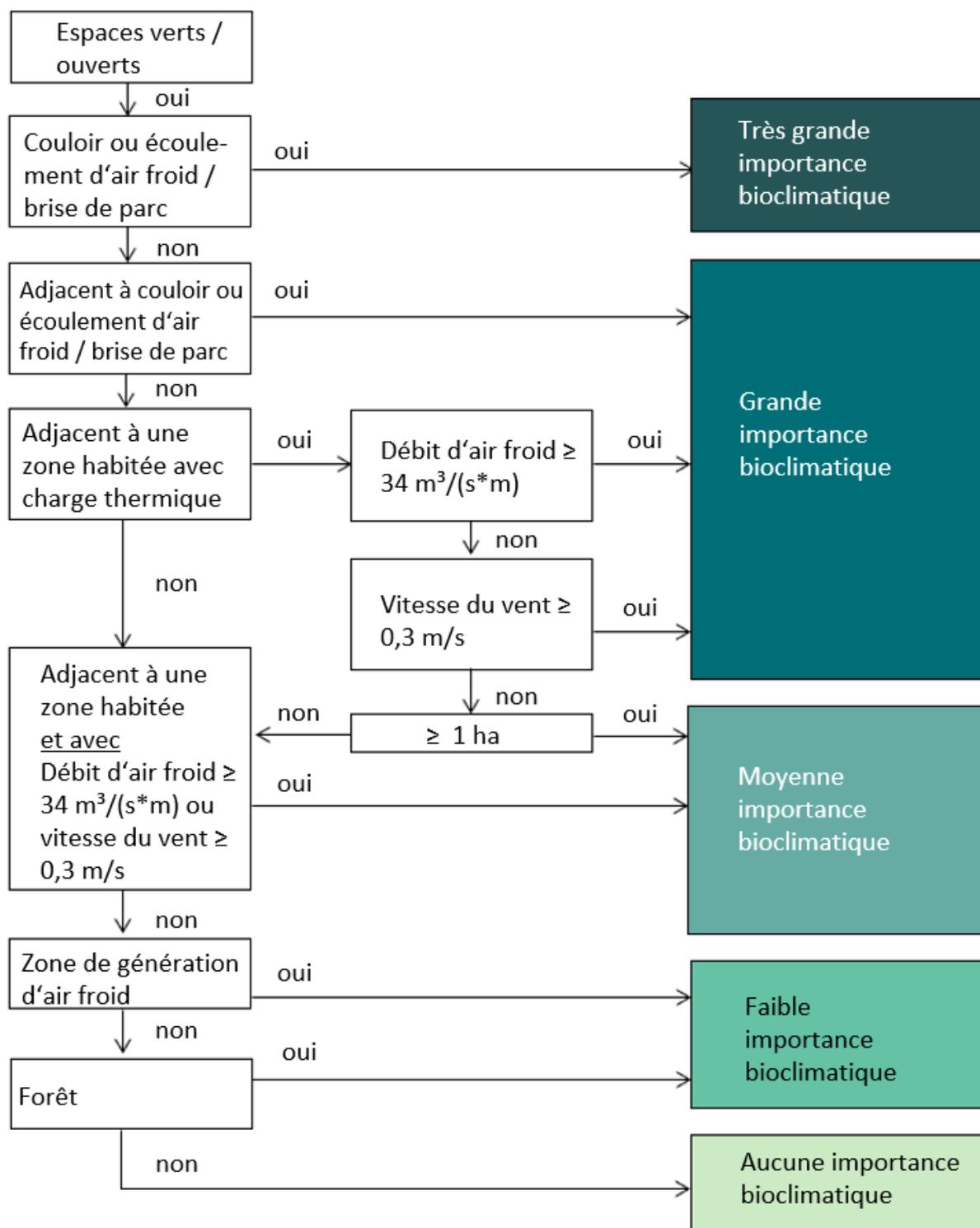


Figure 34 : Schéma d'évaluation dans l'espace de compensation de nuit

Pour la **situation diurne**, la PET sert de grandeur d'évaluation dans l'espace de compensation. Ici intervient de nouveau la méthodologie décrite de la transformation en Z (cf. chapitre 6.1 et Figure 31). Ce faisant, l'attention est portée sur une qualité de séjour la plus élevée possible dans les espaces verts et ouverts en vue d'offrir à la population des lieux de refuge et de détente pour les jours d'été.

Le **Tableau 9** énumère les valeurs Z définies et les plages de PET relatives pour la situation actuelle et le scénario de la situation future pour toutes les espaces de compensation sans forêt dans le canton de Vaud et compare les niveaux d'évaluation élaborés selon la directive VDI 3785, F.1 (12/2008).

Tableau 9 : Niveaux d'évaluation de l'importance bioclimatique humaine dans l'espace de compensation pendant la journée

Moment de la journée	Valeur moyenne Déviation de la période standard (Sans la forêt)	Niveaux d'évaluation Qualité de séjour bioclimatique	Valeur Z moyenne	Paramètre considéré	Valable pour les types de structures suivants
Situation diurne	VM = 34,2 °C sd = 7,2	Sur le modèle de VDI 3785, F.1 5= très grande 4= grande 3= moyenne 2= faible 1= aucune	PET 14 h Valeur Z ≤ -1 Valeur Z > -1 et ≤ -0,3 Valeur Z > -0,3 et ≤ 0,5 Valeur Z > 0,5 et ≤ 1 Valeur Z > 1	PET 14 h [°C] jusqu'à 27,0 > 27,0 à ≤ 32,0 > 32,0 à ≤ 38,2 > 38,2 à ≤ 41,4 > 41,4	Espaces verts et ouverts

Les terrains boisés étant nombreux dans le canton de Vaud, une évaluation séparée a été réalisée :

(5) Très grande importance bioclimatique :

- À 700 m d'un espace bâti présentant une situation bioclimatique très défavorable
- À 300 m d'un espace bâti présentant une situation bioclimatique défavorable

(4) Grande importance bioclimatique :

- Forêt proche d'un espace bâti : à 300 m max. d'un espace bâti, indépendamment de son niveau de charge bioclimatique

(3) Importance bioclimatique moyenne :

- Autres forêts

Le climat des espaces verts et ouverts basé sur la PET est utilisé comme évaluation des espaces verts et ouverts pour la situation diurne en combinaison avec la distance par rapport aux espaces bâtis chargés thermiquement (Figure 35). En s'appuyant sur une étude de l'institut fédéral allemand de la recherche sur la construction, le développement urbain et l'aménagement du territoire (Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR 2018)), il est distingué entre l'accessibilité aux espaces verts à une distance à vol d'oiseau de 300 m et celle de 700 m. Aucune différence entre les espaces verts accessibles au public et les espaces verts privés n'a pu être prise en compte sur la base des données disponibles.

Comme mentionné au début, la qualité de séjour en forêt est relativement élevée pendant la journée. Mais certains terrains boisés sont difficilement accessibles depuis l'espace urbain et, dû à cette distance, ceux-ci ne servent de lieu de refuge que de manière limitée pendant une période caniculaire. En raison de leur bioclimat favorable, toutes les forêts vaudoises ont au moins une « faible importance » pendant la journée. L'importance des terrains boisés est d'autant plus élevée en cas de bonne accessibilité, notamment depuis les zones urbaines dont la charge thermique est élevée pendant la journée (Figure 35).

		Climat des espaces verts				
		Très favorable	Favorable	Moyenne	Défavorable	Très défavorable
Accessibilité	1. Espace vert très bien accessible (300 m) à partir de espaces bâtis (EB) présentant une situation bioclimatique très défavorable	Très grande importance	Très grande importance	Grande importance	Faible importance	Aucune importance
	2. Espace vert bien (700 m) accessible à partir de EB à situation bioclimatique très défavorable ou très bien (300 m) accessible à partir de EB à situation bioclimatique défavorable	Très grande importance	Grande importance	Moyenne importance	Faible importance	Aucune importance
	3. Espace vert bien (700 m) accessible à partir de EB à situation bioclimatique défavorable ou très bien (300 m) accessible à partir de EB à situation bioclimatique moyenne	Grande importance	Moyenne importance	Faible importance	Faible importance	Aucune importance
	4. Autres espaces verts et ouverts	Moyenne importance	Moyenne importance	Faible importance	Aucune importance	Aucune importance

Figure 35: Schéma d'évaluation dans l'espace de compensation pendant la journée en tenant compte de l'accessibilité.

6.4 RESULTATS CARTES INDICATIVES DE PLANIFICATION

Les cartes indicatives de planification de jour et de nuit dans le contexte du canton sont décrites ci-après. Les cartes offrent tant des indications sur la situation actuelle que sur la situation future, y compris sur les développements urbains.

6.4.1 SITUATION NOCTURNE

Dans la situation actuelle de nuit, environ 47 % des espaces bâtis vaudois présentent une situation bioclimatique « très favorable » ou « favorable ». Environ 40 % des espaces bâtis présentent une situation bioclimatique moyenne, 10 % une situation bioclimatique « défavorable » et seulement très peu d'espaces bâtis (2 %) une situation bioclimatique « très défavorable » (Tableau 10).

Tableau 10 : Espace bâti : proportion des zones et indications de planification pour la situation nocturne

Situation bioclimatique	Proportion des zones [%]		Indications de planification générales
	Actuelle	Future	
Très favorable	9,6	2	Espaces bâtis majoritairement ouverts avec une bonne ventilation et une faible sensibilité à l'intensification de l'utilisation, en tenant compte des aspects climato-écologiques. Le bioclimat très favorable doit être assuré. Les mesures visant à améliorer la situation thermique ne sont pas nécessaires. La proportion de la végétation doit être préservée autant que possible.
Favorable	37,5	8,6	Sensibilité faible à moyenne à l'intensification de l'utilisation, en tenant compte des aspects climato-écologiques. Le bioclimat favorable doit être assuré. Les mesures visant à améliorer la situation thermique ne sont pas nécessaires. Les espaces ouverts et la proportion de végétation doivent être préservés autant que possible.
Moyenne	40,4	24,7	Sensibilité intermédiaire à l'intensification de l'utilisation. Des mesures visant à améliorer la situation thermique sont recommandées. L'orientation du bâtiment doit être prise en compte, les espaces ouverts doivent être maintenus et, si possible, une augmentation de la proportion de la végétation doit être visée.
Défavorable	10,3	37,7	Grande sensibilité à l'intensification de l'utilisation. Des mesures visant à améliorer la situation thermique sont nécessaires. Il ne devrait plus y avoir de densification (en particulier aux dépens des espaces verts/ouverts) et une amélioration de la ventilation devrait être recherchée. Les espaces ouverts doivent être préservés et la proportion de végétation augmentée (si nécessaire, végétalisation des cours intérieures des blocs).
Très défavorable	2,2	27	Très grande sensibilité à l'intensification de l'utilisation. Les mesures visant à améliorer la situation thermique sont nécessaires et prioritaires. Il ne devrait plus y avoir de densification (en particulier aux dépens des espaces verts/ouverts) et une amélioration de la ventilation devrait être recherchée. Les espaces ouverts doivent être préservés et la proportion de végétation doit être augmentée et, si possible, des mesures de désimpermeabilisation doivent être prises (ex., parcs de poche, végétalisation des cours intérieures des blocs).

Les espaces bâtis dont la situation de nuit a été évaluée comme « très favorable » et « favorable » se situent principalement à des altitudes plus élevées (ex. fermes isolées, Ste-Croix) et à la périphérie de zones bâties (ex. Le-Mont-Sur-Lausanne, Epalinges ou Belmont-sur-Lausanne). Ces derniers profitent d'un

apport d'air froid provenant d'espaces verts environnants et sont en règle générale de faible densité. Par contre, la situation est évaluée largement « défavorable » et « très défavorable » dans les zones centrales de forte densité (ex. centre-ville de Lausanne, de Pully ou d'Yverdon-les-Bains) ou encore des zones industrielles et commerciales très imperméables (ex. le long de la rue de Sébeillon à Lausanne) (Figure 36). La place des Pionnières à Lausanne ou la rue du Bourg à Lutry comptent parmi les voies de circulation et les places particulièrement chargées thermiquement, pour ne citer que ces exemples. Les voies de circulation ayant une faible surchauffe nocturne se situent en grande partie en dehors des agglomérations et en périphérie.

Tableau 11 : Espace de compensation : proportions des zones et indications de planification pour la situation nocturne.

Importance bioclimatique	Proportion des zones [%]		Indications de planification générales
	Actuelle	Future	
Aucune	14,5	14,4	Les espaces qui ne remplissent aucune fonction climatique pertinente pour les espaces bâtis actuels et ne sont pas très sensibles à l'intensification de l'utilisation. Les interventions structurelles doivent être menées en tenant compte des fonctions climatiques.
Faible	50,5	50,4	Des espaces de compensation climato-écologique qui complètent les espaces bâtis actuels et sont modérément sensibles à l'intensification de l'utilisation. Le développement adjacent bénéficie des fonctions climatiques fournies, mais n'en est généralement pas dépendant. Les interventions sur les bâtiments doivent être effectuées en tenant dûment compte des fonctions climatiques.
Moyenne	25,4	24,5	Les espaces de compensation climato-écologique qui sont importants pour les espaces bâtis actuels et qui sont très sensibles à l'intensification de l'utilisation. Les interventions structurelles doivent tenir compte des fonctions climatiques et viser le passage efficace de flux d'air entre bâtiments adjacents.
Grande	4,6	5,7	Les espaces de compensation climato-écologiques qui sont particulièrement importants pour les espaces bâtis actuels dévolus à l'habitat et qui sont très sensibles à l'intensification de l'utilisation. Les interventions structurelles devraient être évitées complètement ou, si elles se trouvent sur des secteurs déjà affectés en zone à bâtir, devraient être effectuées en tenant compte des fonctions climatiques. Il faut s'efforcer d'obtenir le passage efficace de flux d'air entre bâtiments adjacents et, afin d'optimiser les services écosystémiques, il convient d'établir la mise en relation d'espaces verts/ouverts adjacents.
Très grande	5,0	4,9	Les espaces verts et ouverts, qui jouent un rôle central dans le bilan thermique nocturne et sont les espaces de compensation climato-écologiques les plus importants. Les interventions structurelles doivent être complètement évitées ou, si elles se trouvent sur des secteurs déjà affectés en zone à bâtir, doivent être effectuées en tenant compte des fonctions climatiques. Le passage efficace de flux d'air entre bâtiments adjacents doit être maintenu et, si nécessaire, étendu à l'aide de la mise en relation d'espaces verts.

Dû aux changements climatiques, la charge thermique augmente dans les espaces bâtis. Ceux dont la situation bioclimatique a été évaluée comme « très favorable » (9,6 %) et « favorable » (37,5 %) sont réduites à un total d'environ 10 % et se situent pour la plupart en altitude (ex. Sainte-Croix, L'Auberson). L'augmentation de la charge thermique se manifeste toutefois aussi en altitude (ex. Vallorbe et Ballaigues).

La situation bioclimatique « moyenne » est presque divisée par deux dans les espaces bâtis. Les espaces bâtis, dont la situation a été évaluée comme « défavorable » et « très défavorable » augmentent dans plus de la moitié des espaces bâtis du canton de Vaud en raison de l'augmentation de la température causée par les changements climatiques (Tableau 10 et Figure 37).

Les secteurs évalués comme défavorables sur le plan thermique se situent sur l'ensemble du territoire du canton, aussi bien dans des villes et communes de forte densité autour du Léman (ex. Nyon, Morges, Lausanne, Pully, Lutry), mais également dans des villes du plateau (Orbe, Chavornay) ou des communes de plus petite taille (ex. Penthaiz).

Selon l'emplacement et la taille du secteur dans laquelle ils ont lieu et le degré d'imperméabilité causé par les bâtiments et les zones imperméables, les développements urbains pris en compte, incluant zones d'habitation, industrielles et commerciales, sont classés avec une situation bioclimatique au moins « moyenne » (ex. Froideville, Montpreveyres ou Vers-chez-les-Blanc), une situation bioclimatique « défavorable » (ex. Belmont-sur-Lausanne) ou encore plus mauvaise (ex. Renens et de nombreux secteurs de Lausanne). Parfois, l'augmentation de la température est moins élevée que l'incrément de température de 2,7°C lié aux changements climatiques, comme ex. à Yverdon-les-Bains, où une grande aire de stationnement de la rue de Midi doit être aménagée en un quartier résidentiel avec des espaces verts. (Figure 16). La situation bioclimatique de cette zone de développement urbain est évaluée dans le scénario de la situation future comme « moyenne » (ainsi que les aires de stationnement dans la situation actuelle), en revanche, les blocs environnants présentent une situation bioclimatique « très défavorable ».

Parmi les espaces de compensation vaudois, environ 10 % des zones ont une « grande » à « très grande » importance en termes d'atténuation de la chaleur pendant la nuit (Tableau 11). Il s'agit des zones des couloirs d'air froid, des écoulements d'air froid et des brises de parc. Les espaces verts et ouverts n'ayant « aucune » importance ne représentent qu'environ 15 % des espaces de compensation vaudois. Ils se situent principalement dans des régions isolées et n'ont aucune fonction climatique significative pour le confort humain. Occupant environ la moitié des secteurs de compensation, les espaces verts et ouverts ayant une « faible » importance pour l'atténuation de la chaleur représentent la majeure partie des espaces de compensation vaudois. Il s'agit ici de zones qui, certes, produisent de l'air froid (zones de génération d'air froid et forêts constituant de l'air froid au-dessus de la canopée), mais dont la population en général ne profite pas en raison de la faible vitesse des flux et de leur grande distance par rapport à la zone bâtie. Un quart des zones a été évalué comme ayant une importance « moyenne » pendant la nuit. Il s'agit souvent d'espaces verts urbains (ex. la périphérie de la Vallée de la Jeunesse, le parc de L'Elysée, parc de L'Hermitage à Lausanne). Ces zones soit procurent un air froid supérieur à la moyenne soit elles sont à l'origine d'une aération. Celles-ci se situent directement dans l'aire d'influence des espaces bâtis surchauffés et sont significatives en ce qui concerne le refroidissement de ces derniers.

À l'avenir, les évaluations de certaines zones de l'espace de compensation vont changer aussi par rapport à la situation actuelle, car leurs fonctions et la proximité de zones d'habitation (chargées thermiquement) sont étroitement entrelacées. Le parc de mon Repos à Lausanne, ex., reçoit une plus grande importance (moyenne et grande) dans la nuit, car il se situe à proximité directe de quartiers résidentiels dont la situation est évaluée comme « très défavorable ». Il en va de même ex. pour le parc Guillemain à Pully ou les

espaces ouverts autour de l'espace bâti de Gollion. Ce changement peut être constaté au vu de la répartition proportionnelle de la classe « grande » importance à l'avenir (Tableau 11), qui augmente d'un point de pourcentage au détriment des espaces verts dont l'importance est évaluée comme « moyenne ».

Les espaces verts qui représentent un couloir d'air froid conservent leur « très grande » importance. Les espaces verts transporteront à l'avenir de l'air froid plus chaud (cf. chapitre 4.2).

La vérification de l'importance des espaces de compensation et d'action ne doit toutefois pas se limiter à la situation nocturne, mais inclure également la situation diurne (chapitre 6.4.2, prochain chapitre). Il en ressort des évaluations en partie similaires (ex. les forêts autour d'Aigle et d'Ollon au sud du canton ont la même importance de jour comme de nuit), mais également des spécificités contradictoires (ex. le centre sportif le long de l'Avenue Pierre-de-Coubertin au bord du Léman à Lausanne qui n'a « aucune » importance de nuit et dont la qualité de séjour pendant la journée est « moyenne » à « grande »). Il n'est pas inhabituel que les résultats diffèrent entre le jour et la nuit, car les terres agricoles, les prairies et les espaces verts sont importants notamment de nuit avec leur apport élevé d'air froid et, de jour, les arbres et les forêts sont considérés comme des lieux de refuge offrant de l'ombre et protégeant de la charge thermique.

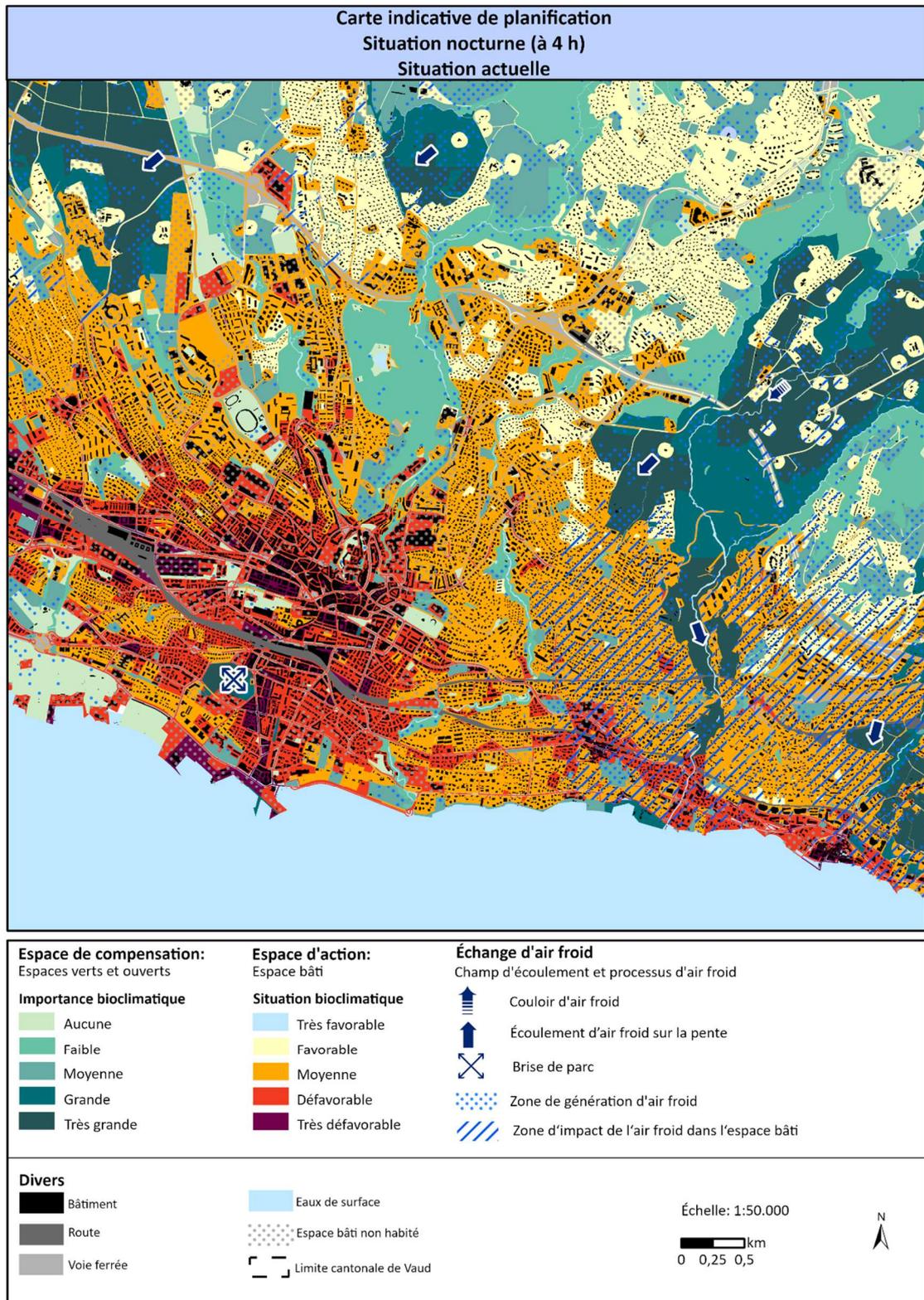


Figure 36: Carte indicative de planification de nuit, situation actuelle.

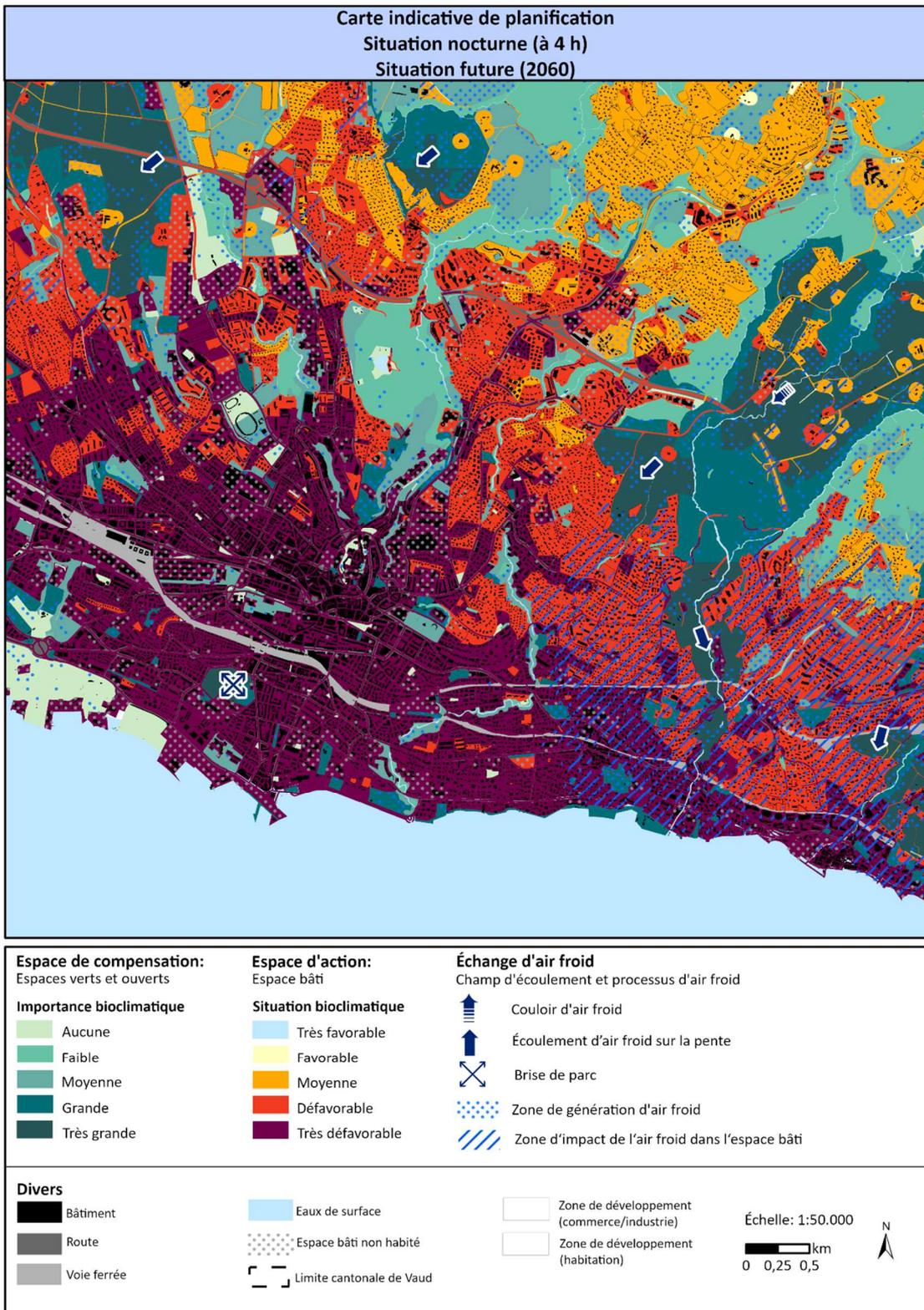


Figure 37 : Carte indicative de planification de nuit, situation future

6.4.2 SITUATION DIURNE

Dans la situation de jour, la priorité est donnée à la qualité de séjour dans l'espace de compensation, dans les cours intérieures, les espaces verts et ouverts ainsi que sur les places et dans les rues.

Tableau 12 : Espace urbain : Proportion des zones et indications de planification pour la situation diurne

Situation bioclimatique	Proportion des zones [%]		Indications de planification générales
	Actuelle	Future	
Très favorable	12,9	4,7	Les mesures visant à améliorer la situation thermique ne sont pas nécessaires, mais doivent être envisagées pour les sentiers pédestres et les pistes cyclables importants, les places et les espaces d'attente en plein air. Le bioclimat très favorable doit être assuré.
Favorable	26,9	10,3	Les mesures visant à améliorer la situation thermique ne sont pas absolument nécessaires, mais doivent être envisagées pour les sentiers pédestres et les pistes cyclables importants, les places et les espaces d'attente en plein air. Le bioclimat favorable doit être assuré.
Moyenne	34,6	19,9	Des mesures visant à améliorer la situation thermique sont recommandées ; dans le cas des zones de circulation, en particulier dans le domaine des sentiers pédestres et des pistes cyclables, des places et des espaces d'attente en plein air. Des espaces de compensation doivent être accessibles à pied, depuis les espaces bâtis. Il faut viser la meilleure situation d'ombrage possible et une proportion élevée de végétalisation.
Défavorable	22,4	35,8	Des mesures visant à améliorer la situation thermique sont nécessaires dans les zones de circulation, en particulier dans le domaine des sentiers pédestres et des pistes cyclables, des places et des espaces d'attente en plein air. Une forte demande de mesures d'adaptation telles que la végétalisation et l'ombrage supplémentaires et, si nécessaire, la désimperméabilisation. Des espaces de compensation suffisants doivent être facilement accessibles à distance de marche, depuis les espaces bâtis.
Très défavorable	3,2	29,3	Des mesures visant à améliorer la situation thermique sont nécessaires et prioritaires, notamment dans le domaine des sentiers pédestres et des pistes cyclables, des places et des espaces d'attente en plein air. Il existe une très forte demande pour des mesures d'adaptation telles que la végétalisation et l'ombrage ainsi que la désimperméabilisation supplémentaires. Des espaces de compensation suffisants doivent être facilement accessibles et à distance de marche, depuis les espaces bâtis.

La situation d'environ 40 % des espaces bâtis a été évaluée comme « très favorable » et « favorable » (Tableau 12). Comme dans la situation nocturne, les espaces bâtis les moins chargés thermiquement aussi pendant la journée se retrouvent en altitude et dans des localités de faible densité avec un peuplement d'arbres (ex. Sainte-Croix, Bulle ou Villars-Burquin). De plus, les zones bâties situées à proximité de l'eau profitent pendant la journée de l'effet de l'eau, notamment dans les environs directs du Léman (ex. Buchillon ou Coppet) et du lac de Neuchâtel (ex. Grandson). La proximité des forêts (ex. Champ Preveire et Signal de Belmont avec les groupes d'arbres/forêts intermédiaires ou une proportion élevée d'arbres au sein d'une zone bâtie (ex. Bougy ou Chailly) sont d'autres facteurs favorables à une faible charge thermique pendant la journée. La situation bioclimatique d'un bon tiers des espaces bâtis a été évaluée comme étant « moyenne ». Ces secteurs se trouvent d'une part au centre de localités plus petites ou à la périphérie des villes plus grandes. La charge thermique de tous les espaces d'action est classée comme étant « (très) défavorable » (environ un quart), la majeure partie de ces secteurs se trouvant dans des zones très imperméables et exposées au soleil (ex. dans des zones industrielles et commerciales plus grandes ou dans les centres-villes) (Figure 38). De nombreuses grandes rues exemptes d'arbres présentent aussi cette charge thermique.

Dans la situation future, les proportions des zones changent nettement selon la classe d'évaluation pour l'espace bâti. La situation de seulement 15 % des espaces bâtis a été évaluée comme « très favorable » et « favorable ». Ces espaces bâtis sont soit une ferme isolée en altitude soit de faible densité ou dotées d'espaces verts avec des arbres, soit à proximité directe de la forêt (ex. Les Paccots). Les espaces bâtis dont la charge thermique est évaluée comme « moyenne » diminueront à l'avenir et passeront dans la catégorie charge thermique « défavorable » ou « très défavorable ». Ces deux catégories de zones représenteront à l'avenir plus de 65 % de l'ensemble du territoire. Les espaces bâtis situées en altitude comme Sainte-Croix ou Vallorbe représentent une proportion significative de ces classes d'évaluation.

Dans le Tableau 13, les proportions de zones sont représentées selon la classe d'évaluation de la situation actuelle et de la situation future. Environ 30 % des espaces verts et ouverts ont une « (très) grande » importance et se situent à distance de marche des zones bâties chargés thermiquement : la population peut donc bien y accéder pendant les jours tropicaux (température de l'air > 30 °C ; cf. Figure 35). L'importance d'environ 43 % d'entre eux a été évaluée comme étant « moyenne ». Les prairies et les forêts occupent une grande proportion de cette classe. Un quart des zones présente une « faible » importance bioclimatique. Les prairies comptent pour la majeure partie d'entre-elles. Seules de rares zones de l'espace de compensation n'ont « aucune » importance. Celles-ci sont réparties dans le Gros-de-Vaud et dans la vallée du Rhône, mais elles sont plus éloignées des localités.

Compte-tenu des changements climatiques, tant les zones de « très grande » que les zones n'ayant « aucune » importance vont augmenter à l'avenir. D'une part, à proximité de espaces bâtis chargés thermiquement, les espaces verts et de compensation seront plus importants et ainsi plus significatifs pour la récupération de la population. D'autre part, la charge thermique augment également sur les espaces verts et ouverts, ce qui entraîne une diminution de la qualité de séjour et ne garantit plus de pouvoir se remettre de la chaleur dans tous les espaces verts. Les prairies, quant à elles, glissent dans la catégorie « aucune » importance bioclimatique.

Tableau 13 : Espace de compensation : Proportion des zones et indications de planification pour la situation diurne

Importance bioclimatique	Proportion des zones [%]		Indications de planification générales
	Actuelle	Future	
Aucune	0,7	10,1	Espaces libres ou espaces verts éloignés des espaces bâtis, peu ombragés et soumis à un rayonnement solaire intense (principalement des pelouses ou des surfaces agricoles). Dans les espaces proches des zones bâties, il convient de développer ou d'étendre des éléments de végétation ombrageux - en particulier sur les espaces verts publics (augmentation de la diversité des microclimats).
Faible	26,8	27,5	Espaces verts et espaces libres présentant un déficit d'ombrage (faible fonction de compensation) ou une accessibilité insuffisante depuis les espaces bâtis thermiquement chargés (ne convient pas comme lieu de refuge). Pour les espaces verts proches des espaces bâtis, il convient d'augmenter la proportion d'arbres et la diversité microclimatique. En cas de mauvaise accessibilité, il convient de garantir une bonne mise en relation des zones vertes.
Moyenne	43,4	31,4	Espaces verts proches des agglomérations avec une qualité de séjour moyenne à élevée, où l'influence bioclimatique positive des éléments de végétation prédomine. Les éléments de végétation qui créent de l'ombrage doivent être conservés et protégés ou, le cas échéant, étendus.
Grande	24,1	18,3	Espaces de compensation qui offrent une grande qualité de séjour pendant la journée et servent de lieux de retraite. Il s'agit notamment de forêts proches des espaces bâtis et d'espaces verts bien ombragés, accessibles à pied depuis les espaces bâtis thermiquement chargés. Les arbres doivent être conservés et protégés, et leur bonne accessibilité doit être garantie.
Très grande	4,9	12,8	Espaces verts les plus ombragés possibles, accessibles à pied depuis les espaces bâtis thermiquement chargés (pour autant qu'il ne s'agisse pas de terrains privés) et offrant la meilleure qualité de séjour pendant la journée. Les arbres doivent être conservés et protégés, la très bonne accessibilité doit être garantie.

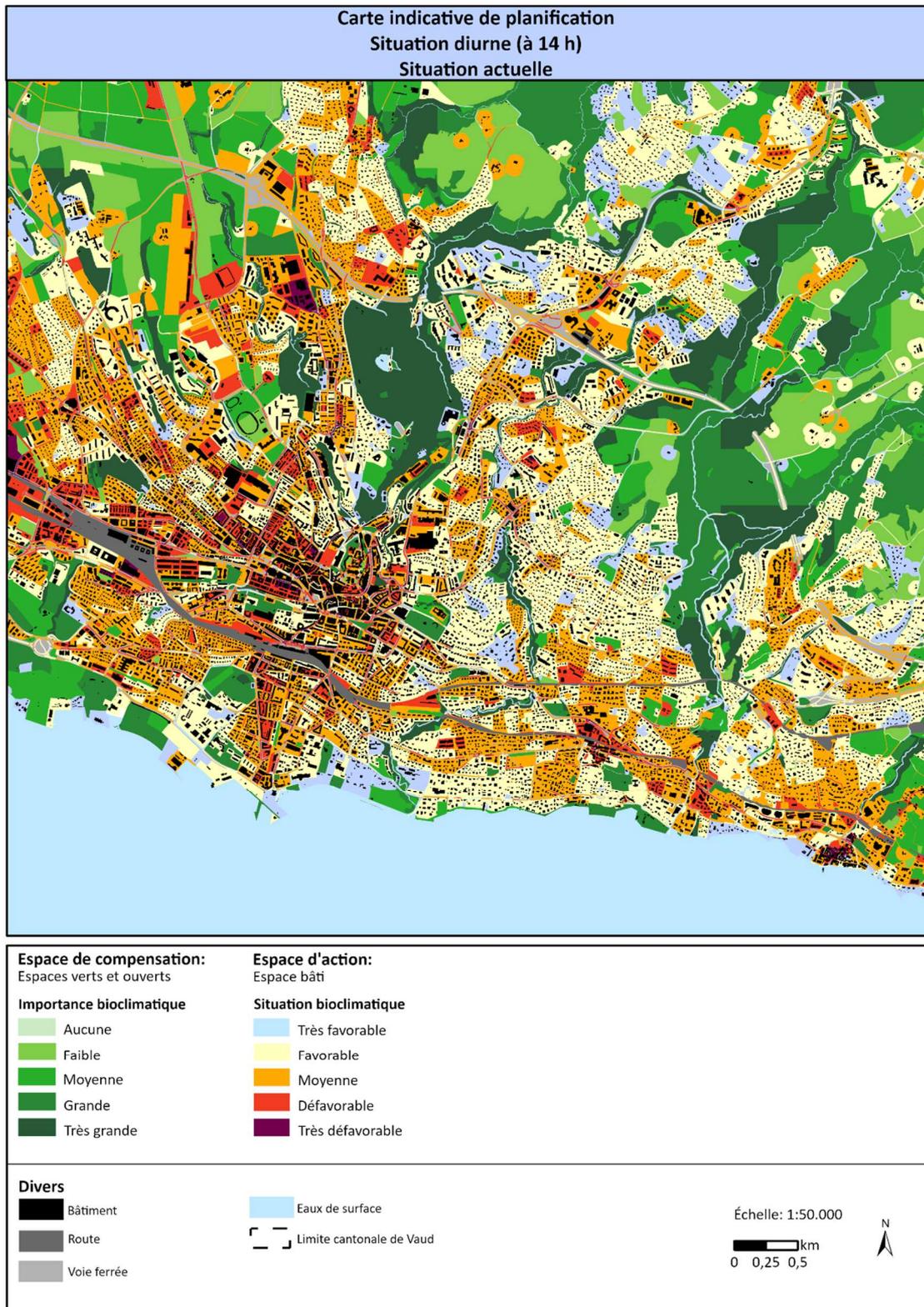


Figure 38 : Carte indicative de planification de jour, situation actuelle

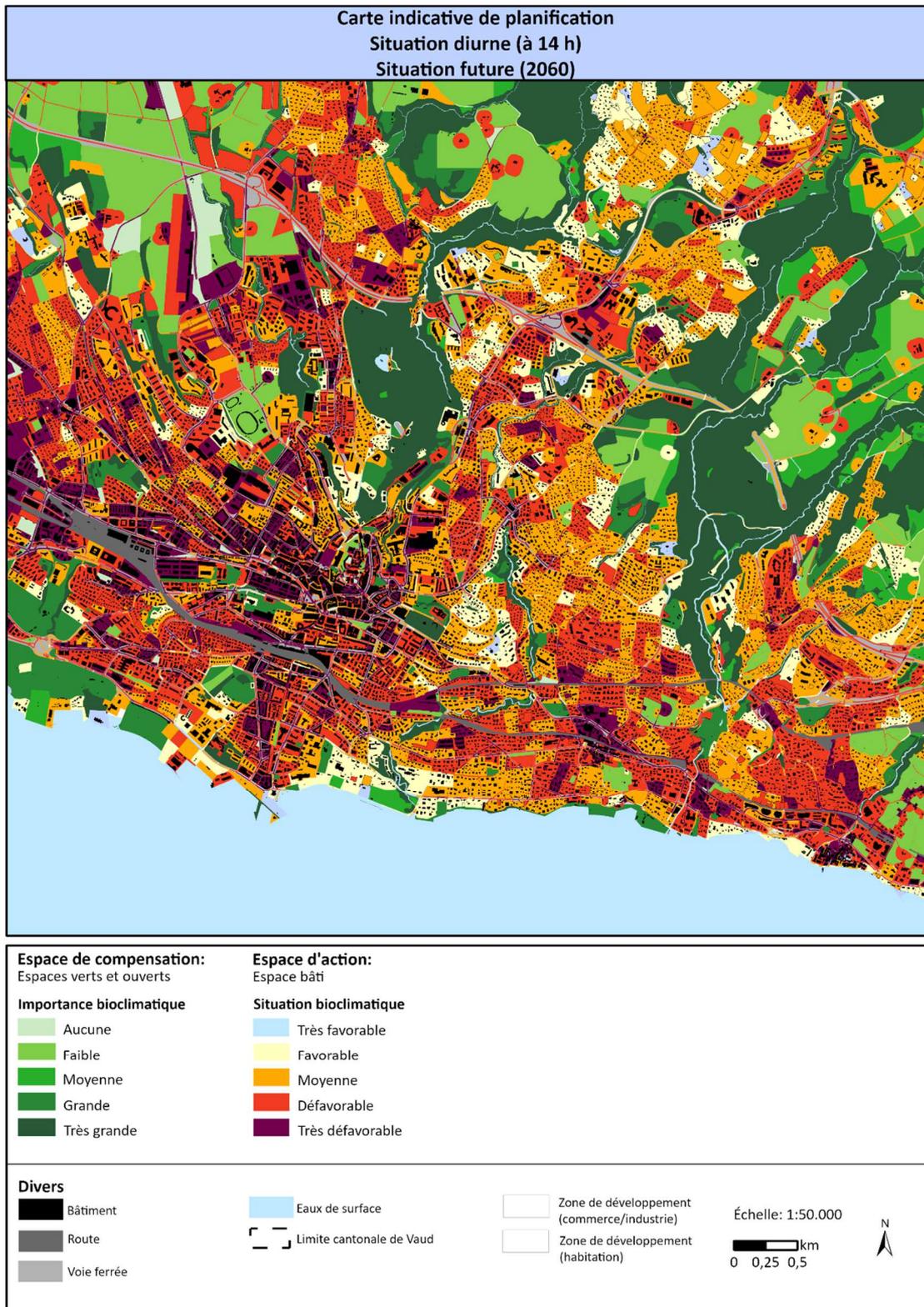


Figure 39 : Carte indicative de planification de jour, situation future.

7. Catalogue d'actions pour l'amélioration du climat urbain

L'exposition à la chaleur estivale dans les villes et les agglomérations peut être réduite grâce à un urbanisme qui tient compte la situation climatique locale. Une série de mesures peuvent être prises pour limiter l'effet d'îlot de chaleur (OFEV 2018). Dans le canton de Vaud, la question de l'adaptation au climat joue déjà un rôle important. Ce chapitre est donc consacré aux mesures qui pourraient être prises pour lutter contre le stress dû à la chaleur.

Le plan énergie et climat communal (PECC) comprend des mesures qui aident les communes à s'adapter aux effets des changements climatiques et à renforcer leur résilience face à ses impacts, comme la création d'espaces verts pour atténuer les îlots de chaleur urbains (État de Vaud 2024).

Il existe également un certain nombre d'autres mesures qui contribuent à optimiser le climat urbain. À cet égard, un catalogue de 19 mesures individuelles efficaces sur le plan climatique et écologique a été établi pour le canton de Vaud. Les mesures sont décrites dans [Tableau 14](#) et réparties en différents groupes :

- Le bien-être thermique dans l'espace extérieur
- Amélioration de l'aération
- Réduction de la charge thermique à l'intérieur

L'effet des mesures est décrit de manière qualitative, car, d'une part, on ne dispose que très rarement de données vérifiées pour des études de situations très spécifiques. D'autre part, l'effet dépend fortement de la conception concrète des mesures, de leur emplacement dans la zone urbaine et de la distance verticale et horizontale considérée par rapport à la mesure. En principe, toutes les mesures sont appropriées pour réduire directement ou indirectement le stress thermique de la population et contribuer ainsi à un climat des espaces bâtis sain dans le canton de Vaud – si les mesures sont combinées, les effets positifs des mesures individuelles sur le climat des espaces bâtis se renforcent en général.

Tableau 14 : Catalogue de propositions d'actions d'adaptation au réchauffement climatique et pour l'amélioration du climat urbain pour le canton de Canton Vaud

n°	Mesure	Explication	Effet	Mise en œuvre spatiale
BIEN-ÊTRE THERMIQUE À L'EXTÉRIEUR				
01	Végétalisation des cours intérieures et des arrière-cours	Végétation et désimperméabilisation	<ul style="list-style-type: none"> Réduction de la charge thermique pendant le jour et la nuit Synergies pour la gestion des eaux de pluie et la biodiversité 	Arrière-cours
02	Création d'espaces verts publics dans l'environnement résidentiel et professionnel	Petits parcs et espaces verts aménagés dans le centre-ville, qui offrent également des loisirs	<ul style="list-style-type: none"> Réduction de la charge thermique pendant le jour et la nuit Mise en relation d'espaces verts Synergies pour la gestion des eaux de pluie et la biodiversité 	Petits espaces libres, les grandes arrière-cours (en particulier dans les zones résidentielles soumises à des contraintes thermiques)
03	Concevoir des surfaces dans l'espace extérieur afin d'optimiser le climat	Couleurs claires (surtout pour les toits) et des matériaux de construction qui stockent peu de chaleur	<ul style="list-style-type: none"> Réduction de la charge thermique pendant le jour et la nuit 	Toits (neufs et existants), si nécessaire, rues, chemins, places
04	Désimperméabilisation	Zones de pelouse ou d'imperméabilisation partielle (gravier, grilles à gazon, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> Réduction de la charge thermique pendant le jour et surtout la nuit Synergies pour la gestion des eaux de pluie 	Rues, chemins, places, patios et arrière-cours, jardins de devant, dépôts
05	Préserver et replanter des arbres dans l'espace de la rue	Arbres ou mesures constructives (stores, toiture des arrêts de bus, toiles solaires, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> Réduction de la charge thermique pendant le jour et la nuit 	Rues, chemins, places
06	Végétalisation et ombrage des parkings	Arbres, arbustes ou toitures	<ul style="list-style-type: none"> Réduction de la charge thermique pendant le jour et la nuit Dépôt et filtration des polluants atmosphériques Synergies pour la gestion des eaux de pluie et la biodiversité 	Parkings
07	Développer et optimiser les espaces verts publics	Variété d'espaces verts (prairies ouvertes, arbres, plans d'eau, plantations)	<ul style="list-style-type: none"> Réduction de la charge thermique pendant le jour et la nuit Synergies pour la biodiversité 	Espaces verts et ouverts, rues, chemins, places

08	Protection des parcs, des espaces verts et des forêts existants		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Importance pour le bilan thermique ▪ Fonctions importantes pour la récupération, la biodiversité et la gestion des eaux de pluie 	Espaces verts et ouverts (en particulier dans les zones à forte densité de population)
09	Protéger, étendre et créer des surfaces d'eau ouvertes et mobiles		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fonction climatique urbaine des grandes eaux courantes et stagnantes ▪ Couloirs de ventilation à faible rugosité, par lesquels l'air froid et frais est transporté, en particulier dans des conditions météorologiques allochtones ▪ Pendant les mois d'été et surtout pendant les périodes de chaleur, les cours d'eau ont un effet rafraîchissant sur leur environnement pendant la journée (également les petits cours d'eau, les aires de jeux aquatiques ou les fontaines dans les parcs) ▪ La température près de la surface peut être plus élevée que la température de l'air ambiant la nuit et provoquer un dégagement de chaleur 	Eaux, espaces verts et ouverts
10	Développement de l'infrastructure et des réseaux sociaux	Projets participatifs (ex., gestion de quartier) ou au sein de la population (ex. parrainage de boissons, jardinage urbain)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réduction de la vulnérabilité de la population du quartier au stress thermique 	Quartiers (thermiquement chargés) à forte densité de population
AMÉLIORATION DE L'AÉRATION				
11	Veiller à la position des structures et aux surfaces d'espace ouvert	Disposition des bâtiments parallèlement au flux d'air froid et/ou espaces libres (verts) suffisants entre les bâtiments (aménagement desserré)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Amélioration du flux d'air froid / de la ventilation ▪ Réduction de l'accumulation de chaleur 	Nouvelles constructions, complexes de bâtiments (attention au confort hivernal à l'intérieur)
12	Désimperméabilisation (déconstruction)	Déconstruction des bâtiments réduit la densité et le volume des bâtiments	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réduction de la charge thermique, en particulier la nuit ▪ Amélioration de l'aération ▪ Synergies pour la gestion des eaux de pluie 	Cours intérieures d'îlot (garages, entrepôts, éventuellement friches industrielles et commerciales, installations ferroviaires)

13	Éviter les barrières d'échange (d'air)		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Éviter les obstacles structurels (barrages, bâtiments) ou naturels (groupes d'arbres, mais conserver les arbres et arbustes existants !) perpendiculaires à la direction de l'écoulement dans la zone d'impact de de l'air froid, ou adapter l'orientation du bâtiment et sa densité aux exigences climato-écologiques ▪ Protection du système d'échange d'air 	Espaces verts et ouverts, des zones résidentielles et commerciales bien ventilées, rues, chemins, places
14	Protection et mise en relation des domaines pertinents pour le bilan thermique		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Protection contre la surchauffe excessive et la détérioration de la ventilation ▪ Garder ouverts les grands espaces verts tels que les prairies, les champs, les jardins familiaux et les parcs (centraux et périphériques), qui ont une influence sur le bilan thermique et sont de préférence alimentés en eau et caractérisés par une végétation plate ▪ Petits parcs comme tremplins pour l'air froid ▪ Synergies pour la biodiversité 	Espaces verts et ouverts
RÉDUCTION DE LA CHARGE THERMIQUE À L'INTÉRIEUR				
15	Végétalisation des toits	Végétalisation des toits extensive ou intensive (jusqu'aux jardins et à l'agriculture urbaine sur les toits ; avec une préférence pour les plantes indigènes), toits bleu-vert (plantes poussant dans l'eau)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Amélioration du climat intérieur ▪ Possible amélioration du climat extérieur directement adjacent grâce à une mise en œuvre sur une grande surface et une faible hauteur de toit ▪ Synergies pour la gestion des eaux de pluie, la biodiversité et la protection du climat 	Toits plats, si nécessaire toits plats inclinés
16	Végétalisation des façades	Végétalisation des façades liée au sol ou au système (préférence pour les plantes indigènes ou adaptées aux abeilles)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Amélioration du climat intérieur et du climat extérieur immédiatement adjacent ▪ Synergies pour la lutte contre la pollution de l'air, la biodiversité, le bruit et la protection des bâtiments 	Bâtiments (neufs et existants)

17	Ombfrage des bâtiments par des arbres ou des mesures structurales	Végétalisation des façades, arbres, conception des balcons, mesures structurelles telles que les éléments extérieurs de protection solaire (stores, auvents, etc.), verre ou film réfléchissant de protection solaire, ventilation adéquate des pièces (comportement des résidents)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Effet pendant le jour et la nuit ▪ Amélioration du climat intérieur ▪ Synergies pour la protection du climat 	Bâtiments, en particulier les façades sud et en ce qui concerne les fenêtres et autres surfaces vitrées (bâtiments neufs et existants)
18	Rénovation énergétique en énergie des bâtiments et refroidissement dans le respect du climat	Isolation des bâtiments, augmentation de l'albédo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Avant tout une mesure de protection du climat ▪ Amélioration du climat intérieur pendant la journée 	Bâtiments (existants)
19	Adaptation de la typologie des bâtiments	Optimisation de l'orientation du bâtiment et de l'utilisation des espaces intérieurs, c.-à-d. ne pas exposer au sud les pièces sensibles (ex., chambres à coucher, salles de travail)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Amélioration du climat intérieur (dans les pièces sensibles) 	Bâtiments, en particulier les bâtiments sensibles au climat (principalement les nouvelles constructions)

Bibliographie

- Augter, G. (1997) : Berechnung der Häufigkeiten windschwacher Strahlungsnächte und windschwacher Abkühlungsnächte. Deutscher Wetterdienst, interne Ausarbeitung unveröffentlicht. Zitiert in : SCHLÜNZEN, K. H. et al. (2018) : Stadtklima in Hamburg. In: von Storch H., Meinke I., Claußen M. (eds). Hamburger Klimabericht – Wissen über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Hamburg und Norddeutschland. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-55379-4_3
- BBSR (=Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) (2018) : Handlungsziele für Stadtgrün und deren empirische Evidenz: Indikatoren, Kenn- und Orientierungswerte.
- CH2018 (2018) : CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate, Services, Zurich, 271 pp. ISBN: 978-3-9525031-4-0.
- DFG (1988) : Deutsche Forschungsgemeinschaft: Physikalische Grundlagen des Klimas und Klimamodelle. Abschlussbericht. Bonn.
- DGTL (2023) : Direction générale du territoire et du logement : Plan directeur cantonal 2050. Perspectives pour le territoire. En ligne : <https://www.vd.ch/territoire-et-construction/amenagement-du-territoire/plan-directeur-cantonal>
- DWD (2024a) : Deutscher Wetterdienst: Stadtklima - die städtische Wärmeinsel. En ligne : https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimawirk/stadtpl/projekt_warmeinseln/projekt_waermeinseln_node.html.
- DWD (2024b) : Deutscher Wetterdienst: Unwetterklimatologie: Hitze. Online: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/unwetterklima/hitze/hitze.html>.
- État de Vaud (2024) : Plan énergie et climat communal (PECC). En ligne : <https://www.vd.ch/etat-droit-finances/communes/climat-et-durabilite/plan-energie-et-climat-communal-pecc> .
- Ginzler, C., M. Hobi (2015) : Erstellung eines landesweiten digitalen Oberflächenmodells aus operationellen Stereo-Luftbildern. Geomatik Schweiz (9): 332-335.
- Gross, G. (1992) : Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. Fluid Dynamics Research, 10, S. 483-498.
- Gross, G. (2014) : On the Parametrization of Urban Land Use in Mesoscale Models. Boundary-Layer Meteorol 150 (2), S. 319–326. DOI: 10.1007/s10546-013-9863-5.
- Gross, G. (2019) : On the range of boundary layer model results depending on inaccurate input data. Meteorologische Zeitschrift, 28 (3), S. 225-234. DOI: 10.1127/metz/2019/0952
- Häckel, H. (2012) : Meteorologie. 7., korrigierte Auflage. Stuttgart: Ulmer (UTB Geowissenschaften, Agrarwissenschaften, 1338).
- 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.

- Kuttler, W. (2009) : Klimatologie. Paderborn.
- Malberg, H. (2002) : Meteorologie und Klimatologie- Eine Einführung. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg.
- Matzarakis, A., H. Mayer (1996) : Another kind of environmental stress: Thermal stress. WHO Newsletter No. 18: 7-10.
- Meinshausen M., S. J. Smith, K. Calvin, J. S. Daniel, M. L. T. Kainuma, J-F. Lamarque, K. Matsumoto, S. A. Montzka, S. C. B. Raper, K. Riahi, A. Thomson, G. J. M. Velders & D.P. P. van Vuuren (2011) : The RCP Greenhouse Gas Concentrations and their extension from 1765 to 2500. Climatic Change 109, S. 213-244. DOI : 10.1007/s10584-011-0156-z
- MétéoSuisse (Hrsg., 2013) : Einführung der Normperiode 1981-2010. Fachbericht MeteoSchweiz Nr. 245. M. Begert, C. Frei & M. Abbt.
- MétéoSuisse (2024a) : Klimanormwerte Pully. Normperiode 1991-2020. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/service-und-publicationen/applikationen/ext/climate-climsheet.html>
- MétéoSuisse (2024b) : Area-mean temperatures of Switzerland 1864-2022. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/product/input/climate-data/swissmean/10.18751-Climate-Timeseries-CHTM-swiss.txt>
- MétéoSuisse (2024c) : Zeitliche Entwicklung von Temperatur und Niederschlag. https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klimawandel-schweiz/temperatur-und-niederschlagsentwicklung.html?filters=ths200m0_swiss_jja_1864-trend
- MVI (= Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg) (2012) : Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.
- NCCS (2024) : Atlas web CH2018. Température. Déviation de la période standard 1981-2010. Ct. Vaud. Été. En ligne : https://gate.meteoswiss.ch/mchbrowser/data/barplot-scen/tas/VD/RCP4.5-RCP8.5/JJA/barplot-scen_tas_VD_RCP4.5-RCP8.5_JJA-Fr.pdf
- OFEV (éd., 2018) : Office fédéral de l'environnement : Quand la ville surchauffe. Bases pour un développement urbain adapté aux changements climatiques. En ligne : <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/publications-etudes/publications/quand-la-ville-surchauffe.html>
- OFEV (éd., 2020) : Office fédéral de l'environnement : La qualité de l'air en 2019. Résultats du Réseau national d'observation des polluants atmosphériques (NABEL). En ligne : <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/air/publications-etudes/publications/nabel-luftqualitaet.html>
- Oke, T. R. (1973) : City size and the urban heat island. Atmospheric Environment (1967) 7 (8). S. 769-779. DOI : 10.1016/0004-6981(73)90140-6
- Raasch, S., M. Schröter (2001) : PALM - A large-eddy simulation model performing on massively parallel computers. Meteorologische Zeitschrift 10 (5), S. 363–372. DOI: 10.1127/0941-2948/2001/0010-0363.
- Schönwiese, C.- D. (2008) : Klimatologie. 3. Auflage. Stuttgart.
- Stachowiak (1973) : Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer Verlag.
- VDI (2003) : VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5. Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft.

VDI (2004) : VDI Richtlinie 3787, Blatt 9. Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen.

VDI (2008a) : VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.

VDI (2022) : VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima.

VDI (2015) : VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen.