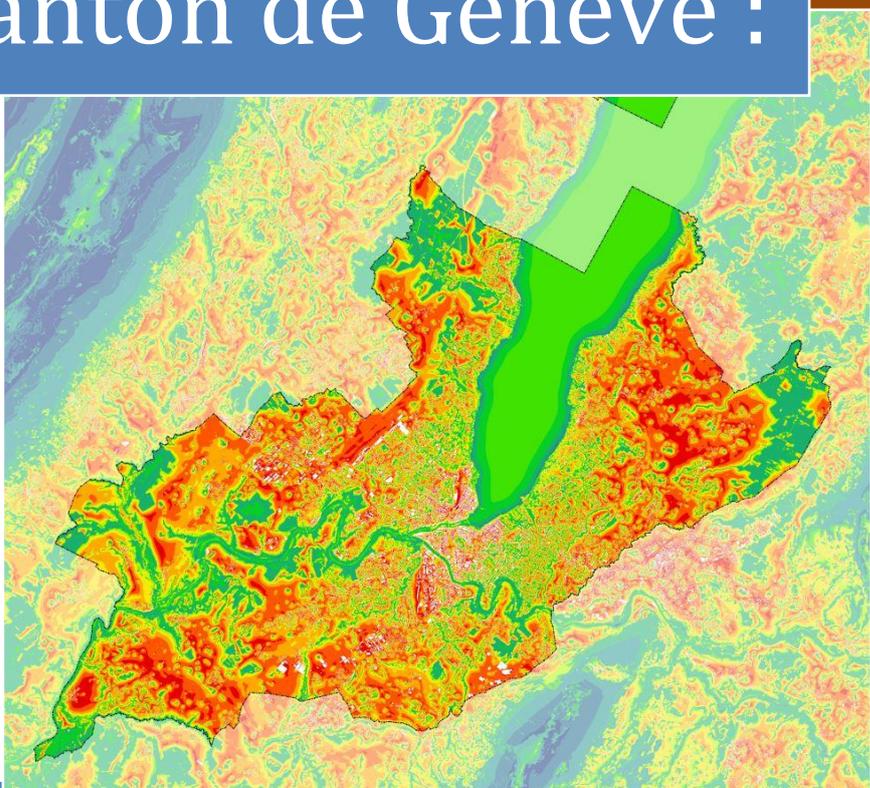


Situation climato-écologique du canton de Genève :



Analyse climatique sur la base d'un modèle

Elaboré par :

GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hanovre



Au nom de la

République et canton de Genève

Département du territoire

Service cantonal du développement durable



Décembre

2020

Mandat : Situation climato-écologique du canton de Genève : Analyse climatique sur la base d'un modèle

Lieu : Canton Genève
Suisse

Mandant : République et canton de Genève
Département du territoire
Service cantonal du développement durable
Rue des Gazomètres 7
Case postale 36 - 1211 Genève 8

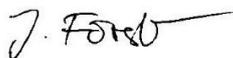
Numéro de projet : 2_19_049

Numéro de rapport : 2_19_049_Genève_analyse_climatique

Version : Finale

Date : Décembre 2020

Élaboré par :



M.Sc. Géographie Josephine Förster

**Traduit en français
par :**



B.Sc. Géographie Sarah Gruner

Évalué par :



Dipl.-Geogr. Peter Trute



GEO-NET
Umweltconsulting GmbH
Geschäftsführer:
Dipl.-Geogr. Thorsten Frey
Dipl.-Geogr. Peter Trute
Große Pfaßstraße 5a
30161 Hannover
Germany
Tel. +49 (0) 511 388 72 00
Fax +49 (0) 511 388 72 01
info@geo-net.de
www.geo-net.de

Amtsgericht Hannover
HRB 61218

Hannoversche Volksbank eG
kto. 532 248 000
blz 251 900 01

BIC VOHADE2H
IBAN DE81 2519 0001
0532 2480 00
VAT DE 228892587



L'analyse du climat urbain a été préparée selon l'état de l'art et au mieux de nos connaissances et convictions. L'analyse du climat urbain reste la propriété exclusive du mandataire jusqu'à l'acceptation et le paiement. La propriété et le droit d'utilisation restent au mandant.



Sommaire

GLOSSAIRE	III
RÉSUMÉ	V
1. INTRODUCTION	1
2. BASES TECHNIQUES	2
2.1 L'effet d'îlot de chaleur	2
2.2 Le climat dans le canton de Genève	4
2.2.1 Évaluation des données météorologiques	5
2.2.2 Études climatiques antérieures	9
2.2.3 Évolution du climat : du passé récent vers le futur	13
3. MÉTHODOLOGIE DE L'ANALYSE CLIMATIQUE BASÉE SUR DES MODÈLES	19
3.1 Le modèle climatique utilisé : Fitnah 3D	19
3.2 Conditions météorologiques et calculs effectués	20
3.3 Données d'entrée	22
4. RÉSULTATS DU MODÈLE	30
4.1 Champ de température nocturne	30
4.2 Champ d'écoulement nocturne de l'air froid	34
4.3 Charge thermique pendant la journée	41
5. CARTE DE L'ANALYSE CLIMATIQUE	45
5.1 Situation actuelle	46
5.2 Situation future	49



6. CARTE INDICATIVE DE PLANIFICATION	50
6.1 Normalisation des paramètres (transformation en Z)	50
6.2 Évaluation des zones résidentielles, industrielles et routières (espace d'action)	51
6.2.1 Évaluation de la situation nocturne	51
6.2.1 Évaluation de la situation de jour	52
6.3 Évaluation des espaces verts et ouverts (espace de compensation)	52
6.3.1 Évaluation des espaces verts la nuit	53
6.3.1 Évaluation des espaces verts le jour	54
6.4 Résultats Cartes indicatives de Planification	55
6.4.1 Situation nocturne	55
6.4.2 Situation diurne	59
7. ÉVALUATION CLIMATO-ÉCOLOGIQUE DES POTENTIELS À BÂTIR	62
7.1 Méthode	62
7.2 Résultats	64
8. CATALOGUE DE MESURES CLIMAT URBAIN	67
BIBLIOGRAPHIE	73
ANNEXE	I



Glossaire

Air froid : Masse d'air dont la température est inférieure à celle de son environnement ou à la limite supérieure de l'inversion de sol correspondante 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 : Décrit les influences directes et indirectes du temps, de l'altération 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 de compensation 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 par lots 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 et de jour dans la zone urbaine et la campagne environnante (processus d'air froid, surchauffe des zones de peuplement).

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 références générales 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 04h00 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 la zone de peuplement, 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 couloirs d'air froid, par exemple. 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 d'action : Zone aménagée ou destinée à l'aménagement (\rightarrow zones de peuplement et espace routier) dans laquelle un stress bioclimatique peut se produire.

Espace de compensation : Espace ouvert vert, relativement peu 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 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 (Urban Heat Island) : L'îlot de chaleur urbain est une caractéristique typique du climat urbain. Elle se caractérise par la différence de température de l'air entre la ville chaude et ses environs plus frais et atteint son maximum pendant la nuit lorsque le temps est sans nuages et qu'il y a peu de vent. La différence peut aller jusqu'à 10 Kelvin dans les grandes villes. La température de l'air dans les villes dépend fortement de la géométrie des bâtiments, des propriétés thermiques du matériau de construction, des propriétés de rayonnement des surfaces et des émissions d'origine humaine, du trafic et de l'industrie (DWD 2020a).

PET (température physiologique équivalente) : Indice bioclimatique humain pour la caractérisation de la charge thermique sur l'homme, qui combine des déclarations sur 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 : Scénarios d'évolution de la concentration des gaz à effet de serre liés au climat dans l'atmosphère. Les scénarios du RCP remplacent les scénarios du SRES, qui étaient basés sur des facteurs socio-économiques, dans le cinquième rapport d'évaluation du « Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat » (GIEC) des Nations unies. 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 (*Representative Concentration Pathway*).

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 de peuplement : Il s'agit de zones à haut degré de construction, c'est-à-dire toutes les zones résidentielles, les zones industrielles et commerciales tout comme les zones mixtes. Avec l'espace routier, la zone de peuplement forme l'espace d'action.

Zone d'impact de l'air froid : Zone d'influence des systèmes d'écoulement locaux dans la zone bâtie. 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.



Résumé

L'effet d'îlot de chaleur entraîne des températures plus élevées et un stress bioclimatique estival plus prononcé dans la zone urbaine. Il se caractérise par la différence de température de l'air entre la ville chaude et ses environs plus frais et atteint son maximum pendant la nuit ainsi que dans des conditions météorologiques de rayonnement à vent faible. Ces situations sont relativement fréquentes en été dans le canton de Genève – dans les mois d'été de juin, juillet et août, environ un tiers des nuits sont de ce type.

Le présent rapport vise à analyser et évaluer la situation climatique estivale du canton de Genève à l'aide de modélisations. Les paramètres climatiques obtenus à partir du modèle sont résumés dans la « carte de l'analyse climatique », tandis que la « carte indicative de planification » contient une évaluation de la situation bioclimatique. Le travail reflète à la fois la situation actuelle et les conditions climatiques futures possibles dans le canton. En perspective du développement futur du canton de Genève, les résultats des scénarios climatiques pour la Suisse (périodes 2020-2049, 2045-2074 et 2070-2099 ou encore appelées « 2035 », « 2060 » et « 2085 ») indiquant des changements saisonniers de température sont importants. De plus, l'occupation future des sols prévue par le référentiel de projet urbain, le plan guide tout comme la base des données Synthurba ne sont pas à négliger. En effet, le climat du canton n'est pas seulement influencé par le changement climatique mais aussi par le développement de la construction, c'est pourquoi une mise à jour de l'analyse est à recommander tous les 5 à 10 ans en fonction de l'évolution structurelle du canton.

La zone d'étude rectangulaire utilisée pour les modélisations s'étend sur une superficie de près de 878,7 km² (32,01 km x 27,45 km), de sorte que les différences d'altitude et d'occupation des sols dans la région environnante qui influencent le climat du canton ont pu être prises en compte. Au total, la zone du modèle est décrite avec 8 786 745 cellules raster, des informations sur la hauteur du terrain, l'occupation des sols, la hauteur des structures et le degré d'imperméabilisation étant stockées pour chaque cellule raster. Le modèle climatique urbain FITNAH 3D selon Groß (1992) forme le cadre de base de la modélisation. Les données d'entrée et les résultats du modèle sont basés sur une résolution spatiale horizontale de 10 m x 10 m.

Les résultats du modèle sont résumés dans des représentations cartographiques sur le champ de température nocturne, le champ d'écoulement nocturne de l'air froid et la charge thermique pendant la journée. Ils sont illustrés à l'aide de la PET (température physiologique équivalente), qui décrit la « température ressentie ».

A 14 heures, la charge thermique du canton est particulièrement élevée, car le rayonnement solaire est très intense à cette heure et, en même temps, les températures de l'air sont élevées. Les secteurs à forte densité d'arbres (par exemple les parcs, les forêts) et les surfaces d'eau sont des zones peu exposées à la chaleur et qui peuvent servir de lieux de retraite pendant la journée. En revanche, les zones exposées au soleil (par exemple les places et les pelouses ouvertes) ont une charge thermique nettement plus élevée.

Alors que le centre urbain atteint des températures équivalentes à celles de la périphérie pendant la journée, l'îlot de chaleur urbain survient la nuit. Pour la zone bâtie dans le canton de Genève, dans des conditions météorologiques de rayonnement à vent faible, la température moyenne est supérieure de 3,1 °C à celle des espaces verts environnants. Dans les zones centrales de la ville, près du lac Léman, l'effet



d'îlot de chaleur atteint 7,7 °C. La nuit, les courants d'air froid, en particulier les vents descendants de la pente et les brises thermiques, contribuent à réduire la charge thermique.

Dans un avenir proche, la dynamique de l'air froid ne changera que légèrement au cours du changement climatique par rapport à la situation actuelle. Les changements locaux dans le champ d'écoulement de l'air froid se produisent principalement à proximité des zones de développement, car les bâtiments nouvellement construits agissent comme des obstacles à l'écoulement et ralentissent ou dévient ainsi les vents. Les effets de canalisation entraînent également une augmentation de la vitesse du vent et du débit d'air froid. En raison du changement climatique, une augmentation moyenne de la température estivale de 1,5 °C (période future 2020-2049), 2,6 °C (période future 2045-2074) et 4,6 °C (période future 2070-2099) est attendue dans le futur par rapport à la période de référence 1981-2010. Dans les zones de développement, où les espaces ouverts sont transformés en zones bâties, la température de l'air augmente le plus fortement par rapport à la situation actuelle. Si la partie verte d'une zone de développement augmente par rapport à la situation actuelle (par exemple, le grand projet du PAV) on peut même supposer une réduction des températures de l'air. De nouvelles plantations d'arbres peuvent également considérablement réduire la « température ressentie » pendant la journée et compenser les effets du changement climatique au moins localement.

Afin d'évaluer l'importance climatique des espaces verts et la charge thermique dans l'espace urbain, la « carte indicative de planification » a été établie séparément pour la situation de jour et de nuit. Afin que la carte puisse servir d'outil de planification pour l'avenir, elle est basée sur les résultats de la période future 2020-2049. En fonction de l'importance ou de la charge d'une zone, des indications générales de planification sont formulées, qui montrent la nécessité des mesures ainsi que la sensibilité à la densification ultérieure ou aux changements d'occupation des sols. L'importance des espaces verts dans le canton diffère considérablement le jour et la nuit : alors que la nuit, les champs et les espaces ouverts de la périphérie sont d'importants fournisseurs d'air froid, les espaces verts du centre-ville sont très importants pendant la journée. En revanche, dans l'espace urbain, les différences entre le jour et la nuit sont moins prononcées qu'en périphérie. Ainsi, les zones très imperméables (centre-ville, zones industrielles et commerciales) sont particulièrement exposées à la chaleur, tant la nuit que le jour.

La carte de l'« Évaluation climato-écologique des potentiels à bâtir » montre 106 zones de développement qui ne sont pas encore incluses dans la carte indicative de planification. Leur réalisation n'est pas encore claire et est évaluée dans cette carte d'un point de vue climato-écologique. Il en résulte que, dans la plupart des cas, une réalisation est justifiable sur le plan climatique et écologique (94,4 % des 594 ha au total, que toutes les zones de développement occupent ensemble), bien que pour certaines zones de développement, des mesures d'optimisation climatique doivent être envisagées.

Finalement, le « catalogue de mesures climat urbain » précise les indications générales de planification et les conseils concernant les potentiels à bâtir, en montrant des exemples et des possibilités d'amélioration de la situation climatique dans le canton. Les mesures sont réparties entre les domaines « Le bien-être thermique dans l'espace extérieur », « l'amélioration de l'aération » et « la réduction de la charge thermiques à l'intérieur ».



1. Introduction

Avec le « Plan Climat Cantonal » (2015 et 2017), le canton de Genève s'est doté d'une stratégie de réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'adaptation au changement climatique. Il fait le point sur la situation actuelle et définit les objectifs généraux et les domaines stratégiques d'intervention. Ce plan énumère entre autres 10 mesures d'adaptation au changement climatique pour la période 2018 - 2022. L'une des mesures d'adaptation consiste à lutter contre les îlots de chaleur urbains.

Dans le contexte du changement climatique déjà en cours, il est essentiel de disposer de bases d'évaluation climatique actualisées et à haute résolution, avec lesquelles les îlots de chaleur actuels et qui subiront un stress thermique encore plus important à mesure que le changement climatique progressera, peuvent être identifiés. Pour une planification directrice cantonale durable et tournée vers l'avenir, il est important de mettre en œuvre le développement actuel, qui restera essentiel dans son ampleur et sa conception pendant plusieurs décennies, de manière à ce qu'il n'y ait pas de dégradation des structures existantes et qu'aucune autre détérioration microclimatique ne se produise. La connaissance du climat local qui prévaut dans un canton et ses relations fonctionnelles climatiques permettent de déduire des mesures de protection et de développement pour améliorer le climat. Ce principe directeur vise à maintenir et à améliorer les conditions bioclimatiques favorables.

Les précédentes études sur le climat dans le canton de Genève ont été principalement basées sur des mesures stationnaires et mobiles (chapitre 2.2.2), mais ne permettent de tirer des conclusions que sur des points précis (ou dans le cas de mesures mobiles, sur une base linéaire). 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 zones bâties 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). Par la suite, 106 périmètres considérés comme potentiels à bâtir sont évalués du point de vue climato-écologique (chapitre 7), ce qui permet au canton d'évaluer certains projets de planification du point de vue du climat en tant que bien à protéger et de les rendre plus durables. Le catalogue des mesures pour le climat urbain (chapitre 8) précise les indications générales de planification. Enfin, les principaux résultats de la présente analyse climatique sont résumés (chapitre 9).

2. Bases techniques

2.1 L'EFFET D'ÎLOT DE CHALEUR

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

La population urbaine est principalement exposée à des niveaux de stress élevés dans des conditions météorologiques de haute pression, qui sont déterminées par une variation quotidienne prononcée du rayonnement, de la température, de l'humidité, du vent et de la couverture nuageuse (conditions météorologiques autochtones). 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'est-à-dire que des masses d'air provenant des environs peuvent s'écouler dans la zone urbaine (Brises thermiques ; Fig. 1).

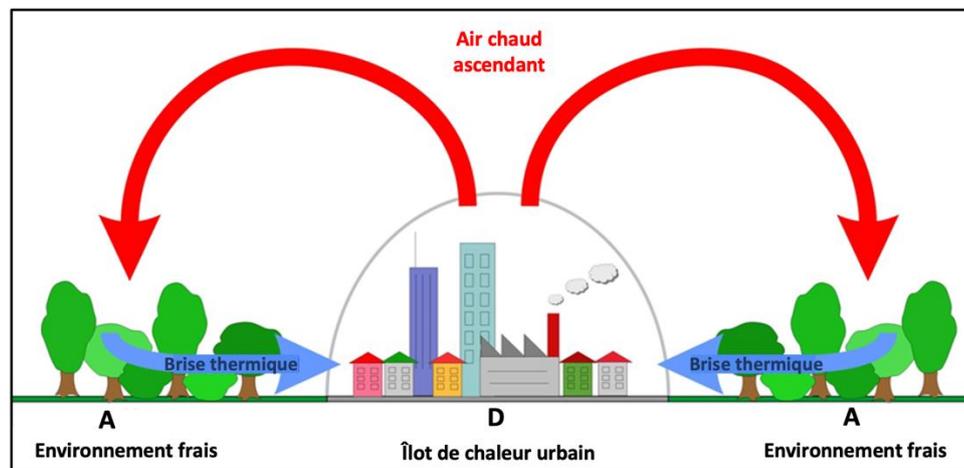


Fig. 1 : Croquis du principe de brise thermique

Pendant la journée, les brises thermiques n'entraînent généralement pas une réduction de la charge thermique dans les zones d'habitation, 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 (et éventuellement du centre-ville) vers la zone urbaine plus chaude et apporter une décharge. L'arrivée de cet « air froid » près du sol se fait à faible vitesse et réagit de manière sensible aux obstacles à l'écoulement, de sorte qu'il ne peut circuler que le long de zones sans

bloquer les bâtiments ou autres obstacles (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 (Fig. 2). En cas de grandes différences d'altitude, des vents supplémentaires de montagne et de vallée se produisent, des différences d'altitude plus 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, comme Genève, cela signifie que les brises thermiques nocturnes avec des vents de pente simultanés sont amplifiées.

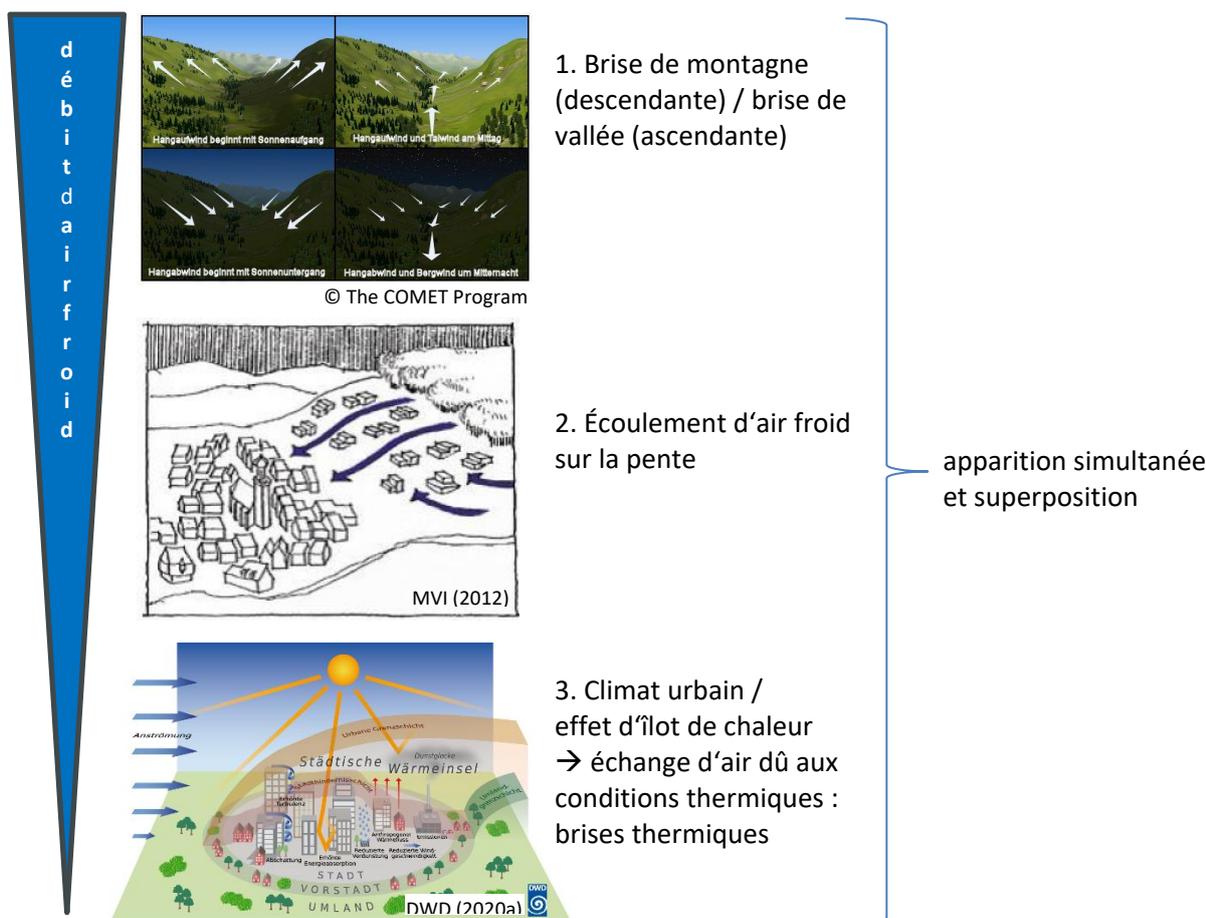


Fig. 2: Les vents dominants dans des conditions à vent faible : L'effet du relief et de l'îlot de chaleur urbain

En plus de la chaleur résiduelle dégagée par l'homme (flux thermique anthropique), le degré élevé d'imperméabilisation provoque un réchauffement de la zone urbaine. Alors que les zones non développées 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

¹ Pendant la nuit, les conditions météorologiques autochtones sont caractérisées par des stratifications stables de la température de l'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.



béton et l'asphalte ont un faible albédo², de sorte que beaucoup de leur rayonnement est absorbé 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 d'imperméabilisation plus élevé ou de la proportion plus faible de verdure (et aussi, généralement, de la moindre disponibilité d'eau), l'évaporation et la capacité de refroidissement associée dans la ville sont réduites³ (Schönwiese 2008).

Le trafic motorisé, les industries et le chauffage domestique ne provoquent pas seulement un flux de chaleur anthropique, mais entraînent également une augmentation des émissions. Ils représentent les sources principales des émissions polluantes, affectant directement la santé des populations. Même si les valeurs moyennes des immissions polluantes ambiantes 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 leur 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. Ces polluants montrent en général une concentration mesurable à proximité immédiate de leur source. En fait ils ne se diluent latéralement que peu : on ne parle de charge élevée que sur quelques dizaines de mètres à proximité d'une route à fort trafic ou d'une cheminée. Dès lors, 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 alors pas suffisant pour améliorer sensiblement la qualité de l'air (Kuttler 2009).

Dans l'objectif d'une gestion adéquate de la qualité de l'air et pour favoriser la mise en œuvre de mesures d'assainissement ciblées, le service de l'air, du bruit et des rayonnements non ionisants (SABRA) du canton de Genève est clairement intéressé par les études touchant le climat urbain. Il lui est notamment utile de connaître avec une certaine précision les mouvements d'air, réels ou potentiels, qui se déploient dans le milieu urbain (ville et agglomération genevoises). Ces connaissances climatiques permettent ainsi de mieux connaître les processus de ventilation des polluants et elles auront un impact sur les mesures à prendre, que ce soit dans les infrastructures ou quartiers existants ou face à des projets d'aménagement planifiés.

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 GENEVE

Selon la définition du Deutscher Wetterdienst (DWD), le climat caractérise l'état moyen de l'atmosphère à un endroit ou une zone donnés et est représenté par les propriétés statistiques globales sur une période de temps 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 actuellement les périodes 1971 - 2000 (DWD 2019) et 1981-2010 (MétéoSuisse 2013) sont souvent utilisées.

² Capacité de réflectivité d'une surface

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

2.2.1 ÉVALUATION DES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

Il existe une seule station de mesure MétéoSuisse dans le canton de Genève. La station se trouve près de l'aéroport de Genève. Elle mesure, entre autres, la vitesse et la direction du vent à 10 m au-dessus du sol, la température de l'air à 2 m au-dessus du sol et la couverture nuageuse en huitièmes.

Tout au long de l'année, les vents les plus fréquents à Genève sont les vents de nord-est et de sud-ouest (voir Fig. 3). Les vents faibles, inférieurs à 1 m/s, viennent le plus souvent de l'ouest (ce qui indique les écoulements sur pente dans des conditions météorologiques à vent faible dans le domaine de la station climatique). S'y opposant, les vents forts (> 8 m/s) viennent surtout du nord-est et la deuxième direction de provenance la plus fréquente est le sud-ouest. En outre, en été, les vents sont généralement plus faibles que pendant les autres saisons.

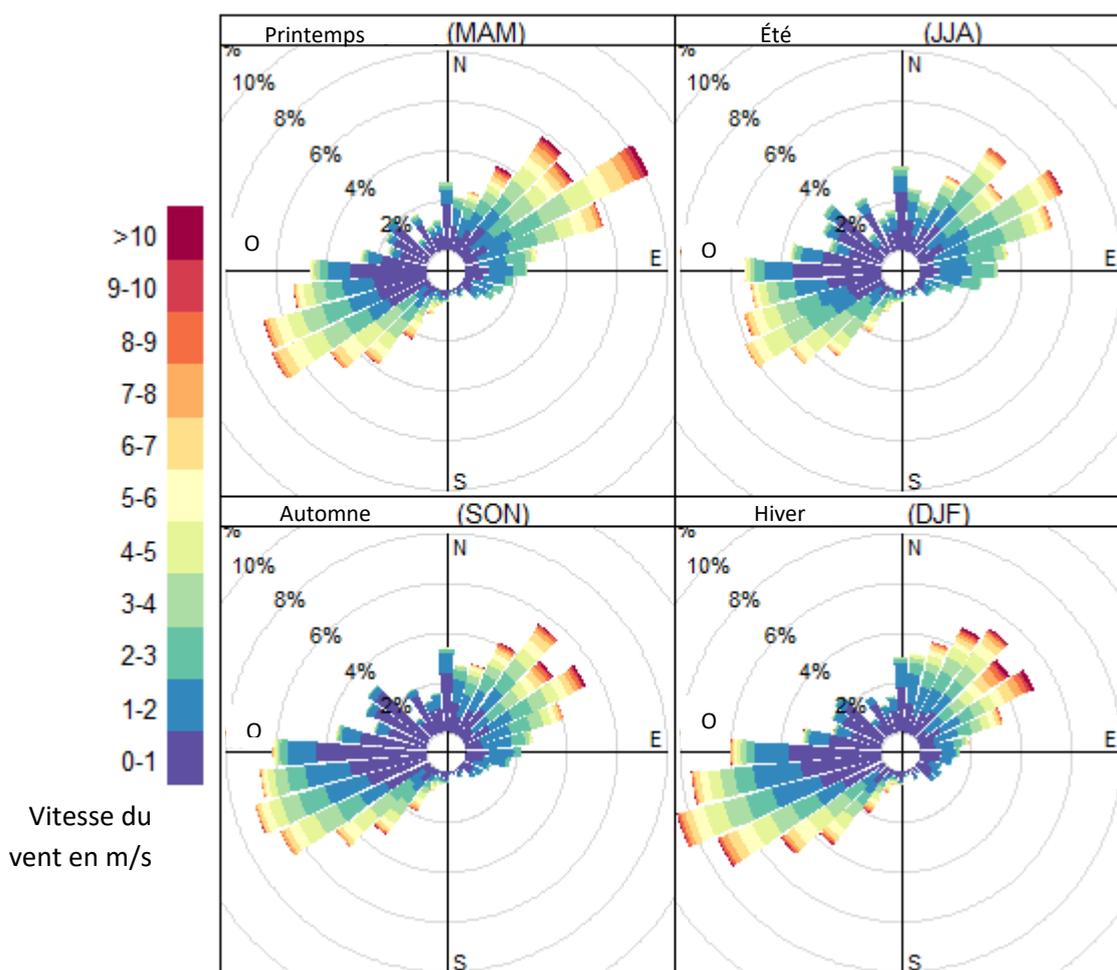


Fig. 3 : Distribution de la direction du vent par saison à la station de Genève Cointrin, données de base : valeurs horaires de la direction et de la vitesse du vent pour la période 1989 - 2019

En ce qui concerne cependant le stress thermique estival, pas toutes les conditions météorologiques (comme indiqué dans Fig. 3) ont d'importance. Seules les conditions météorologiques de rayonnement et les conditions météorologiques à vent faible (= conditions météorologiques autochtones) (cf. chapitre 2.1) sont pertinentes.

En termes simplifiés, *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 DWD (1997) la définition des nuits autochtones décrit le « calcul des fréquences des nuits de 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 couverture nuageuse basse simultanée (degré de couverture ne dépassant pas 4 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 17 heures HNEC et 5 heures HNEC (c'est-à-dire qu'il peut y avoir un écart entre les deux), ou pendant 7 heures consécutives au cours de cette période, c'est-à-dire sans écart. Si le degré de couverture n'est pas donné, une baisse de température d'au moins 0,3 K/h doit avoir eu lieu exactement aux mêmes heures.

A l'aide de cette définition concrète, les situations autochtones peuvent être extraites directement des données climatiques de la station Genève Cointrin et être examinées statistiquement. Il en résulte la rose des vents suivante (Fig. 4) :

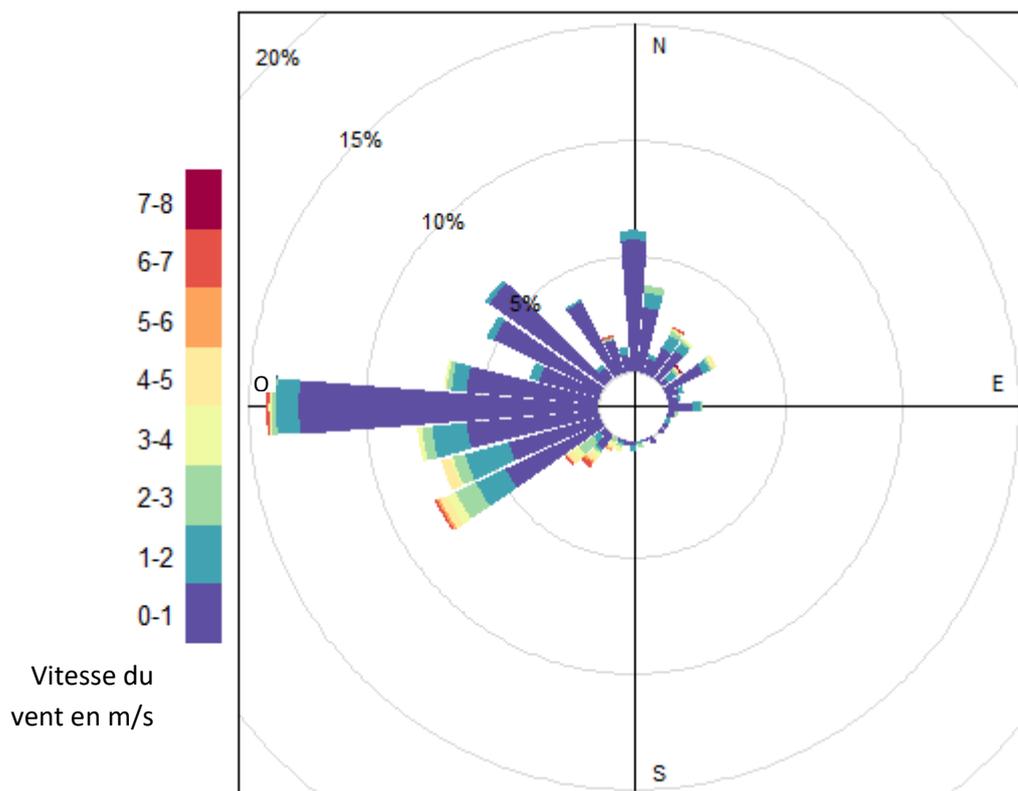


Fig. 4 : Distribution de la direction du vent dans des conditions météorologiques de rayonnement et à vent faible en été à la station de Genève Cointrin, données de base : valeurs horaires de la direction et de la vitesse du vent de toutes les nuits autochtones

Pendant les situations météorologiques de rayonnement et à vent faible estivales, les vents d'ouest sont les plus fréquents à la station Genève Cointrin. De plus, les vents du sud-ouest, du nord-ouest et du nord se produisent fréquemment. Les vents du sud et de l'est par contre sont très rares, puisqu'ils sont principalement causés par le relief (le relief incliné à l'est provoque des écoulements de pente à l'ouest) et les différences de température horizontales. Des rafales de vent courtes et plus fortes, pouvant atteindre 8 m/s, ne se produisent que rarement et brièvement dans des conditions autochtones et constituent une exception. La direction du vent est très spécifique au site, en particulier dans le cas de conditions météorologiques à vent faible; c'est-à-dire que les résultats de la Fig. 4 ne sont valables que pour le site de Genève Cointrin et ne sont en aucun cas représentatifs pour l'ensemble du canton de Genève.

Tout de même, les conditions météorologiques de rayonnement et à vent faible sont relativement fréquentes en été dans le canton de Genève (voir Fig. 5). Pendant les mois d'été de juin, juillet et août,



environ un tiers des nuits à Genève sont autochtones. Le nombre de nuits autochtones augmente pendant l'été.

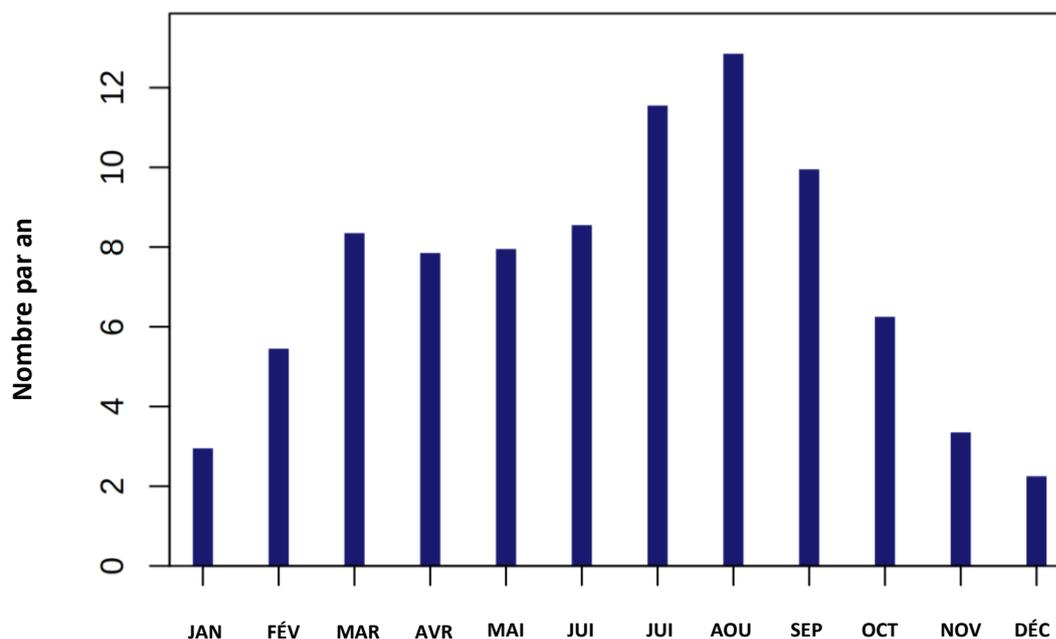


Fig. 5 : Nuits autochtones : Nombre mensuel moyen dans la période 1990 – 2018 (au total 84.2 par an) à la station MétéoSuisse Genève Cointrin

Les conditions météorologiques à vent faible prévalent lorsque seuls des vents légers soufflent, mais les causes du vent doivent également être prises en compte. En plus des vents orographiques (vents conditionnés par le relief) et des brises thermiques, les vents régionaux jouent également un rôle pour les conditions météorologiques à vent faible. Ces vents régionaux sont causés par les conditions naturelles dans la grande région et vont au-delà de la zone d'étude modélisée (voir Fig. 18 au chapitre 3.3). Par conséquent, le système éolien supérieur dans la grande région a été étudié avant que la modélisation climatique réelle du canton ait été réalisée (cf. Fig. 6).

Cela a été effectué sur la base des données NEWA, qui étaient disponibles pour la période 2009 - 2018 et qui ont une résolution spatiale de 3 km x 3 km (NEWA 2019). Tous les jours d'été (juin-juillet-août) avec des conditions autochtones ont été extraits de cet ensemble de données et les vitesses moyennes du vent ainsi que la direction du vent la plus fréquente par cellule de grille ont été calculées. Le résultat montre que (souvent) pendant la nuit, des vents faibles de nord-est se produisent sur le lac Léman et soufflent vers le canton de Genève. Ce processus est plus prononcé à 50 m au-dessus du sol qu'à environ 10 m au-dessus du sol, mais il peut être observé aux deux altitudes. Puisque la zone d'étude est trop petite pour que l'analyse climatique de Genève puisse déterminer ce vent régional dans le modèle⁴, une modélisation avec un forçage externe a été réalisée (cf. chapitre 3.2). Le courant est très faible, mais se produit quand même régulièrement en moyenne, de sorte que ce forçage externe léger correspond davantage à la réalité que si un calcul de modèle était effectué sans forçage externe.

⁴ Le relief et l'occupation des sols en dehors de la zone d'étude influencent les flux entrant et sortant de la zone d'étude ; si ces flux sont inconnus, on suppose, par manque d'informations dans le modèle, qu'il n'y a pas de flux entre la zone d'étude et l'extérieur.

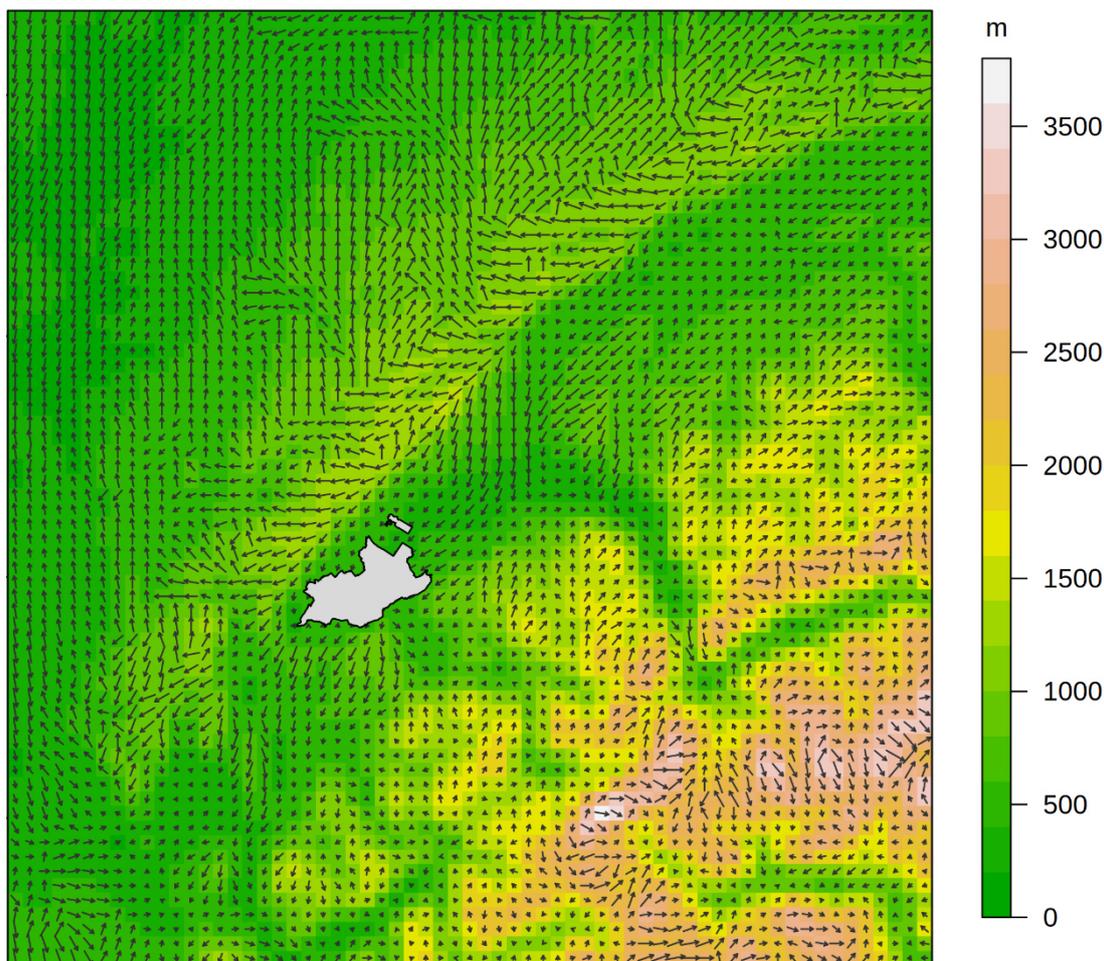


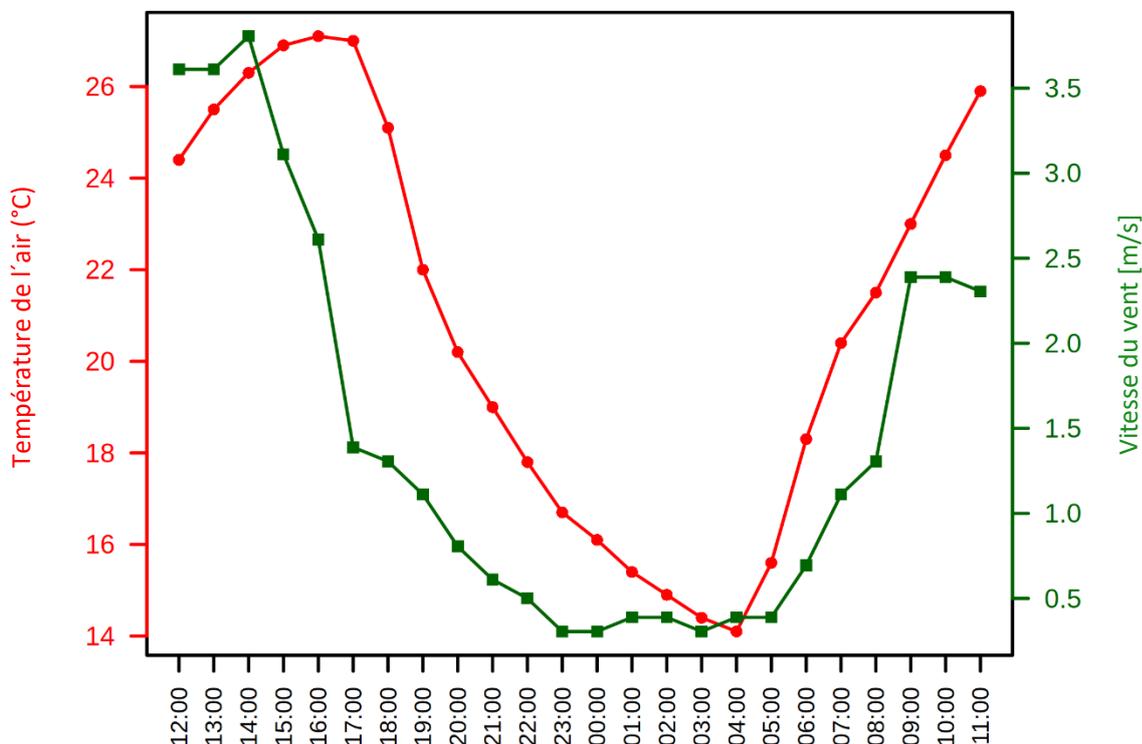
Fig. 6 : Système éolien régional avec conditions météorologiques autochtones en été : situation à 4 heures du matin à 50 m au-dessus du sol (base des données : NEWA 2019, période 2009 - 2018)

Non seulement en ce qui concerne la situation des vents, mais aussi en ce qui concerne la température, un jour d'été moyen a été pris comme base pour la modélisation du climat (Fig. 7). À Genève Cointrin, les températures lors d'une journée d'été moyenne comme les 17 et 18 juillet 2016 varient entre un peu plus de 14 °C (4 heures) et environ 27 °C (16 heures), soit une fourchette de 13 °C⁵. Les jours frais d'été, comme la nuit du 3 juin au 4 juin 2001, la température de l'air peut même chuter à seulement 4 °C environ et rester inférieure à 14 °C pendant la journée. Il arrive cependant que des situations particulièrement stressantes se produisent, dans lesquelles la température nocturne ne descend pas en dessous de 20 °C (nuits tropicales), ce qui est le cas par exemple de la nuit du 4 au 5 juillet 2015 ; avec tout à la fois, pendant la journée, des températures au-dessus de 35 °C. Les trois cycles quotidiens exemplaires montrent les différents niveaux de température qui se produisent dans une situation estivale à Genève. En ce qui concerne les résultats du modèle, qui représentent une journée d'été moyenne, il faut donc tenir compte du fait que des situations nettement plus fraîches ou plus chaudes peuvent également se produire. Cependant, le schéma de température reste le même dans des conditions météorologiques à rayonnement et à faible vent (centre-ville de Genève chaud, espaces ouverts frais dans les environs).

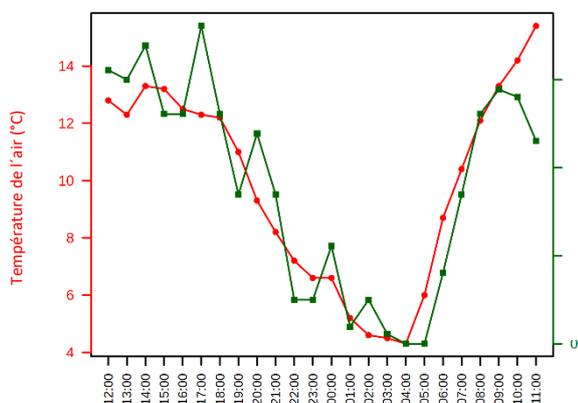
⁵ À titre de comparaison : Les températures de l'air à 2 m au-dessus du sol modélisées dans le cadre de ce travail couvrent une fourchette de 15 °C sur le site de mesure et vont de 15,4 °C à 30,4 °C. La journée d'été modélisée est donc un peu plus chaude que la journée type des 17 et 18 juillet 2016, mais peut toujours être considérée comme une journée d'été moyenne.

Variation quotidienne de la température de l'air et de la vitesse du vent lors d'une journée moyenne d'été

(17 juillet 2016 – 18 juillet 2016)



Variation quotidienne de la température de l'air et de la vitesse du vent lors d'une journée d'été fraîche (3 juin 2001 – 4 juin 2001)



Variation quotidienne de la température de l'air et de la vitesse du vent lors d'une journée d'été chaude (4 juillet 2015 – 5 juillet 2015)

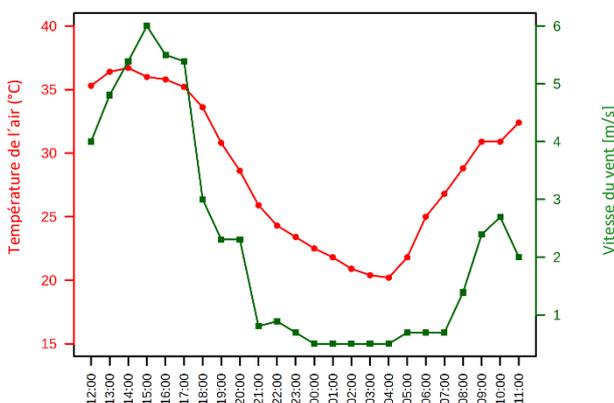


Fig. 7 : Variation quotidienne de la température de l'air et de la vitesse du vent à la station de Genève Cointrin sur une moyenne exemplaire (en haut), journée d'été fraîche (en bas à gauche) et chaude (en bas à droite)

2.2.2 ÉTUDES CLIMATIQUES ANTÉRIEURES

Pour bien pouvoir évaluer les données de base d'un projet et en tirer une modélisation réaliste, il est crucial d'identifier et de connaître les travaux antérieurs effectués sur la zone d'étude tout comme les contenus traités. Par conséquent, certaines études climatiques pertinentes qui ont été et sont réalisées dans le canton de Genève seront présentées dans les paragraphes suivants.

Dans un premier temps, les 4 stations fixes du Réseau d'Observation de la Pollution Atmosphérique à Genève (ROPAG) entretenus par le Service de l'air, du bruit et des rayonnements non ionisants (SABRA) mesurent, outre la concentration des polluants aussi le vent moyen sur le territoire genevois. Bien qu'il ne s'agisse pas de données officielles, elles peuvent donner des indications sur le vent moyen dans le canton. Le réseau regroupe les stations suivantes (voir Fig. 8) : *Necker*, se trouvant dans le centre-ville, donc dans une zone d'urbanisation dense ; *Meyrin*, en périphérie, dans une zone mixte industrielle et d'habitation ; *Foron*, en périphérie, dans une zone à forte densité d'habitations, qui se situe près de la frontière française et qui peut – en fonction du régime des vents – se trouver sous l'influence de l'agglomération d'Annemasse ; *Passeiry*, en campagne, dans une zone à distance de sources d'émissions polluantes importantes et qui peut fournir des informations sur les apports d'émissions de la ville sous régimes de brise.

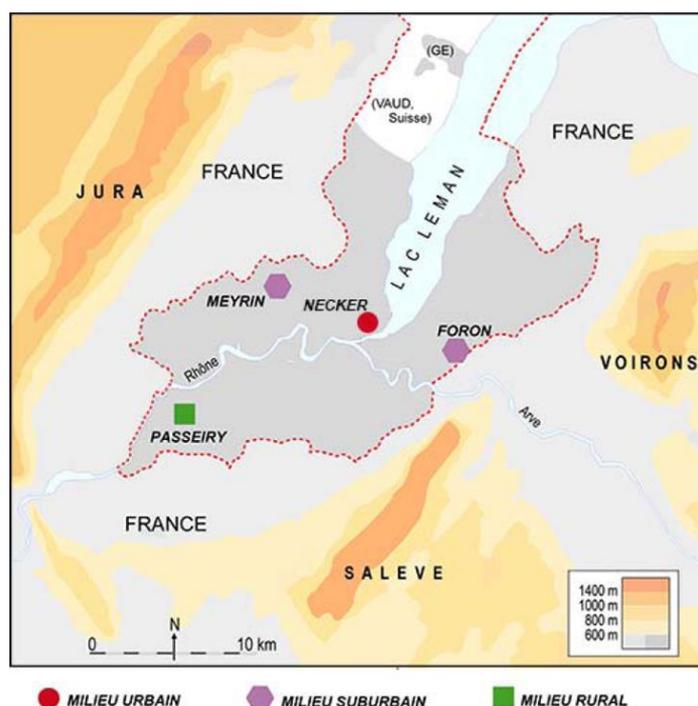


Fig. 8 : Les stations Meyrin, Necker, Foron et Passeiry du Réseau d'Observation de la Pollution Atmosphérique à Genève (SABRA 2019 : 4)

Pour toutes les 4 stations la vitesse et la direction du vent sont recueillies à l'aide d'un anémomètre à ultrasons (SABRA 2019). Même si les données des stations ne sont pas entièrement suffisantes pour la détermination du climat genevois, celles-ci donnent des informations précieuses sur les vents dans le canton de Genève ainsi que leur direction, vitesse et fréquence.

Ensuite, la Société d'Étude de l'Environnement (SEDE), livre des données et études météorologiques sur le bassin genevois. Ainsi, elle fournit des statistiques, comme par exemple des roses de vents pour les 4 stations mentionnées ci-dessus et la station Cointrin, se situant près de l'aéroport de Genève. Ces diagrammes de vent peuvent être créés sur la base d'un laps de temps déterminé comme une ou plusieurs années afin de déterminer par exemple la fréquence de la direction de provenance du vent d'une station. Au surplus, ces statistiques permettent la classification d'épisodes météorologiques ainsi que l'évaluation de fréquences d'occurrence de celles-ci. Les épisodes météorologiques sont répartis en 26 classes, 8 directions de vent et 3 situations générales (cyclonique, anticyclonique, indifférent), basés sur la hauteur



du géopotential à 500 hPa, ce qui résulte dans un regroupement en catégories et épisodes météorologiques (SEDE SA 2017).

Le projet « Clean City » traite du climat urbain avec des mesures de qualité de l'air et de ventilation de quartiers. C'est un projet piloté par la Haute École du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève (HEPIA) sur 3 ans (2012-2014), développé avec d'autres écoles de la Haute École spécialisée de Suisse occidentale (HES-SO), l'école d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg, la Haute école d'Ingénierie et de gestion du canton de Vaud (HEIG-VD) et le service de protection de l'air du bruit et des rayonnements non ionisants (SABRA). Dans ses objectifs, le projet prend en compte l'urbanisation, phénomène mondial, provoquant une densification de la population : « Bâtir une ville c'est ériger un relief et tout relief perturbe le champ des vents » (HEPIA 2020). Cette perturbation engendre dès lors une modification des aspects météorologiques comme la ventilation des rues, dont les effets se concrétisent en termes de chaleur accrue, de pollution de l'air renforcée, avec un impact direct sur la santé humaine. Dans ce contexte, le projet Ra&D « Clean City », financé par la HES-SO et ses écoles, ainsi que des partenaires externes, a permis de fournir aux urbanistes des outils de modélisation pour prédire le climat urbain. Avec l'élaboration d'un modèle numérique 3D d'un quartier de la ville de Genève (les Pâquis), les résultats des simulations ont permis d'évaluer des éléments tels que la dispersion des polluants, la ventilation du quartier et la température de l'air. Ces simulations ont ensuite été confrontées à un test à l'échelle d'une maquette du quartier au 1/500ème, disposée dans une soufflerie avec des émissions témoins de polluants.

De plus, il existe le projet « CityFeel », finalisé en 2017 et développé en coopération avec la HES-SO et l'HEPIA. L'étude a comme but de rendre un aperçu du métabolisme (micro-)climatique urbain. De cette manière, elle vise à faire avancer la protection du climat ainsi que les mesures d'adaptation climatique, notamment dans le domaine de l'aménagement urbain. Le projet a abouti à l'élaboration d'un équipement de surveillance portable applicable à l'intérieur et à l'extérieur, intégré dans un sac à dos, qui mesure la perception humaine de l'environnement immédiat en termes de réaction à l'hygrothermie et à la qualité de l'air. Ce sac à dos peut être porté pendant des « promenades urbaines climatiques » qui peuvent être reproduites à différentes heures et/ou saisons. Ainsi, il est possible de générer des descriptions détaillées et dynamiques du contexte climatique d'une partie d'une ville du point de vue d'un piéton. Cette partie centrale de « CityFeel », appelé « microclimatmètre » a comme objectif de déployer un ensemble de capteurs environnementaux dans un système qui enregistre la température et l'humidité ambiantes, les températures de rayonnement multidirectionnelles, les profils de température verticaux au niveau des piétons, les turbulences thermiques, la vitesse, la direction et les turbulences du vent, le niveau de bruit, la bande sonore et les images hémisphériques (caméra du ciel et du sol). En outre, « CityFeel » permet la localisation dans le temps et l'espace des données mesurées par un récepteur GPS et a été équipé par des capteurs mesurant la qualité de l'air comme le CO₂, les NO_x, l'ozone et les microparticules. Toutes ces données d'entrée permettent de calculer des indicateurs dérivés liés au stress thermique humain extérieur tels que, entre autres, les températures moyennes radiantes et opérationnelles, la PET, l'UTCI (Universal Thermal Climate Index), l'HUMIDEX (Humidity index) et la WBGT (Wet Bulb Globe Temperature).

De plus, les « promenades urbaines climatiques » (voir Fig. 9) permettent de déterminer les endroits avec le moins de stress thermique et de pollution, ce qui peut être utilisé afin d'informer la population ou même d'identifier des stratégies locales d'adaptation et d'atténuation au changement climatique. Les paramètres recueillis démontrent une forte liaison entre les conditions des surfaces urbaines (espace ombragé, près du fleuve, gazon, en plein soleil, etc.) et les paramètres reflétant le confort à l'extérieur tout comme la santé humaine. Ainsi les données d'une seule promenade peuvent être extrapolées pour prédire le comportement thermique de la ville et donner des indications objectives à des questions telles

que : quels sont les meilleurs endroits pour se reposer ou quels sont les moyens les plus confortables et les plus sains de se déplacer d'un endroit à l'autre en fonction de l'heure de la journée.



Fig. 9 : Profil de l'indicateur PET d'une marche climatique au centre de Genève indiquant les points froids et chauds d'un matin d'été et les secteurs (à droite) (Gallinelli et al. 2017 : 395)

L'objectif principal est de récupérer des données de référence quantitatives et qualitatives qui puissent aider et améliorer les politiques de développement d'aménagements urbains dans des applications telles que la planification urbaine, le choix des surfaces urbaines, la conception de la « ville verte » et des utilisations telles que le contrôle du trafic, la prévision de la pollution, l'évaluation de la santé ainsi que la gestion urbaine générale (Gallinelli et al. 2017). Enfin, il convient de noter que l'étude a été réalisée à petite échelle, ne couvrant que certaines rues et certains quartiers de la ville de Genève, ce qui justifie la nécessité d'une étude climatique plus complète à l'échelle urbaine, voire même cantonale.

Finalement, il reste à mentionner le projet « Cool-City », qui a été initié dans le cadre du Plan climat cantonal de Genève et qui est soutenu par la Confédération suisse dans le cadre d'un programme pilote d'adaptation aux changements climatiques. L'étude vise à évaluer l'applicabilité et l'efficacité de différents types de mesures ayant l'objectif d'atténuer les effets d'îlots de chaleur et de préserver les effets d'îlots de fraîcheur. « Cool-City » cible l'élaboration d'une approche d'identification des quartiers d'importance pour la mise en place de mesures d'adaptation, la définition d'un catalogue de pratiques avec une caractérisation tout comme une qualification de leur efficacité en matière de réduction de l'effet des pics de chaleur sur les utilisateurs ainsi que l'identification et la spécification des points d'entrée et de leviers dans les développements décisionnels afin de faciliter la mise en œuvre de mesures d'adaptation (République et canton de Genève, 2019).

Afin de quantifier les températures de surface, des images Landsat 8 sont utilisées en tant que données de base. Les premières analyses regroupent une classification de la couche des îlots de chaleur urbains en classes de 1 °C et une intersection des couches îlots de chaleur urbains et du parcours Universal Thermal Climate Index (UTCI), ce qui résulte dans des représentations telles que des comparaisons spatiales à l'aide de cartes, des boxplots par parcours mettant en relation l'UTCI et les classes îlots de chaleur urbains ainsi que des tendances générales. De prochaines étapes prévoient la prédiction de la classification des couches des îlots de chaleur urbains avec d'autres variables comme par exemple le pourcentage de surfaces imperméables, le pourcentage de canopée et l'irradiation solaire mensuelle pour modéliser et prédire l'UTCI (Fahy et Schlaepfer 2019). Vu que le projet principalement centré sur la zone urbaine est



en cours jusqu'en novembre 2021, une description plus fiable et détaillée n'est pas encore réalisable mais ne va par ailleurs pas à l'encontre d'une étude climatique à l'échelle cantonale.

2.2.3 ÉVOLUTION DU CLIMAT : DU PASSÉ RÉCENT VERS LE FUTUR

Le climat en Suisse, et donc aussi dans le canton de Genève, 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 °C. C'est beaucoup plus que l'augmentation de la température mondiale moyenne de 0,8 °C au cours de la même période. La Fig. 10 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 voir qu'il y a 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 le changement climatique est déjà en cours et peut être observé dans la série de mesures. Depuis les années 1980, les températures ont augmenté de manière significative et sont restées à un niveau élevé.

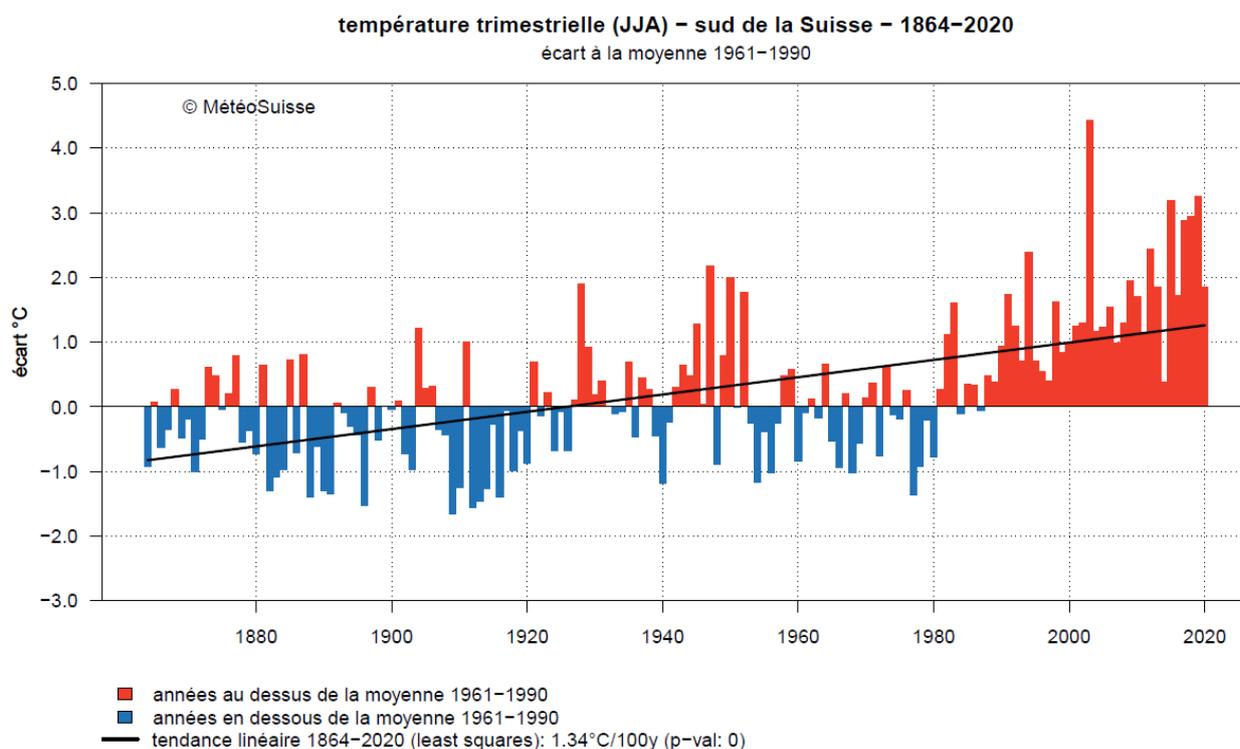


Fig. 10: Évolution des températures estivales dans le sud de la Suisse de 1864 à nos jours par rapport à la période 1961 – 1990 (MétéoSuisse 2020a)

Le bien-être ou le stress d'une population urbaine est moins déterminé par le réchauffement général que par les épisodes de chaleur. Les « jours tropicaux », au cours desquels des températures de 30 °C et plus sont atteints, sont considérés comme particulièrement stressants. Les « nuits tropicales » sont également stressantes pour l'homme et sont présentes si la température minimale ne descend pas en dessous de 20 °C la nuit.

Jours tropicaux [Tmax >= 30°C] (jours)

été (JJA) 1864–2020

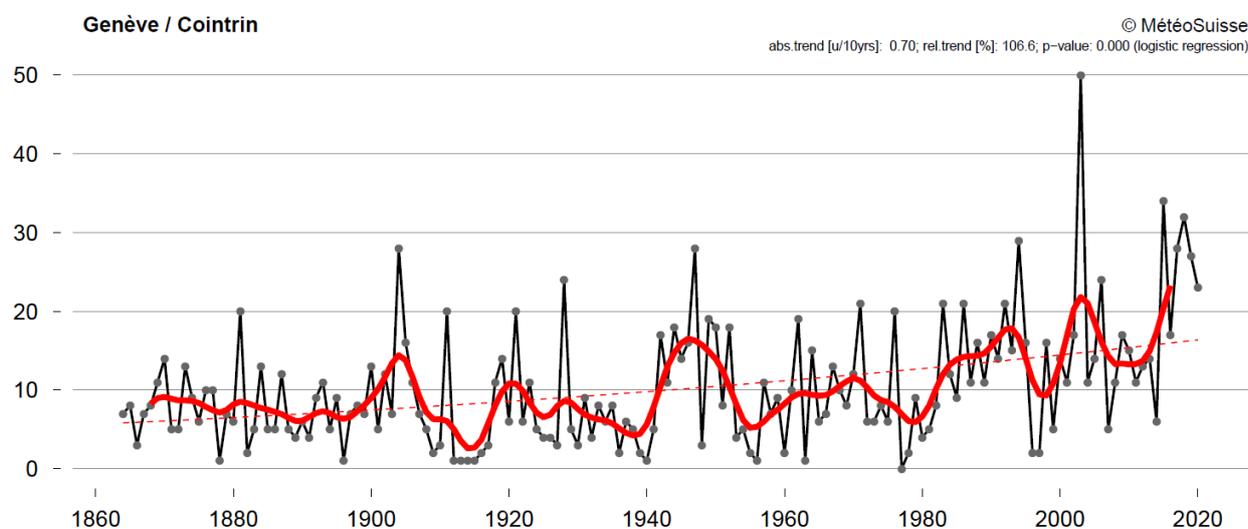


Fig. 11: Développement récent des jours tropicaux à la station de Genève / Cointrin (MétéoSuisse 2020b)

Nuits tropicales [Tmin >= 20°C] (jours)

été (JJA) 1961–2020

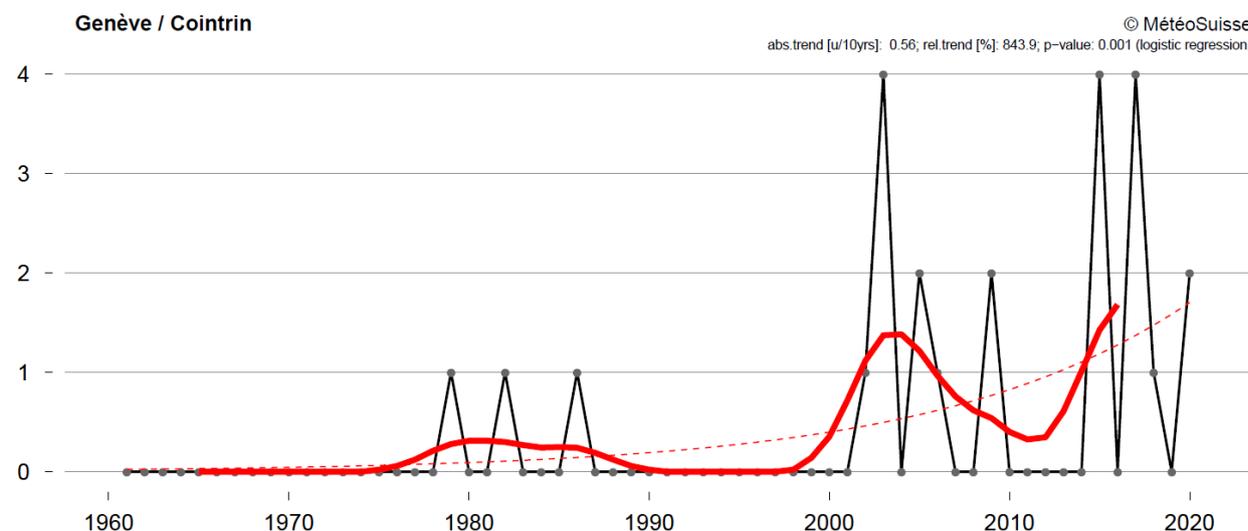


Fig. 12: Développement récent des nuits tropicales à la station Genève / Cointrin (MétéoSuisse 2020b)

En 2003, le plus grand nombre de jours tropicaux, 50 jours, a été enregistré à la station de Genève-Cointrin (Fig. 11). Mais les années 2015 et 2018 se distinguent aussi clairement dans le graphique avec plus de 30 jours tropicaux. Bien que le nombre de jours tropicaux fluctue d'avantage d'une année à l'autre, une tendance à la hausse visible peut être observée dans la période de 1864 à 2020.

Les nuits tropicales sont moins fréquentes à la station de Genève-Cointrin et n'ont été enregistrées qu'au milieu des années 1970 (Fig. 12). Tandis que les nuits tropicales étaient une exception avant le tournant du millénaire, elles sont devenues une caractéristique régulière à partir du 21^{ème} siècle. Dans les années 2003, 2015 et 2017, 4 nuits tropicales ont pour la première fois été observées à Genève-Cointrin. Les graphiques montrent que l'année 2003 a été particulièrement chaude, ce qui peut être démontré par le nombre relativement élevé de nuits et de jours tropicaux.

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 qui généreront un certain forçage radiatif 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 8.5⁶. Les chiffres figurant dans les noms des scénarios représentent le forçage radiatif moyen en W/m² qui sera atteint d'ici l'an 2100 (Fig. 13).

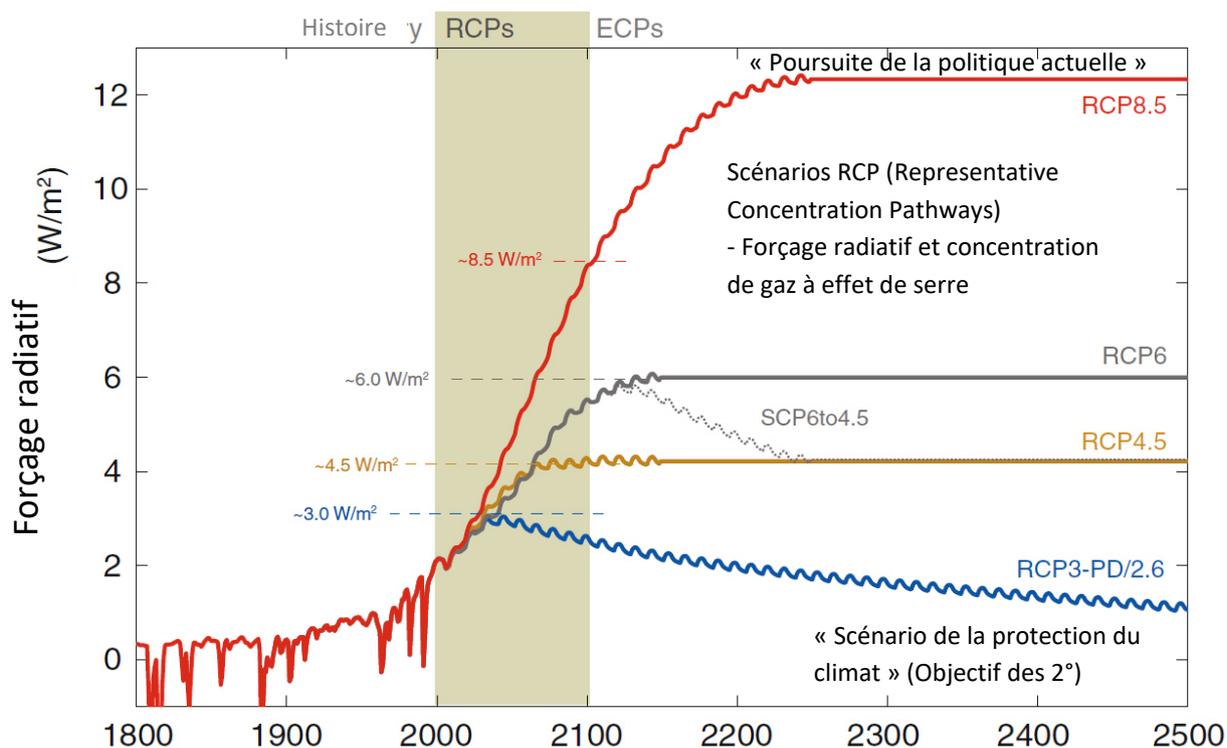


Fig. 13 : Les scénarios climatiques RCP 8.5, RCP 6, RCP 4.5 et RCP 2.6 (Meinshausen et al. 2011, modifié par GEO-NET)

Les scénarios climatiques pour la Suisse (aussi appelé « Données CH2018 ») sont disponibles depuis le 13 novembre 2018. Une collaboration entre le National Centre for Climate Services (NCCS) et le ETH Centre for Climate Systems Modeling (C2SM) a permis de créer les scénarios climatiques CH2018 et de les publier sur la plateforme web du NCCS. L'ensemble de données CH2018 est basée sur les 3 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 cinq régions modèles : Nord-est de la Suisse, Ouest de la Suisse, Sud de la Suisse, Alpes occidentales et Alpes orientales. Le canton de Genève est situé dans la région modèle « Ouest de la Suisse ». Les régions modèles CH2018 divisent la Suisse et certaines régions voisines climatiquement en différentes parties. Elles sont également similaires aux régions utilisées dans CH2011 tout comme dans les produits dérivés et ne diffèrent que lorsque les grilles des modèles climatiques sous-jacents ne correspondent pas. Cela permet une comparaison quantitative entre CH2018 et CH2011. 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'OMM est utilisée comme

⁶ Representative Concentration Pathways (RCP) = scénarios de développement de la concentration des gaz à effet de serre pertinents pour le climat dans l'atmosphère

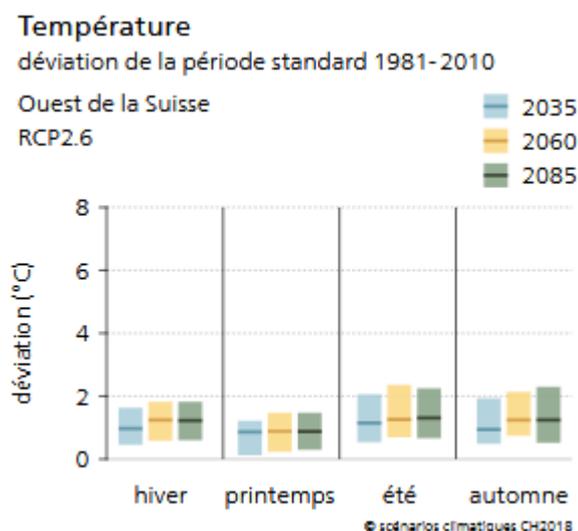


période de référence pour le calcul des changements climatiques futurs. Pour la projection du changement climatique, les trois périodes futures 2020 - 2049, 2045 - 2074 et 2070 – 2099 sont utilisées ; par souci de simplicité, ces périodes sont désignées par l'année centrale correspondante de la fenêtre temporelle (c'est-à-dire 2035, 2060 et 2085 ; CH2018 (2018)).

Dans ce chapitre, les changements saisonniers de température ainsi que le développement des jours tropicaux et des nuits tropicales à Genève dans différentes périodes futures et selon différents scénarios climatiques sont examinés.

CLIMAT FUTUR : CHANGEMENTS SAISONNIERS DE TEMPÉRATURE

La température moyenne dans le canton de Genève et dans tout l'Ouest de la Suisse devrait augmenter au cours du siècle. L'ampleur de l'augmentation de température prévue dépend fortement du scénario de RCP - alors que pour le RCP 8.5 (le pire scénario), les températures estivales moyennes augmentent d'environ 4,6 °C d'ici la fin du siècle, dans le RCP 2.6 (le meilleur scénario), elles ne s'accroissent que de 1,3 °C (Fig. 14).



Ouest de la Suisse : Augmentation de la température en été par période et scénario (estimations moyennes). Déviation de la période standard 1981-2010.

Période	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
2035	+ 1,2 °C	+ 1,3 °C	+ 1,5 °C
2060	+ 1,3 °C	+ 2 °C	+ 2,6 °C
2085	+ 1,3 °C	+ 2,4 °C	+ 4,6 °C

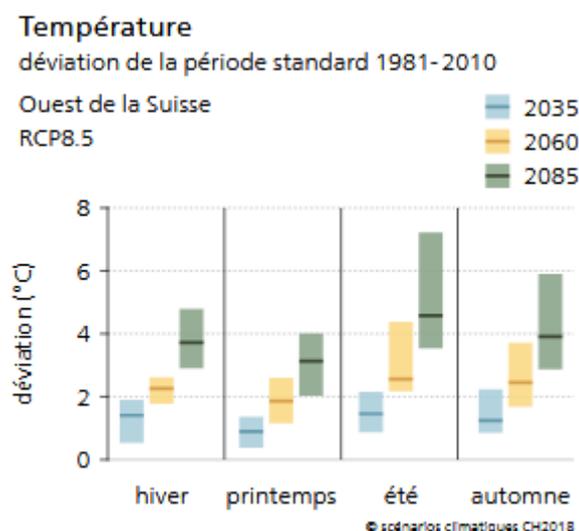
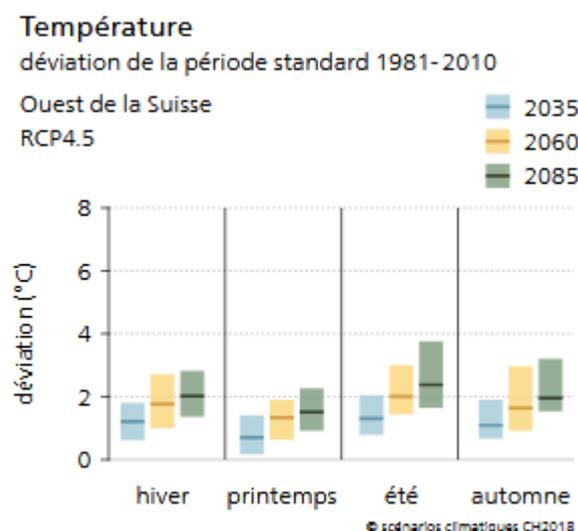


Fig. 14 : Ouest de la Suisse - Variations saisonnières de la température de l'air dans les différents scénarios du RCP et périodes futures (NCCS (eds.) 2018)



Le taux de changement lui-même ne peut cependant être enregistré que de manière approximative : C'est pourquoi le graphique présente une série d'états possibles, les lignes horizontales noires représentant l'estimation moyenne. La hausse des températures dans toutes les saisons est représentée, mais pas de façon égale : pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5 en particulier, on peut constater que la température augmente plus fortement pendant les mois d'été que pendant les autres saisons. En conséquence, la charge thermique en été augmente de manière disproportionnée et est encore intensifiée dans la zone d'habitation de Genève par l'effet d'îlot de chaleur. Les taux de changement de température pour le RCP 2.6 sont constants tout au long de l'année à un niveau relativement bas ; les données ne permettent pas de savoir si les températures estivales augmentent de manière disproportionnée. De même, la température moyenne pour le RCP 2.6 reste à un niveau similaire au cours du siècle. Pour le scénario RCP 8.5, en revanche, il y a de grands sauts de température entre les différentes périodes futures, par exemple dans la situation estivale de + 1,5 °C (période « 2035 »), de + 2,6 °C (période « 2060 ») et de + 4,6 °C (période « 2085 »). Cependant, simultanément, les incertitudes et les fourchettes d'états possibles sont plus importantes pour le scénario RCP 8.5 que pour les deux autres.

CLIMAT FUTUR : DÉVELOPPEMENT DES JOURS TROPICAUX ET DES NUITS TROPICALES

La fréquence et l'intensité des épisodes de chaleur vont continuer à augmenter dans le canton de Genève en raison du changement climatique. La Fig. 15 montre l'évolution future des jours tropicaux dans la zone de la station de Genève Cointrin.

Au cours de la période de référence 1981-2010, une moyenne de 15 jours tropicaux par an a été mesurée à cette station. Dans un avenir proche (période « 2035 »), les 3 scénarios climatiques avec environ 25 à 26 jours de chaleur par an ne diffèrent pas beaucoup. Pour la deuxième période future (« 2060 »), on peut déjà supposer un doublement du nombre de jours tropicaux par rapport à la période de référence ; ici, cependant, il existe également de grandes différences entre les scénarios : 25,7 jours pour le RCP 2.6, 32,9 jours pour le RCP 4.5 et 39,2 jours pour le RCP 8.5. Pour le futur lointain (période « 2085 »), le nombre de jours tropicaux dans les différents scénarios varie encore plus : 24,9 jours pour le RCP 2.6 (légère diminution par rapport aux périodes futures précédentes), 35 jours pour le RCP 4.5 et 59,8 jours pour le RCP 8.5. Les chiffres sont à nouveau la valeur moyenne estimée ; la gamme des états possibles est indiquée dans la figure par une ligne verticale noire.

Les nuits tropicales sont beaucoup plus rares que les jours tropicaux (Fig. 15) à la station Genève Cointrin et constituent actuellement plutôt une exception. Au cours de la période de référence 1981-2010, seules 0,4 nuits tropicales par an ont été mesurées en moyenne. Dans la période future « 2035 », il y aura déjà 2,4 (RCP 2.6), ou 3 (RCP 4.5) et 3,2 (RCP 8.5) nuits tropicales par an. À moyen terme (« 2060 »), ce nombre continuera d'augmenter pour atteindre 2,5 (RCP 2.6), 5,7 (RCP 4.5) et 12,1 (RCP 8.5) nuits tropicales par an. Le nombre de nuits tropicales vers la fin du siècle (période « 2085 ») est soumis aux plus grandes incertitudes : on peut supposer 2,5 (RCP 2.6), 7,1 (RCP 4.5) et 22,2 (RCP 8.5) nuits tropicales par an. En ce qui concerne le nombre de nuits tropicales et de jours tropicaux, il convient de noter que la station de mesure de Genève Cointrin est située à la périphérie de la ville, mais que la charge thermique au centre-ville de Genève est généralement encore plus élevée (surtout la nuit, de sorte qu'on peut s'attendre à un nombre nettement plus élevé de nuits tropicales, surtout en ville).

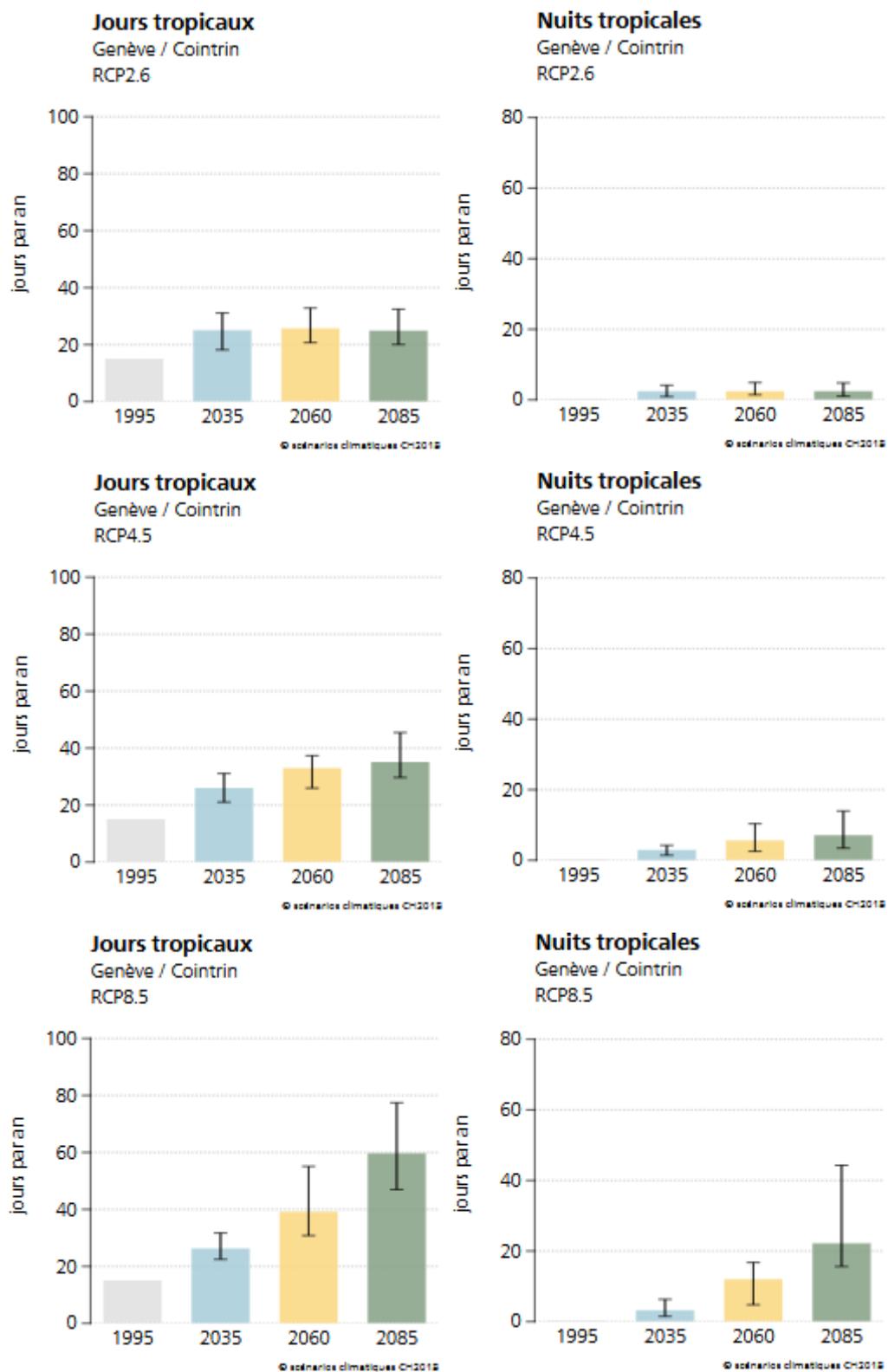


Fig. 15 : Évolution future des jours tropicaux (à gauche) et des nuits tropicales (à droite) à la station de Genève Cointrin (NCCS (eds.) 2018)



3. Méthodologie de l'analyse climatique basée sur des modèles

3.1 LE MODELE CLIMATIQUE UTILISÉ : FITNAH 3D

En pratique, les questions de météorologie environnementale se posent généralement à l'échelle d'une ville ou d'une région. 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, par exemple, 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 (par exemple la canalisation, le flux autour d'eux) ou l'effet des mesures d'ombrage représentent 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 la transférabilité spatiale 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 champs météorologiques, les mesures ne sont représentatives qu'en certains points et un transfert (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'est-à-dire 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 Deutschen Forschungsgemeinschaft, une série de modèles à l'échelle méso et micro ont été conçus et réalisés 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 très similaires. Le cadre de base est constitué des équations de conservation du mouvement (*Équations de Navier-Stokes*), de la préservation de la masse (*Équation de continuité*) et de l'économie de l'énergie (*Premier principe de la thermodynamique*). Pour des informations plus détaillées sur FITNAH 3D, veuillez-vous référer à Groß (1992).

Les modèles méso-échelle tels que FITNAH 3D peuvent donc être utilisés pour bien mieux répondre aux questions de climatologie urbaine que les valeurs obtenues uniquement à partir de campagnes de mesures. 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 de vent et de température dans leur structure de remplissage de l'espace. En outre, les calculs du modèle offrent l'avantage de pouvoir étudier l'effet et l'efficacité des variantes de planification et des mesures de compensation et ainsi de trouver des solutions optimisées.

La solution des systèmes d'équations se fait dans une grille numérique. La largeur de la grille doit être choisie de manière à ce que les caractéristiques climatiques locales de la zone d'enquête puissent être saisies par le modèle correspondant. Plus la grille est fine, plus les détails et les structures ont une bonne résolution. Cependant, plus l'écart entre les grilles est fin, plus les exigences en matière de temps de calcul

et de données d'entrée sont élevées. Un compromis entre nécessité et faisabilité doit être trouvé ici. Dans la présente étude, le maillage spatial horizontal utilisé pour la modélisation avec FITNAH 3D est de 10 m. En revanche, la largeur de maille verticale n'est pas équidistante et est particulièrement dense dans l'atmosphère près du sol afin de saisir de manière réaliste la forte variation des variables météorologiques. Ainsi, les zones de calcul les plus basses sont situées à des hauteurs de 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 40, 70 et 100 m au-dessus du sol. Vers les plus hautes altitudes, la distance augmente et la limite supérieure du modèle se situe à une altitude de 3000 m. À cette altitude, on suppose que les perturbations causées au sol par l'orographie et l'utilisation des sols se sont atténuées.

3.2 CONDITIONS METEOROLOGIQUES ET CALCULS EFFECTUES

L'analyse climatique est basée sur un jour d'été autochtone comme cadre météorologique pour le calcul du modèle (Fig. 16). Cette journée est caractérisée par un ciel sans nuage et un vent synoptique qui ne se superpose que très faiblement, de sorte que les caractéristiques climatiques locales d'une ville ou d'une région sont particulièrement prononcées. La caractéristique d'une telle situation météorologique (haute pression) est la formation de brises thermiques, c'est-à-dire de courants d'égalisation entraînés par la différence de température entre les espaces ouverts plus froids et les zones d'habitation plus chaudes.

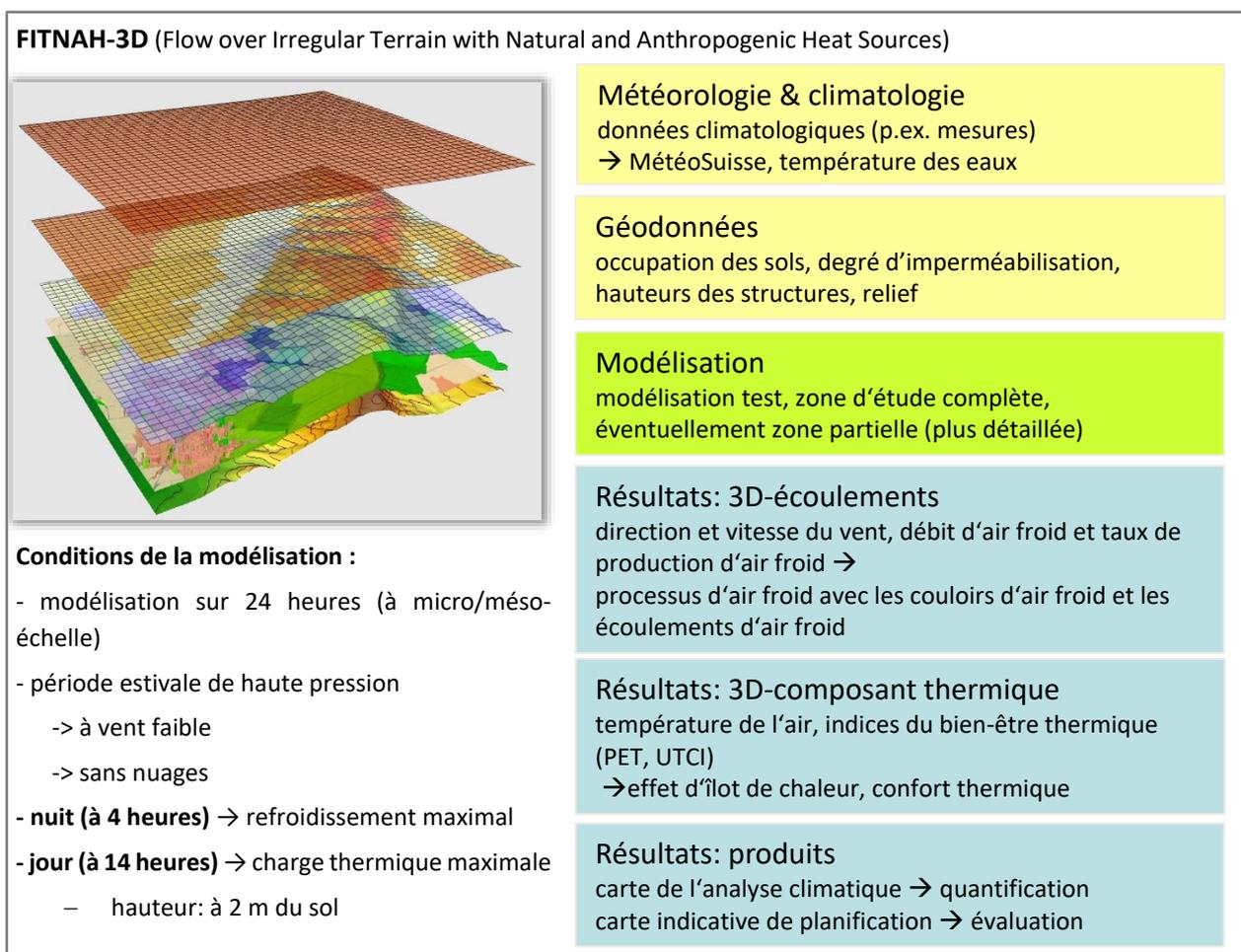


Fig. 16: Méthode FITNAH-3D: Conditions météorologiques, données, modélisation et résultats

La Fig. 17 montre schématiquement les changements diurnes de température et les profils verticaux de la vitesse du vent à midi pour les occupations des sols à espace ouvert, des villes et des forêts, simulés pour une situation météorologique estivale à faible échange. Le profil de température montre que les

espaces ouverts non imperméables tels que les prairies et les zones bâties peuvent avoir des températures élevées similaires à midi, tandis que le refroidissement nocturne des zones bâties est nettement plus faible (effet d'îlot de chaleur). Les zones boisées sont d'intensité moyenne, car le refroidissement nocturne est amorti par la canopée. En ce qui concerne la vitesse du vent, l'effet d'obstruction des bâtiments et des structures végétales est clairement visible dans le profil vertical.

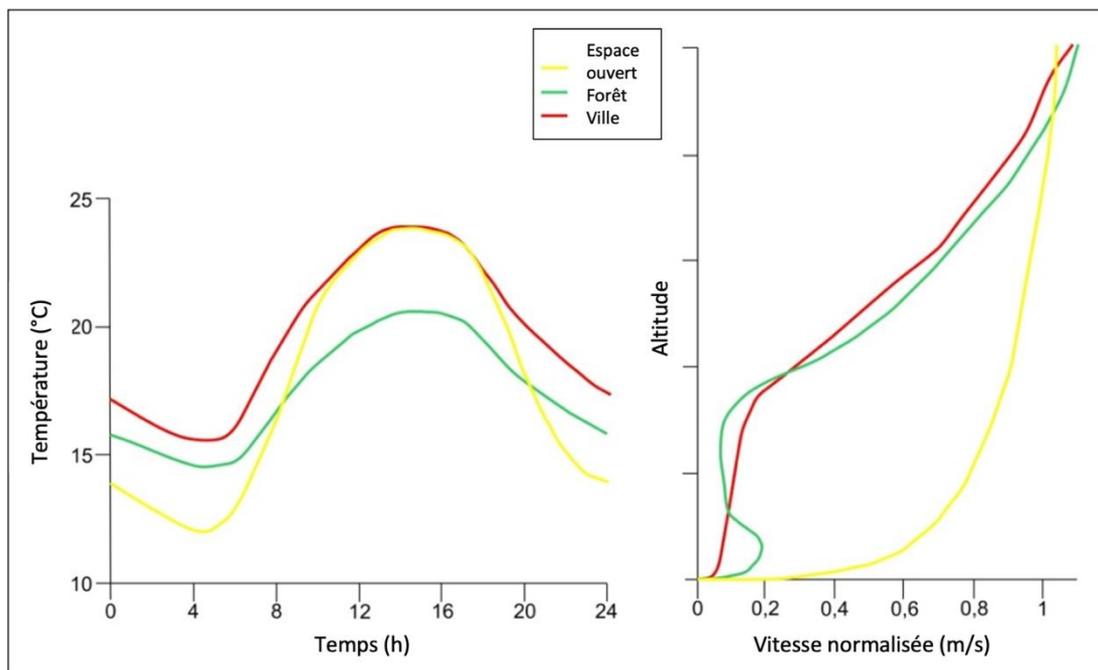


Fig. 17 : Représentation schématique de la variation diurne de la température de l'air et profil vertical de la vitesse du vent à midi de différentes utilisations des terres (propre représentation selon Groß 1992)

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 Genève, dans environ un tiers des nuits d'été, cf. chapitre 2.2.1).

L'étude climatique régionale préliminaire réalisée dans le cadre de ce travail (évaluation des données de la NEWA, cf. chapitre 2.2.1) a montré que les vents du nord-est sur le lac Léman se produisent la nuit dans des conditions météorologiques à vent faible, ce qui influence les schémas d'écoulement du canton. Les vents de nord-est qui se produisent régulièrement ont été pris en compte dans la simulation climatique en effectuant une modélisation avec propulsion. Le flux de propulsion en provenance du nord-est est de 0,2 m/s à une hauteur de 10 m. Comme ce débit est relativement faible, on peut parler d'une situation météorologique de rayonnement à vent faible malgré la propulsion. En outre, on considère la situation du 21 juin (solstice d'été) avec une couverture nuageuse de 0/8 et une humidité du sol de 60 %. La période de modélisation s'étend de 21 heures au lendemain à 14 heures, bien que seules les heures de 4 heures et de 14 heures soient décrites dans l'évaluation ultérieure (chapitre 4). La température de départ de la modélisation est (pour la situation actuelle) de 21 °C à une hauteur de 2 m du sol.

Cependant, le climat du canton de Genève a été examiné non seulement dans sa situation actuelle mais aussi dans la perspective de son développement futur. Au total, cinq modélisations distinctes ont été réalisées et cinq états différents ont donc été pris en compte (Tab. 1). Les augmentations de température supposées pour les périodes futures se réfèrent aux résultats des scénarios climatiques pour la Suisse



(CH2018). Les hausses de température correspondent au signal de changement estival moyen du scénario RCP 8.5 pour l'Ouest de la Suisse (voir Fig. 14 du chapitre 2.2.3).

Tab. 1 : Aperçu des états modélisés pour le canton de Genève

Période	Augmentation de la température par rapport à la situation actuelle (RCP 8.5)	Augmentation de la température de l'eau par rapport à la situation actuelle	Occupation des sols / Scénario de développement
1981-2010 « 1995 »	-	-	Situation actuelle
2020-2049 « 2035 »	+ 1,5 °C	+ 0,75 °C	Deux situations : (A) Occupation des sols avec les projets qui devraient être réalisés d'ici 2035 (B) Occupation des sols, y compris tous les projets de planification dans le canton (développements à court et à long terme)
2045-2074 « 2060 »	+ 2,6 °C	+ 1,3 °C	(A) Occupation des sols avec les projets qui devraient être réalisés d'ici 2035
2070 – 2099 « 2085 »	+ 4,6 °C	+ 2,3 °C	(A) Occupation des sols avec les projets qui devraient être réalisés d'ici 2035

Le climat de l'avenir sera influencé non seulement par le changement climatique, mais aussi par l'occupation des sols future dans le canton. L'occupation des sols future dans le canton de Genève a été décrite sur la base de deux états de développement différents. D'une part, tous les développements à court et moyen terme susceptibles d'avoir lieu jusqu'en 2035 sont pris en compte (scénario de développement A). Dans une phase ultérieure de planification, tous les projets à long terme sont également inclus (scénario de développement B), dont la plupart n'ont pas encore été approuvés et représentent un potentiel de développement possible. Comme leur mise en œuvre n'est pas encore claire, une seule modélisation inclut le scénario de développement B. Cette modélisation sert de base à l'évaluation climato-écologique des potentiels à bâtir (cf. chapitre 7). Les trois différents états d'occupation des sols dans le canton (situation actuelle, situation avec les développements à court et moyen terme, situation avec les développements à long terme) sont indiqués dans les cartes du chapitre suivant. En fonction de l'évolution structurelle du canton, une mise à jour de l'analyse climatique devrait avoir lieu tous les 5 à 10 ans.

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 cellule matricielle, les données suivantes, fournies par le canton de Genève ou largement accessibles en ligne⁷, doivent être disponibles :

⁷ voir www.sitg.ch



- Altitude du terrain
 - plusieurs modèles numériques de terrain (MNT) :
 - ↳ MNA_TERRAIN_2017.tif (février 2017, pour le canton)
 - ↳ MNA_TERRAIN_AGGLO_2014.gdb (2014, pour la zone hors canton)
 - ↳ MNT25.tif (pour le reste)
- Occupation des sols
 - ↳ CAD_NATURE_SOL.shp (mars 2019)
 - ↳ CAD_DOMAINE_ROUTIER.shp (avril 2019)
 - ↳ CAD_BATIMENT_HORSOL.shp (août 2019)
 - ↳ SIPV_EV_TOIT_VERT.shp (2019)
 - ↳ SIPV_MN_CARTO_5.shp (mars 2019)
 - ↳ CAD_OBJETDIVERS_POLY.shp (2019)
 - ↳ TERRAINS_SPORT_GE_NON_PLAN_SITG.shp (2019)
 - ↳ SIPV_ICA_ARBRE_ISOLE.shp (mars 2019)
 - ↳ Vegetation Height Model NFI⁸ (2016)
 - ↳ orthophotos en RVB (juillet 2018)
 - ↳ CAD_COUVERTURE_SOL_BASSE_AGGLO.shp (pour la zone hors canton)
- Hauteur des structures
 - ↳ MNA_HAUTER_2017.tif (2017, pour le canton)
 - ↳ obstacle_bruit_GE.shp (murs antibruit, 2019)
 - ↳ Pour la zone hors canton : Paramètres de hauteur des structures en fonction de l'occupation des sols
- Degré d'imperméabilisation
 - ↳ Paramètres en fonction de l'occupation des sols
- Température de l'eau
 - ↳ Lac Léman (Moyenne estivale 2017)⁹ ~ 20,4 °C
 - ↳ Arve (Moyenne estivale 2017)¹⁰ ~ 12,2 °C
 - ↳ Rhône, avant la confluence avec l'Arve (Moyenne estivale 2017)¹¹ ~ 20,5 °C
 - ↳ Rhône, après la confluence avec l'Arve (Moyenne estivale 2017)¹² ~ 18,8 °C
 - ↳ Eaux restantes : ~ 20 °C (en substitut pour 2017 / situation actuelle)

L'analyse climatique reproduit l'état du canton à un moment donné et est statique, c'est-à-dire que les effets des futurs changements d'occupation des sols doivent être examinés séparément. En ce qui concerne l'occupation des sols, deux autres états ont été pris en considération en plus de la situation actuelle (cf. Tab. 1 au chapitre 3.2). Dans le premier, tous les développements à court et moyen terme qui devraient avoir lieu jusqu'à l'année 2035 sont pris en compte. Dans le second, les projets à plus long terme, dont la réalisation n'est pas encore claire, sont également pris en compte. Les réserves de potentiels à bâtir à long terme ne sont pas des développements validés dans les planifications en cours. Ils sont indiquées à titre indicatif et seront précisées et confirmés lors des planifications ultérieures. La base de données pour l'occupation des sols future est fournie par le référentiel de projet urbain, le plan guide et la base de données Synthurba¹³. Bien que les données de Synthurba soient moins précises, elles peuvent

⁸ voir <https://www.envidat.ch/dataset/vegetation-height-model-nfi>

⁹ Base de données : <http://meteolakes.ch/#/hydro/geneva>

¹⁰ Base de données : <https://www.hydrodaten.admin.ch/fr/2170.html>

¹¹ Base de données : <https://www.hydrodaten.admin.ch/fr/2606.html>

¹² Base de données : <https://www.hydrodaten.admin.ch/fr/2174.html>

¹³ Le transfert de ces trois ensembles de données a eu lieu en mars 2020, ce qui représente l'état des données le plus récent au moment du traitement.



toujours être intégrées dans le plan d'occupation des sols du futur. En raison de la base de données moins précise, les surfaces de Synthurba fournissent toutefois des informations climatiques moins précises, entre autres parce qu'il manquait des informations sur les arbres futurs (nombre, taille, hauteur) et les structures des bâtiments (taille, nombre, hauteur des bâtiments, disposition). Pour certains bâtiments futurs, la hauteur des bâtiments n'a pas été donnée ; dans ce cas, la zone à bâtir (par exemple, la zone de développement 3) a été définie et le gabarit maximum autorisé selon la loi sur les constructions et installations diverses (LCI) a été supposé.

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. Bien que les données d'entrée pour la zone autour de Genève soient moins détaillées, elles sont généralement suffisantes pour donner une image suffisamment précise du processus entre Genève et les villes voisines. Le territoire cantonal couvre une superficie de 282,5 km² avec une extension allant jusqu'à 27,5 km dans le sens est-ouest et 20,7 km dans le sens nord-sud¹⁴. La zone d'étude rectangulaire utilisée pour la modélisation s'étend sur une superficie de près de 878,7 km² (32,01 km x 27,45 km), de sorte que les différences d'altitude et d'occupation des sols dans la région environnante qui influencent le climat urbain de Genève peuvent être prises en compte. Au total, la zone du modèle est décrite avec 8 786 745 cellules raster, des informations sur la hauteur du terrain, l'occupation des sols, la hauteur des structures et le degré d'imperméabilisation étant stockés pour chaque cellule raster.

La hauteur du terrain de la zone modélisée est représentée dans un modèle numérique de terrain (MNT), dont la moyenne a été calculée à partir d'une résolution initiale de 0,5 m dans le canton de Genève jusqu'à la résolution de grille de 10 m nécessaire à la modélisation (Fig. 18). Le paysage dans le canton de Genève est vallonné avec des différences d'altitude allant jusqu'à 188 mètres. Le point le plus bas, à 330 m au-dessus du niveau de la mer, est situé près du Rhône, dans la commune de Chancy. Le point le plus élevé (518 m au-dessus du niveau de la mer) est marqué par la borne n° 141 aux Arales, près du hameau de La Monniaz, dans la municipalité de Jussy. Le canton est situé dans la cuvette genevoise entre les quatre plus hauts sommets de la chaîne du Jura et les montagnes françaises Vuache, Salève et Voirons. Dans toute la zone d'étude rectangulaire, on observe des différences d'altitude de près de 1400 mètres. Le Crêt de la Neige, le plus haut sommet de tout le Jura, est le point culminant de la zone d'étude, à 1720 m au-dessus du niveau de la mer.

L'occupation des sols à Genève est définie par 12 classes d'occupation des sols différentes (Fig. 19 en miniature, Fig. A 1 en annexe au format A0), chacune ayant des caractéristiques physiques différentes. 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. Grâce à la cartographie des toits verts, il a été possible de distinguer les bâtiments normaux des bâtiments à toits verts. Pour les arbres ou la haute végétation de plus de 2,5 m, on distingue trois sous-sols différents. Ainsi, les arbres se différencient par leur imperméabilité :

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

¹⁴ Extension nord-sud sans Céligny

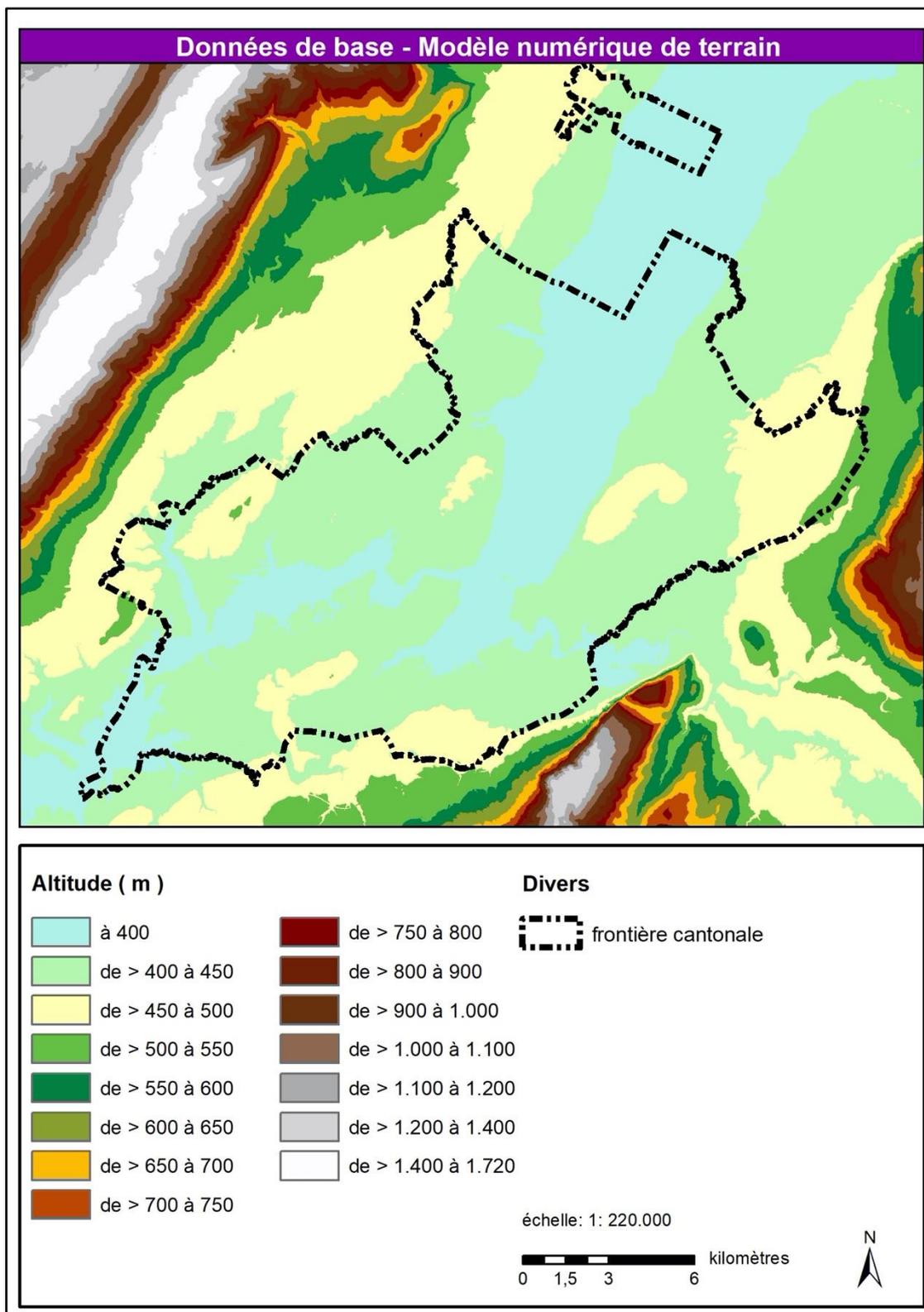


Fig. 18 : Représentation de la hauteur du terrain pour la zone d'étude

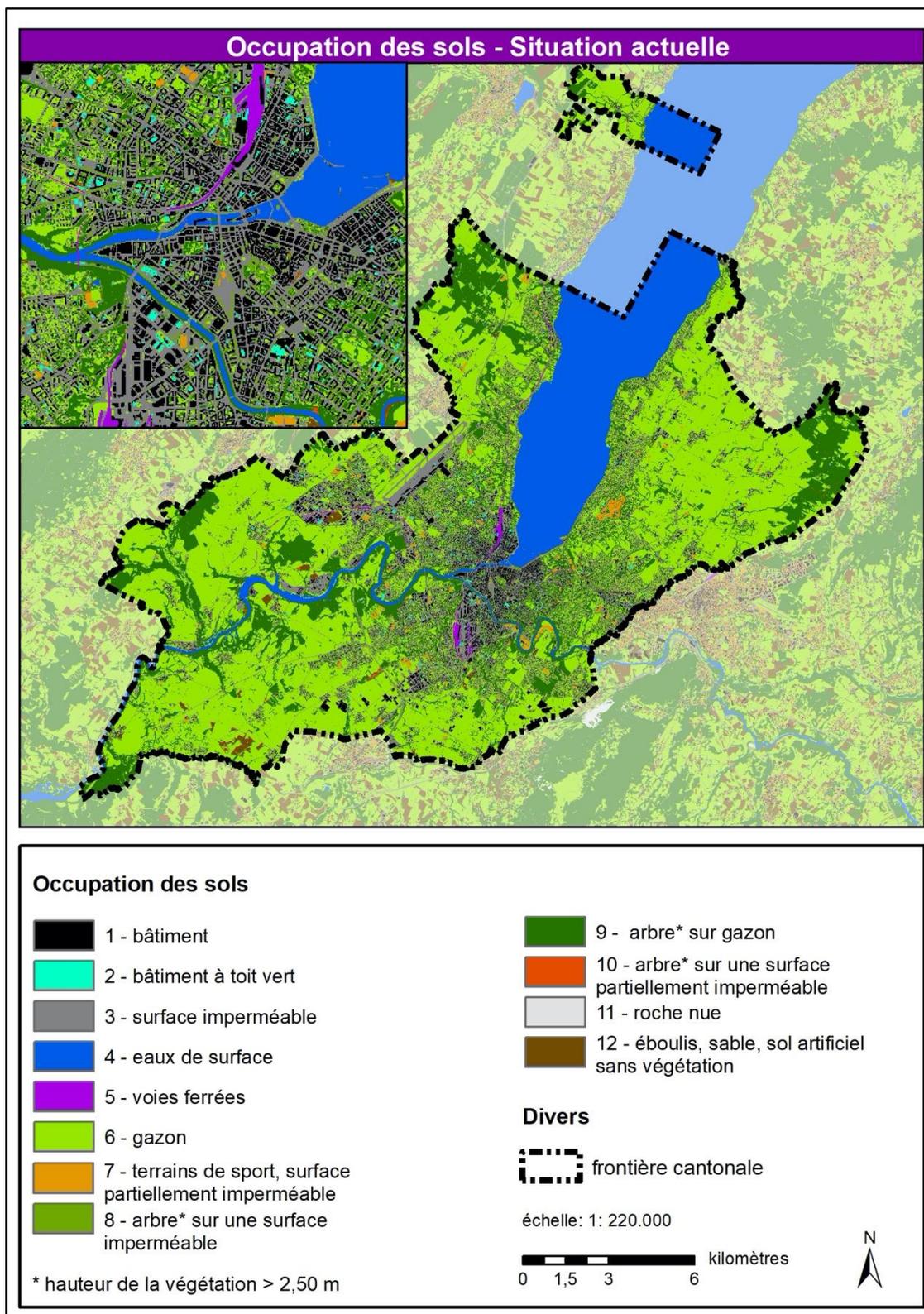


Fig. 19 : Occupation des sols actuelle dans le canton de Genève (représentation en raster avec 12 classes)

En plus de la description de l'occupation des sols future (Fig. 20 et Fig. 21 en miniature, Fig. A 2 et A 3 en annexe au format A0), 4 autres classes d'occupation des sols sont ajoutées, qui proviennent à l'origine de la modélisation climatique à méso-échelle (résolution de raster 25-50 m). Ces classes se trouvent dans les zones où aucune information précise (base de données Synthurba) n'était disponible. Elles sont divisées en différentes densités de bâtiments, les zones industrielles étant décrites dans une classe distincte en

raison du degré élevé d'imperméabilité et des émissions possibles. Les bâtiments et les arbres individuels ne peuvent pas être représentés en raison du manque d'informations, mais une certaine proportion de bâtiments et d'espaces verts est supposée pour chacune des quatre classes. Les zones de développement correspondantes comprennent par exemple les extensions urbaines, les renouvellements urbains et les projets de densification ultérieure.

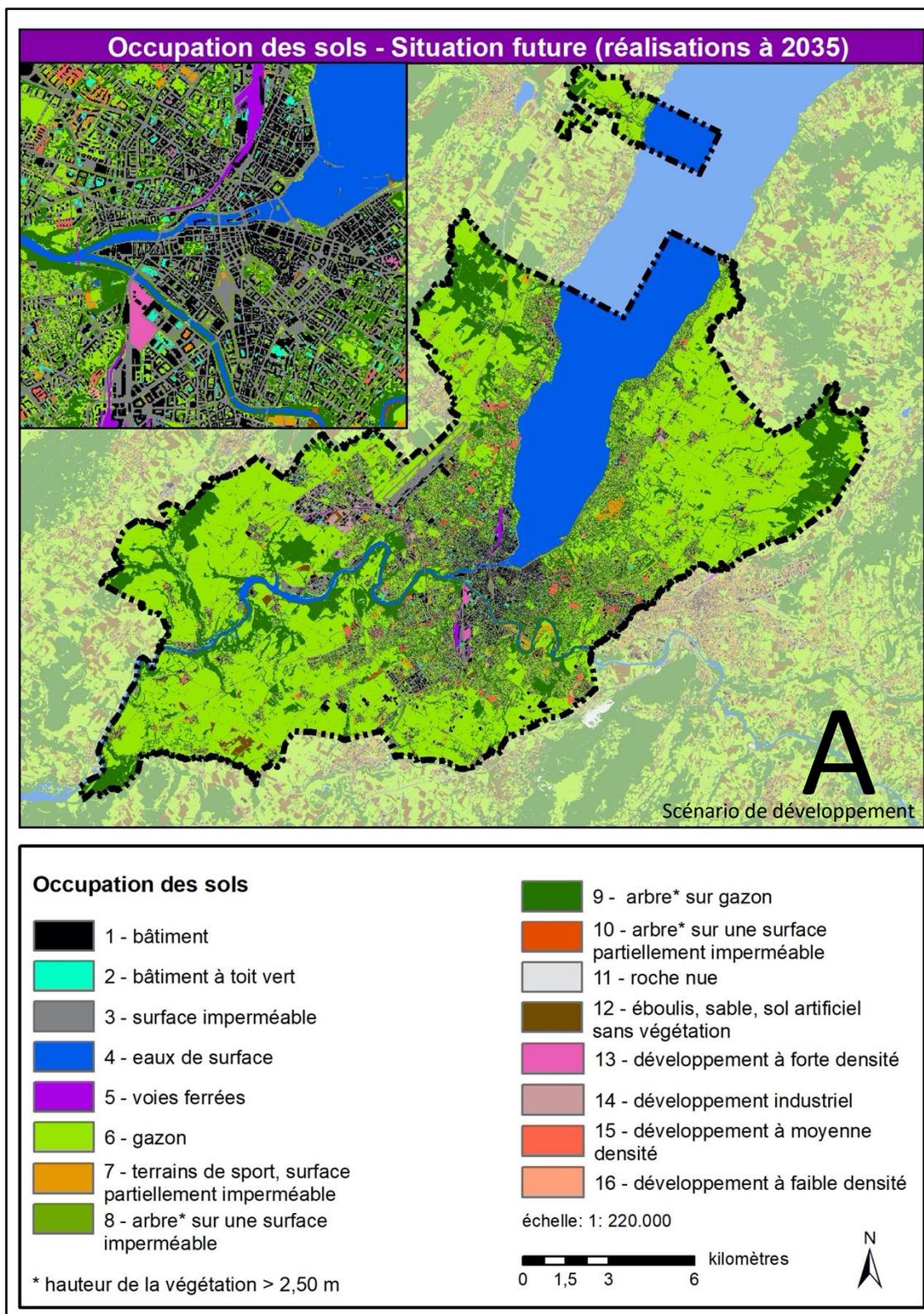


Fig. 20 : Occupation des sols future dans le canton de Genève (représentation en raster avec 16 classes) : Projets d'aménagement réalisés jusqu'en 2035

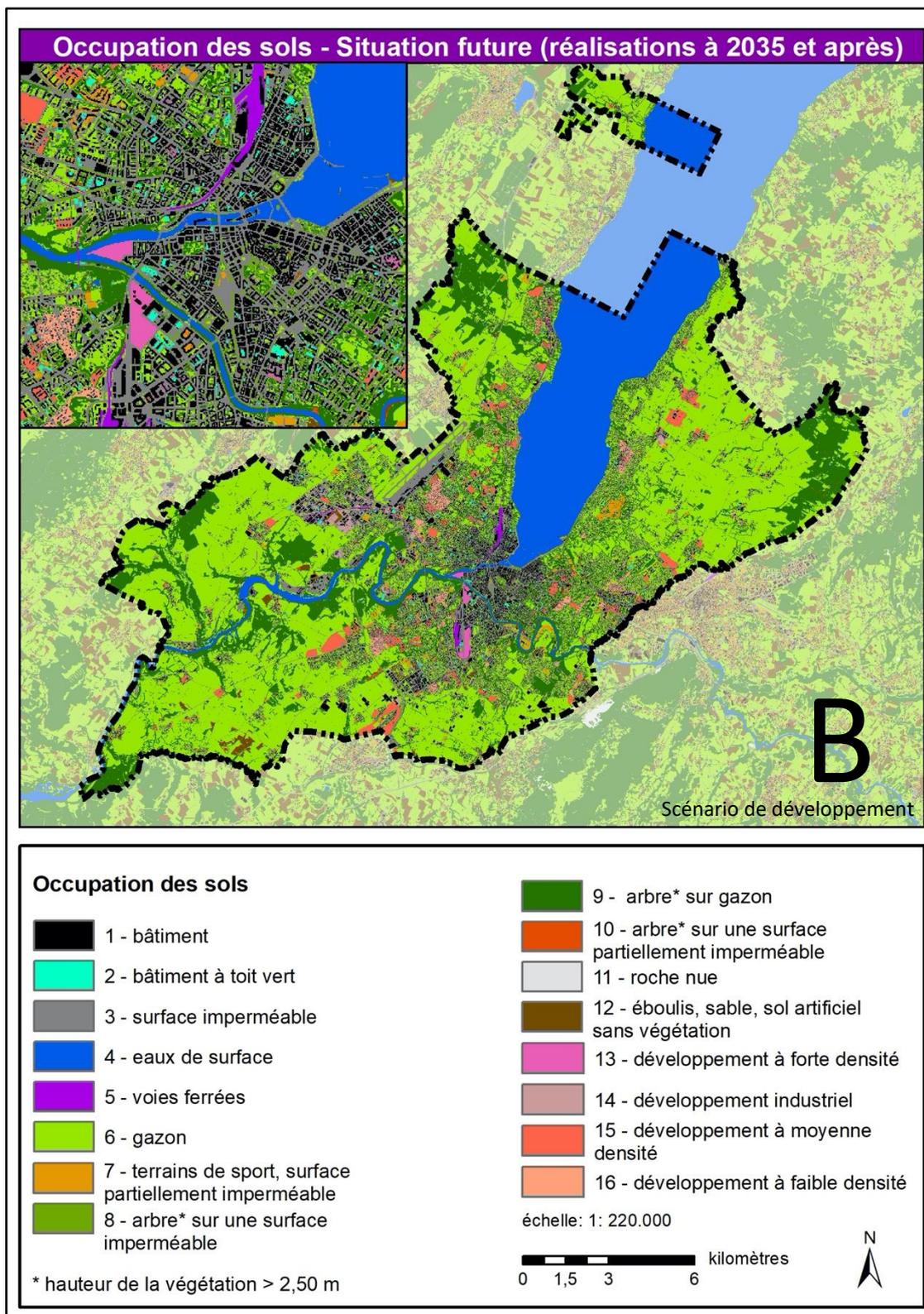


Fig. 21 : Occupation des sols future dans le canton de Genève (représentation en raster avec 16 classes) : ensemble des projets d'aménagement

PRÉPARATION DES DONNÉES D'ENTRÉE

L'objectif de la préparation des données d'entrée est de générer des données d'entrée de modèle à balayage ponctuel avec une largeur de grille de 10 m à partir des informations sur l'utilisation de la géométrie de référence (étapes 1 et 2 de la Fig. 22). À partir de ces représentations en pointillés des variables d'entrée, on obtient les résultats du modèle à base de grille des différents paramètres climatiques avec la même résolution (étape 3).

Les résultats du modèle permettent une première analyse des conditions climato-écologiques dans une région. Cependant, les déclarations de planification sur l'importance bioclimatique de certaines zones ne peuvent pas être basées sur des cellules de grille individuelles. À cette fin, un zonage de la zone d'étude en unités de surface climatiquement similaires est nécessaire. Ces zones de bloc doivent être compréhensibles dans la réalité et être délimitées administrativement ou à l'usage. Les résultats du modèle à base de données matricielles sont maintenant moyennés sur les zones des blocs de sorte que chaque zone de bloc contienne des informations, par exemple sur la température de l'air ou le débit d'air froid (étape 4 de la Fig. 22).

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 (utilisées par exemple dans la carte indicative de planification du chapitre 6).

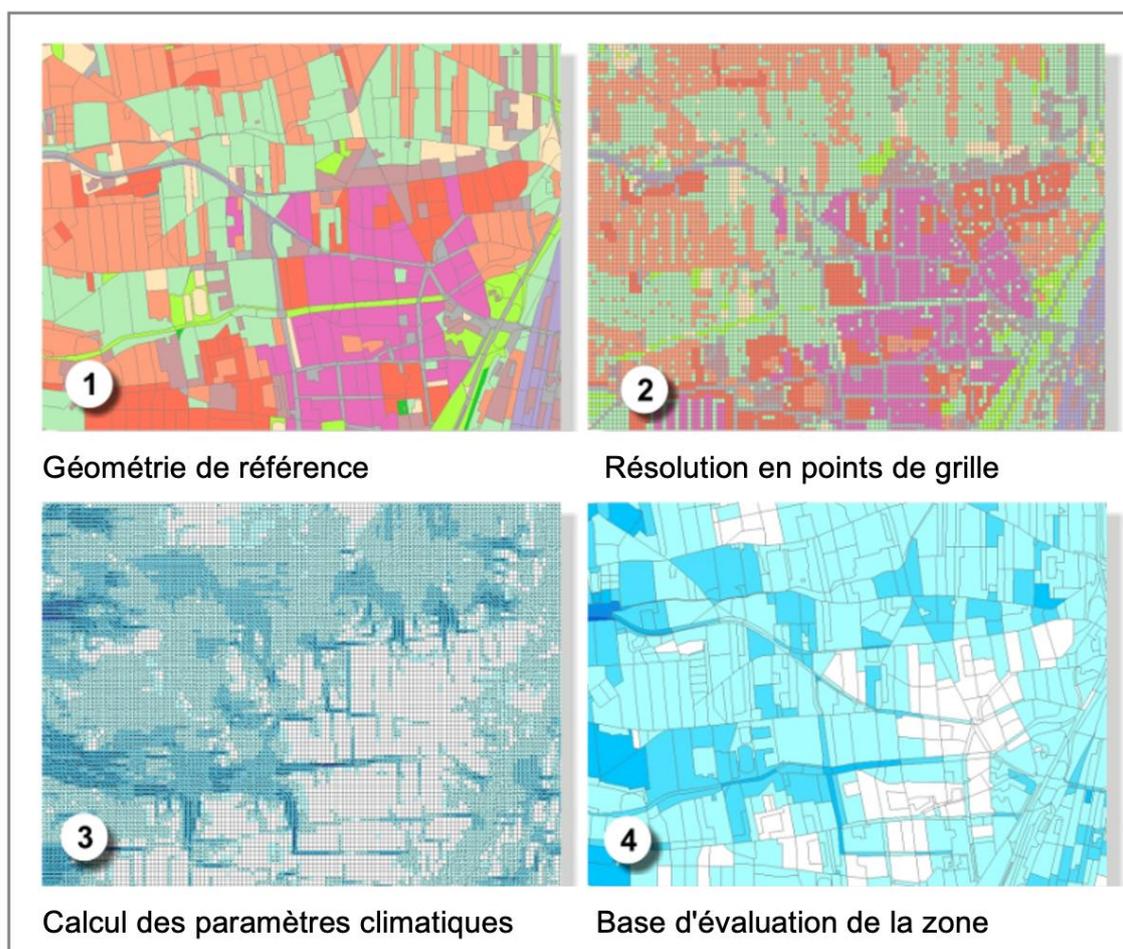


Fig. 22 : Schéma d'attribution des valeurs pour les informations sur les zones et les points



4. Résultats du modèle

Les résultats du modèle à base de grille des paramètres température de l'air, 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 (y compris le changement climatique et le développement futur).

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 pour la zone de résidence humaine à 2 m du sol et tiennent compte des heures de 04:00 heures pour la situation de nuit (refroidissement maximal) et de 14:00 heures pour la situation de jour (irradiation maximale).

4.1 CHAMP DE TEMPÉRATURE 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 et frais. Les valeurs absolues de la température de l'air indiquées sont exemplaires pour une nuit d'été autochtone comme situation météorologique particulière. Les différences relatives au sein des zones urbaines ou entre les structures d'utilisation qui en découlent, par contre, s'appliquent également dans une large mesure à d'autres situations météorologiques, de sorte que l'évaluation de la zone, par exemple dans les cartes indicatives de planification, est basée sur celles-ci.

RÉSULTATS

La carte de la situation nocturne (à 4h00) de la ville de Genève (voir Fig. 23, pour l'ensemble du canton voir la Fig. A 4 en annexe) représente la température de l'air à 2 m du sol en °C, la légende indiquant les valeurs les plus basses (jusqu'à 12 °C) en bleu foncé, passant par des valeurs moyennes en bleu clair et vert (de > 14 à 18 °C) jusqu'aux valeurs les plus élevées en rouge foncé (> 21 °C).

En fonction de l'emplacement ou de l'altitude du site, et des caractéristiques du sol ou de la surface, le refroidissement nocturne peut considérablement varier, ce qui est également évident pour le canton de Genève avec ses différentes utilisations du sol. Par exemple, la température de l'air la nuit près du sol, avec des valeurs minimales jusqu'à 9,9 °C dans les espaces ouverts loin de la ville et des valeurs maximales jusqu'à 22,1 °C dans le centre-ville de Genève, couvre une fourchette de 12,2 °C. Dans les conditions météorologiques supposées, la température moyenne dans le canton est de 16,9 °C, et de 18,5 °C dans la ville de Genève.

L'ampleur de l'écart de température dans la zone aménagée dépend principalement de la taille de la ville et de la densité de l'agglomération. Le centre-ville de Genève présente la plus forte densité de construction et, en particulier dans les zones commerciales, un niveau d'imperméabilisation élevé, ce qui se traduit par la plus forte surchauffe nocturne – même la nuit, des températures d'environ 20 °C sont encore atteintes dans les conditions supposées. Plus on s'éloigne du centre, plus la surchauffe diminue. Dans les zones de bordure desserrées, la température est comprise entre 15 et 18 °C (par exemple Vessy, Chêne-Bougeries). Des valeurs plus élevées allant jusqu'à 20 °C et plus sont atteintes dans les structures en rangées et les tours ou dans les aménagements du centre-ville. Les températures les plus basses dans la ville de Genève se trouvent dans les zones résidentielles, par exemple dans le quartier du Petit-Saconnex ainsi qu'à Champel, où les températures ne dépassent presque jamais 19 °C.

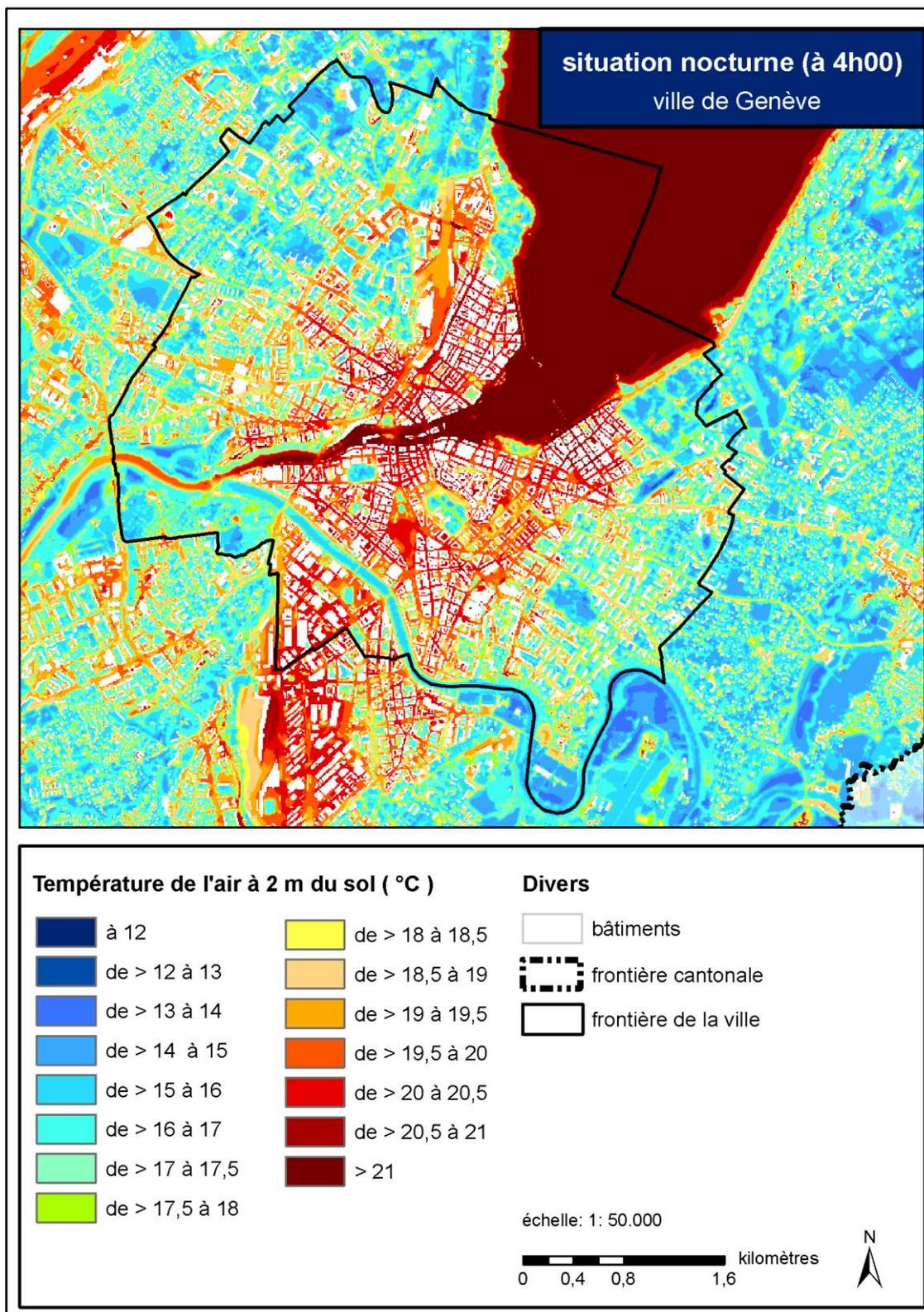


Fig. 23 : Champ de température nocturne près du sol dans la ville de Genève

Les zones industrielles et commerciales font exception, car leur refroidissement nocturne est réduit par l'imperméabilisation, de sorte qu'elles présentent également une forte surchauffe en dehors des grandes zones résidentielles (par exemple la zone industrielle au sud de l'Arve).

Les espaces verts qui s'étendent dans la ville, comme les cimetières de Saint-Georges et du Petit-Saconnex sont des exemples des espaces de compensation froides au sein de la ville de Genève. En comparaison



avec les espaces verts et ouverts en dehors de la ville de Genève, les espaces verts des centres-villes présentent un spectre de valeurs plus élevé avec environ 14 – 17 °C, ce qui entraîne une dépendance de leur taille et de leur structure verte. Par exemple, la température des petits espaces verts descend rarement en dessous de 14 °C s'ils sont situés dans un environnement généralement plus chaud, et la capacité de refroidissement des jachères de forme anthropogénique est également limitée. En revanche, les grandes zones vertes caractérisées par la végétation sont clairement visibles dans le canton de Genève où les températures sont relativement basses et représentent donc des zones de décharge potentielles pour les zones résidentielles environnantes – par exemple, les vastes terres agricoles et les terrains de golf du Golf Club de Genève.

Dans les forêts, la canopée atténue le rayonnement nocturne et par conséquent une forte baisse de la température de l'air près du sol, de sorte que des valeurs d'environ 16 – 18 °C sont atteintes à 2 m au-dessus du sol (par exemple Bois de la Bâtie, Bois de Chatillon et Bois du Château). La nuit, la production d'air froid près du sol est donc inférieure à celle des espaces ouverts non étanches, car dans les forêts la production réelle d'air froid a lieu au-dessus de la canopée. En outre, les grandes zones forestières ont une fonction importante en tant que zones de production d'air frais, où de l'air riche en oxygène et moins pollué est produit.

Entre autres choses, la grande capacité thermique massique de l'eau réduit la variation diurne de la température de l'air sur les grandes masses d'eau, de sorte que les températures nocturnes peuvent même être plus élevées que dans la zone environnante et réduire leur refroidissement. Ce phénomène est plus prononcé dans les eaux calmes comme le lac Léman mais peut également être observé dans les eaux courantes telles que le Rhône. Le lac Léman et le Rhône montrent des valeurs de température nocturnes élevées, avec le plus souvent plus de 21 °C (lac Léman) et plus de 19 °C (Rhône). L'Arve comme rivière de montagne froide démontre par contre des valeurs entre 14 à 17 °C et, contrairement aux autres eaux, elle a tendance à provoquer un refroidissement nocturne.¹⁵

En raison du changement climatique, une augmentation moyenne de la température estivale de 1,5 °C (période future 2020-2049), 2,6 °C (période future 2045-2074) et 4,6 °C (période future 2070-2099) est attendue dans le futur par rapport à la période de référence 1981-2010 (voir également les résultats des scénarios climatiques suisses CH-2018 pour l'Ouest de la Suisse, scénario RCP 8.5, Fig. 14 au chapitre 2.2.3). La figure ci-dessous (Fig. 24) montre que l'augmentation de la température due au changement climatique est répartie plus ou moins uniformément sur le canton de Genève, l'agglomération se réchauffant en moyenne de 0,1 °C de plus que les espaces verts et ouverts. En même temps, les zones de développement prévues ont un impact sur le climat de Genève. Dans les zones de développement, où les espaces ouverts sont transformés en zones bâties, la température de l'air nocturne augmente le plus fortement par rapport à la situation actuelle. Cela est dû au fait que les espaces ouverts (encore) non développés sont actuellement relativement frais et qu'ils deviendront nettement plus chauds s'ils sont imperméabilisés. D'autre part, il y a aussi l'effet du changement climatique, avec pour conséquence des changements clairement perceptibles (bien que locaux), en particulier dans les zones de développement. Si la partie verte d'une zone de développement augmente par rapport à la situation actuelle (par exemple, le grand projet Praille Acacias Vernets - PAV), on peut même supposer une réduction des températures de l'air la nuit.

¹⁵ La température de l'air au-dessus des eaux dépend fortement de la température de l'eau. Pour les températures de l'eau supposées, voir le chapitre 3.3. En général, cependant, il faut toujours s'attendre à des températures plus basses au-dessus de l'Arve qu'au-dessus du Rhône et du lac Léman.

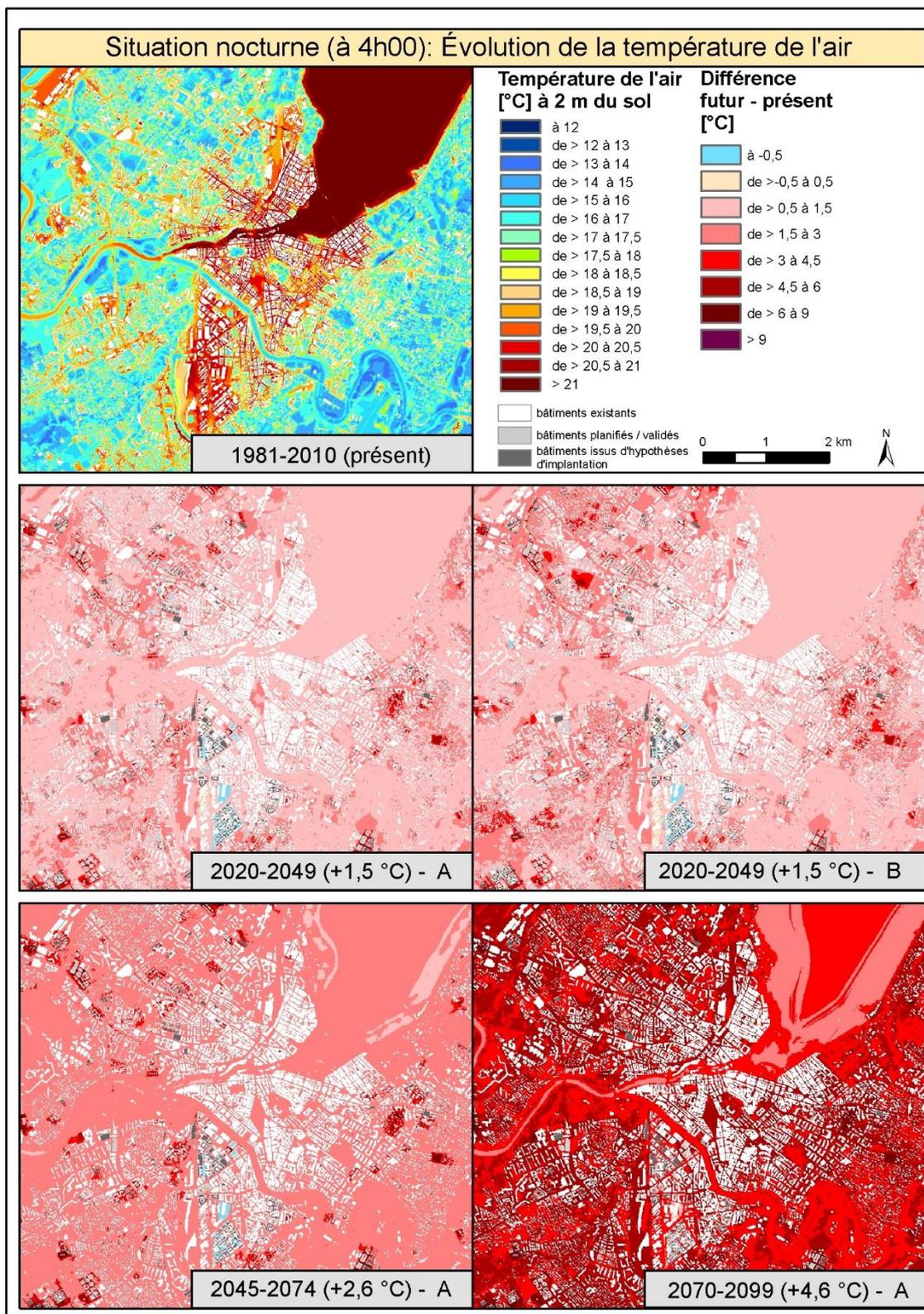


Fig. 24: Évolution des températures de l'air nocturne dans les périodes futures 2020-2049, 2045-2074 et 2070-2099 avec les scénarios de développement A (au milieu à gauche et en bas) et B (au milieu à droite)¹⁶

¹⁶ Dans les cartes de l'évolution des températures, les bâtiments sont indiqués en noir s'il y a un bâtiment à l'endroit correspondant dans la situation actuelle ou dans le futur. Dans ce contexte aucune valeur de température n'est disponible pour les emplacements des bâtiments, puisqu'il s'agit de la température de l'air extérieur.

Dans les zones correspondantes, une augmentation de la composante verte peut partiellement compenser les effets du changement climatique (en bleu sur les cartes de l'évolution des températures de la Fig. 24). L'effet de refroidissement exact, cependant, dépend fortement de la conception plus précise de la zone.

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 paysage : les grandes agglomérations agissent comme des obstacles à l'écoulement en raison de leur forte rugosité aérodynamique, de sorte que la ventilation des corps urbains est réduite. L'élimination des masses d'air surchauffées et polluées dans les canyons des rues 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 polluées 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'est-à-dire 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, par exemple, toutes les secondes (Fig. 25).

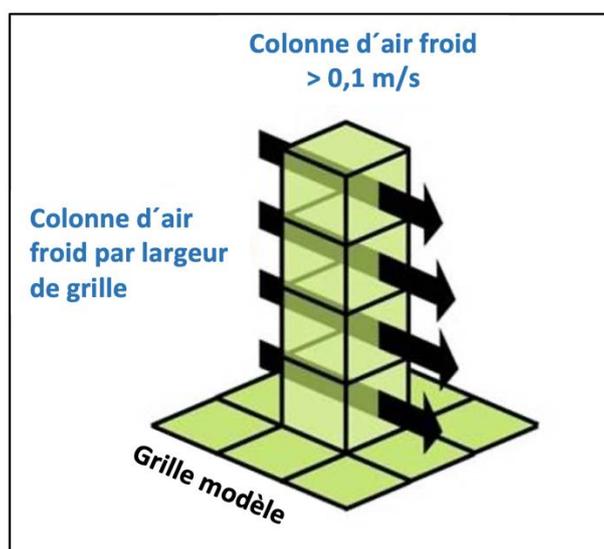


Fig. 25 : Schéma du principe du débit d'air froid

De la même manière que les autres paramètres climatiques, le débit d'air froid est une variable qui varie en force et en direction 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 des routes 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.

RÉSULTATS

La carte de la situation nocturne (à 4h00) de la ville de Genève (Fig. 26) représente le débit d'air froid en $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$, la légende indiquant les valeurs les plus faibles (jusqu'à $5 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$) en rouge-brunâtre et les valeurs les plus élevées en bleu foncé ($> 40 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$), ainsi que la direction du débit d'air froid, spécifiée par des petites flèches noires. Pour une meilleure lisibilité de la carte, les flèches ont été regroupées à partir de leur résolution initiale de 10 m à 200 m.

Le débit d'air froid montre une grande variabilité dans le canton et va de presque zéro à des valeurs maximales de presque $87 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ à Veyrier. La valeur moyenne dans le canton de Genève est de $19,1 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ et de $11,4 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ dans la ville de Genève. Les zones bâties de Plainpalais (dans le sud-est) et de la Cité (dans le nord-est et dans le centre) de la ville de Genève sont caractérisées par des valeurs de débit d'air froid entre 5 et $< 15 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$, tandis que certaines rues et autres structures à faible rugosité dans les quartiers de Sécheron, Bouchet-Moillebeau et O.N.U. dans le nord ainsi que dans le quartier périphérique de Champel dans le sud indiquent des valeurs entre > 15 et $25 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$.

Dans la très dense "Cité", l'échange d'air est très limité, mais des processus d'échange d'air à petite échelle ont lieu entre les plans d'eau (lac Léman, Rhône, Arve), les espaces verts (par exemple le Cimetière des Rois) ou les structures ouvertes (par exemple la Plaine de Plainpalais) et les bâtiments adjacents. Plus le centre-ville est éloigné, plus le débit d'air froid augmente en raison de l'effet d'obstruction moindre des bâtiments. Dans le nord et le nord-ouest de la ville de Genève, les quartiers du Petit-Saconnex profitent d'une direction d'origine du débit d'air froid des périphéries au nord et nord-ouest. Finalement, le quartier des Eaux-Vives dans le sud-est de Genève est principalement caractérisé par des directions du débit d'air froid d'origine du sud-est.

Alors que les écoulements d'air froid dans la ville de Genève sont principalement induits thermiquement, les vents à l'extérieur de la ville sont amplifiés en de nombreux endroits par le relief. À Coligny et Pregny-Chambésy, par exemple, on observe des écoulements d'air froid thermo-orographiques (vents de pente allant de la périphérie plus froide au lac Léman plus chaud), qui atteignent des débits d'air froid particulièrement élevés, parfois supérieurs à $40 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$. En outre, grâce à la construction de bâtiments en vrac dans les zones extérieures à la ville, les vents ne sont pas trop ralentis, de sorte que les écoulements d'air froid ont tendance à être plus importants dans ces zones (voir la Fig. A 5 en annexe pour la situation dans l'ensemble du canton). Les vents de montagne nocturnes ne jouent pas un rôle trop déterminant dans les conditions météorologiques de vent faible dans le canton ; ce sont plutôt les vents de pente qui sont plus importants. Seuls les grands débits d'air froid à Veyrier (à la frontière cantonale) indiquent des vents de montagne, mais constituent une exception.

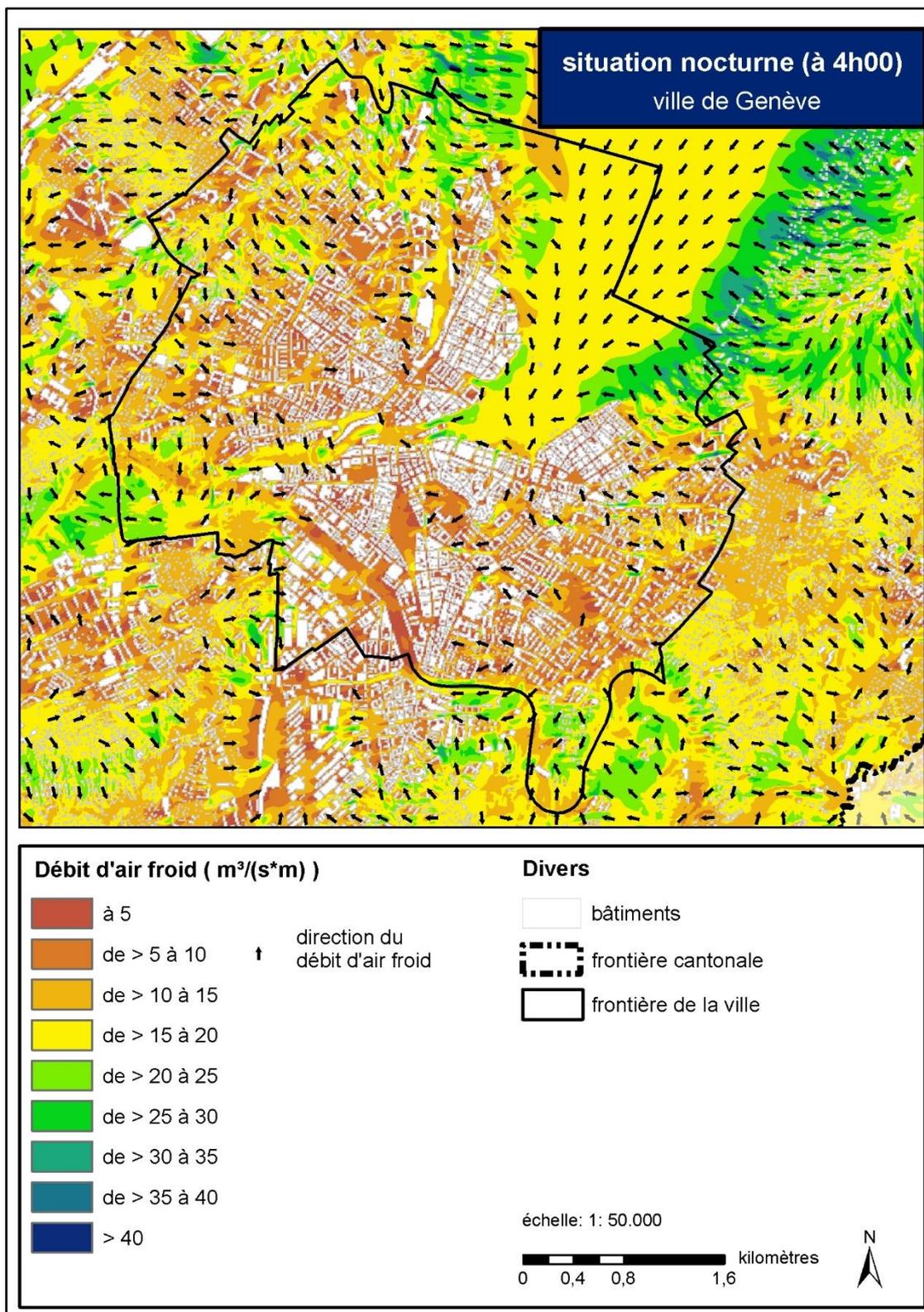


Fig. 26 : Débit d'air froid nocturne pour la ville de Genève

La Fig. 27 montre la vitesse du vent (en couleur) et la direction du vent nocturne (signature de la flèche) proche du sol dans la ville de Genève (pour la caractéristique du champ de vent dans l'ensemble du canton, voir la Fig. A 6 en annexe). On suppose qu'un effet climatique et écologique potentiel se produit à partir d'une vitesse de vent de 0,1 m/s. Les caractéristiques spatiales du champ d'écoulement de l'air froid près du sol suivent largement le schéma du débit d'air froid.

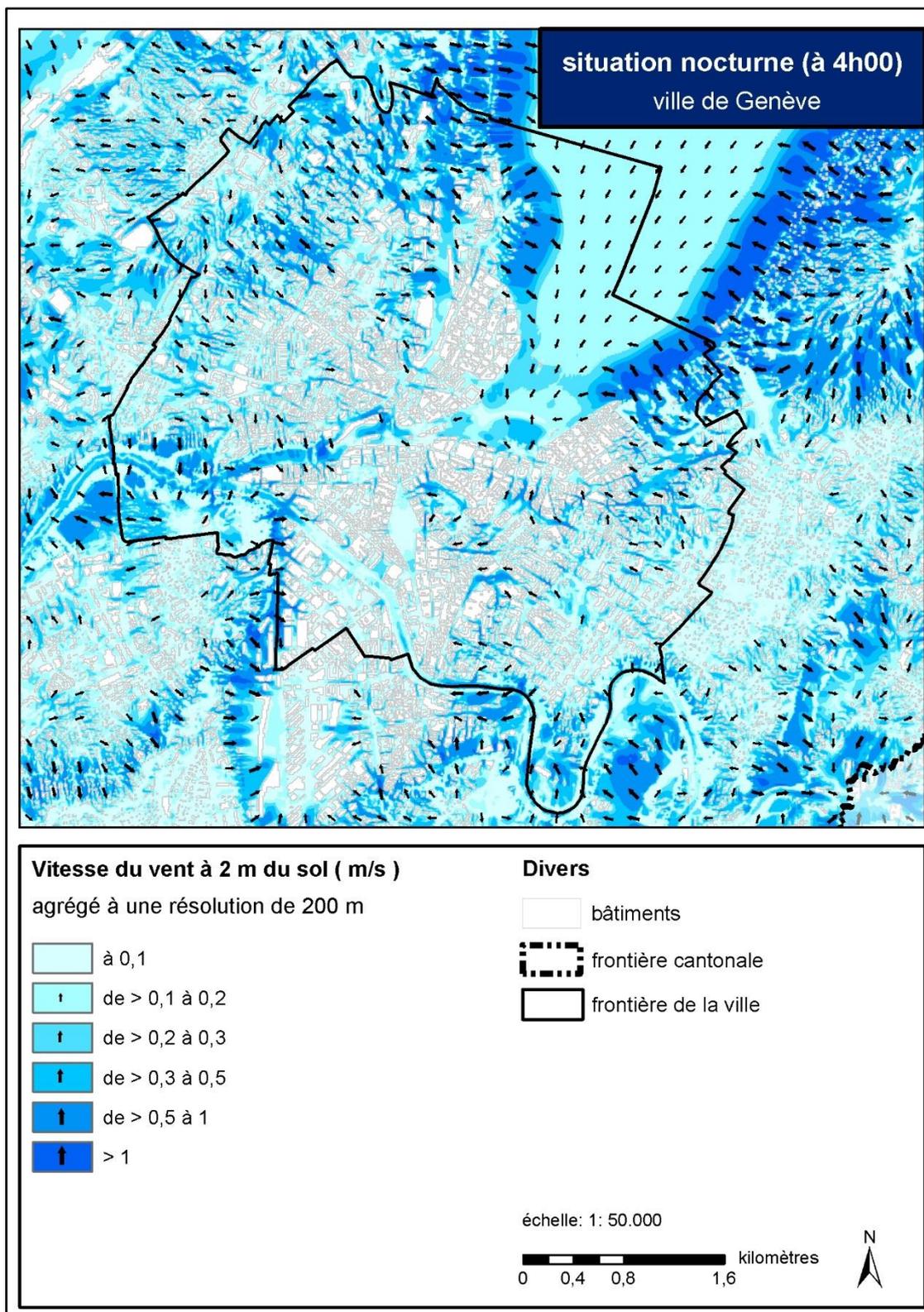


Fig. 27 : Vitesse et direction du vent proche du sol pour la ville de Genève

Dans la ville de Genève, les vitesses d'écoulement les plus élevées, jusqu'à presque 1,5 m/s, se trouvent dans les espaces de compensation du Petit-Saconnex dans le nord de la ville, ainsi qu'aux rives du Lac Léman dans les quartiers de Sécheron dans le nord-est et des Eaux-Vives-Lac dans l'est. De plus, l'ouest de la ville avec les quartiers de St-Jean-Aire et Bâtie-Acacias présente des vitesses d'écoulements élevés, mais le courant est dirigé vers l'Arve et le Rhône et l'agglomération ne bénéficie guère de ce courant.



Cependant, à 2 m au-dessus du sol, l'effet d'obstruction des bâtiments est plus prononcé, de sorte que certaines zones du centre-ville ne sont pas efficacement ventilées à proximité du sol.

Le champ de circulation de l'air froid montre clairement qu'en plus des couloirs verts, l'espace de la rue (en raison du faible effet d'obstruction) peut également contribuer à la ventilation de la zone urbaine – dans certaines circonstances, il peut s'agir uniquement du transport d'air froid et non plus d'air frais (en particulier au petit matin, en fonction de la situation du trafic). De même, les chemins de fer (par exemple la ligne de chemin de fer à Sécheron) et les masses d'eau contribuent à aérer la ville. Cependant, comme l'air au-dessus du lac Léman et du Rhône reste relativement chaud la nuit, le transport d'air froid est très limité, voire inexistant.¹⁷

En outre, des espaces verts plus vastes peuvent apporter un soulagement au moins localement, par exemple à proximité du Parc des Bastions et du Parc Bertrand ainsi que du Cimetière des Rois, dont les bâtiments adjacents bénéficient de la production d'air froid.¹⁸ En dehors de la ville, les processus d'échange entre les espaces verts et leur environnement bâti se déroulent sur une échelle beaucoup plus grande, par exemple à Pregny-Chambésy dans la zone du grand espace vert le long de la Route de Pregny.

Pour le flux à 2 m au-dessus du sol, les forêts avec leur population dense d'arbres représentent inévitablement un obstacle, mais les résultats montrent que depuis les bords de la forêt (par exemple du Bois de la Bâtie), des courants compensatoires commencent également à circuler près du sol vers la zone bâtie. Le champ de vent proche du sol est principalement contrôlé par des obstacles à l'écoulement et le relief exerce également une influence importante (vents de pente).

Dans un avenir proche, la dynamique de l'air froid ne changera que légèrement au cours du changement climatique par rapport à la situation actuelle (Fig. 28, Fig. 29). Les changements locaux dans le champ d'écoulement de l'air froid se produisent principalement à proximité des zones de développement, car les bâtiments nouvellement construits agissent comme des obstacles à l'écoulement et ralentissent ou dévient ainsi les vents. Les effets de canalisation entraînent également une augmentation de la vitesse du vent et du débit d'air froid. Le changement d'occupation des sols et le changement de température qui en résulte affectent également les vents induits par des effets thermiques. En résumé, les nouvelles conditions de vent à proximité des zones de développement résultent de la modification de la rugosité du sol et de la température de l'air.

En partant du principe que la température de l'eau (par exemple du lac Léman, de l'Arve et du Rhône) se réchauffe plus lentement que la température de l'air dans le cadre du changement climatique, il faut s'attendre à une modification des conditions de vent dans la zone côtière. Cela s'applique en particulier à la zone proche du sol (voir le champ de vent sur la Fig. 29).

¹⁷ En raison du vent, la température est encore perçue comme plus basse. Cependant, une humidité élevée peut également provoquer une sensation de chaleur.

¹⁸ Comme ces systèmes d'écoulement ne sont qu'à très petite échelle, ils ne sont pas visibles avec des flèches dans le champ de vent cumulé de 200 m. Pour un examen plus approfondi de ces processus, il convient de consulter les flèches de vent en résolution originale (10 m).

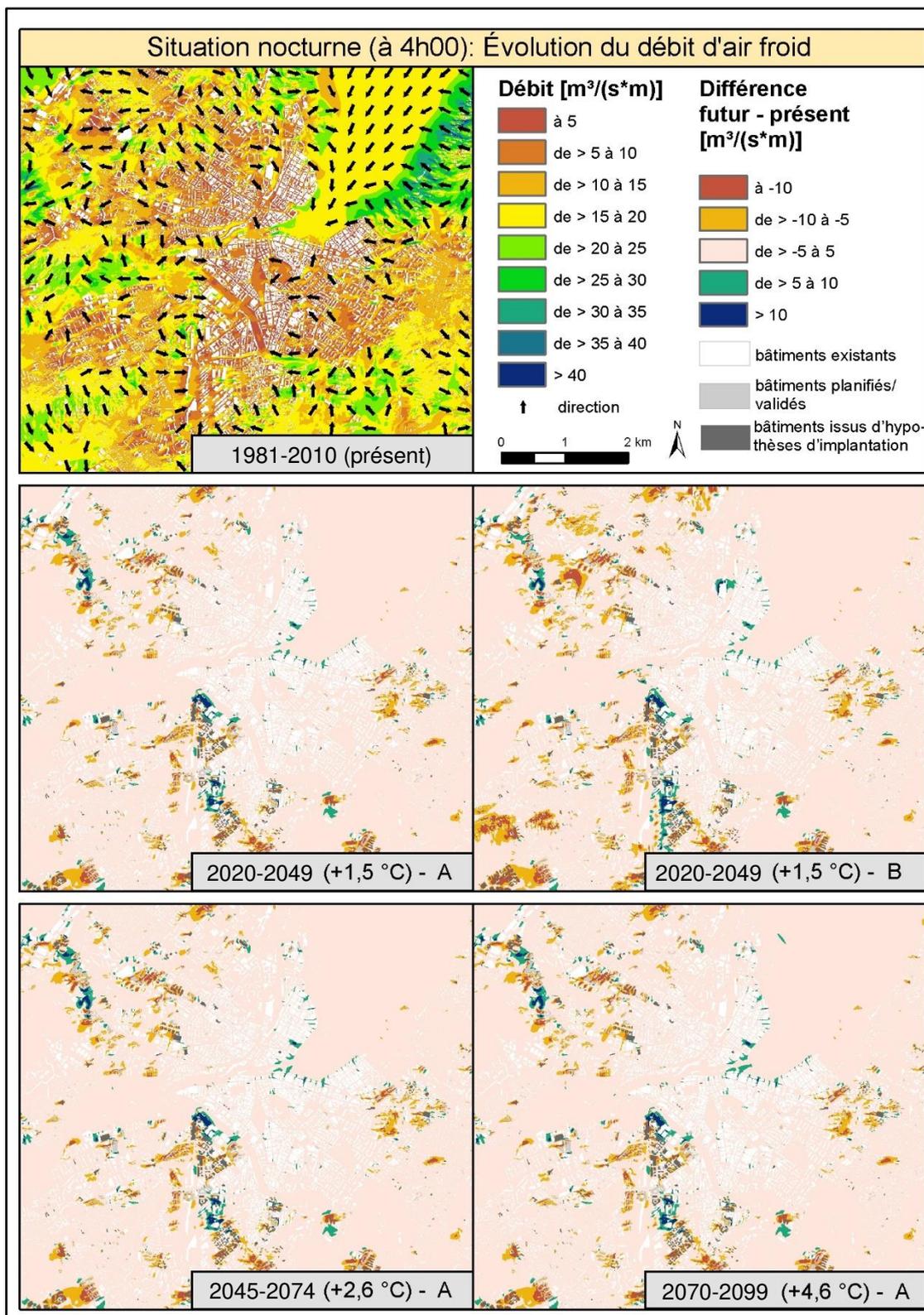


Fig. 28: Évolution du débit d'air froid pour les périodes futures 2020-2049, 2045-2074 et 2070-2099 avec les scénarios de développement A (au milieu à gauche et en bas) et B (au milieu à droite)

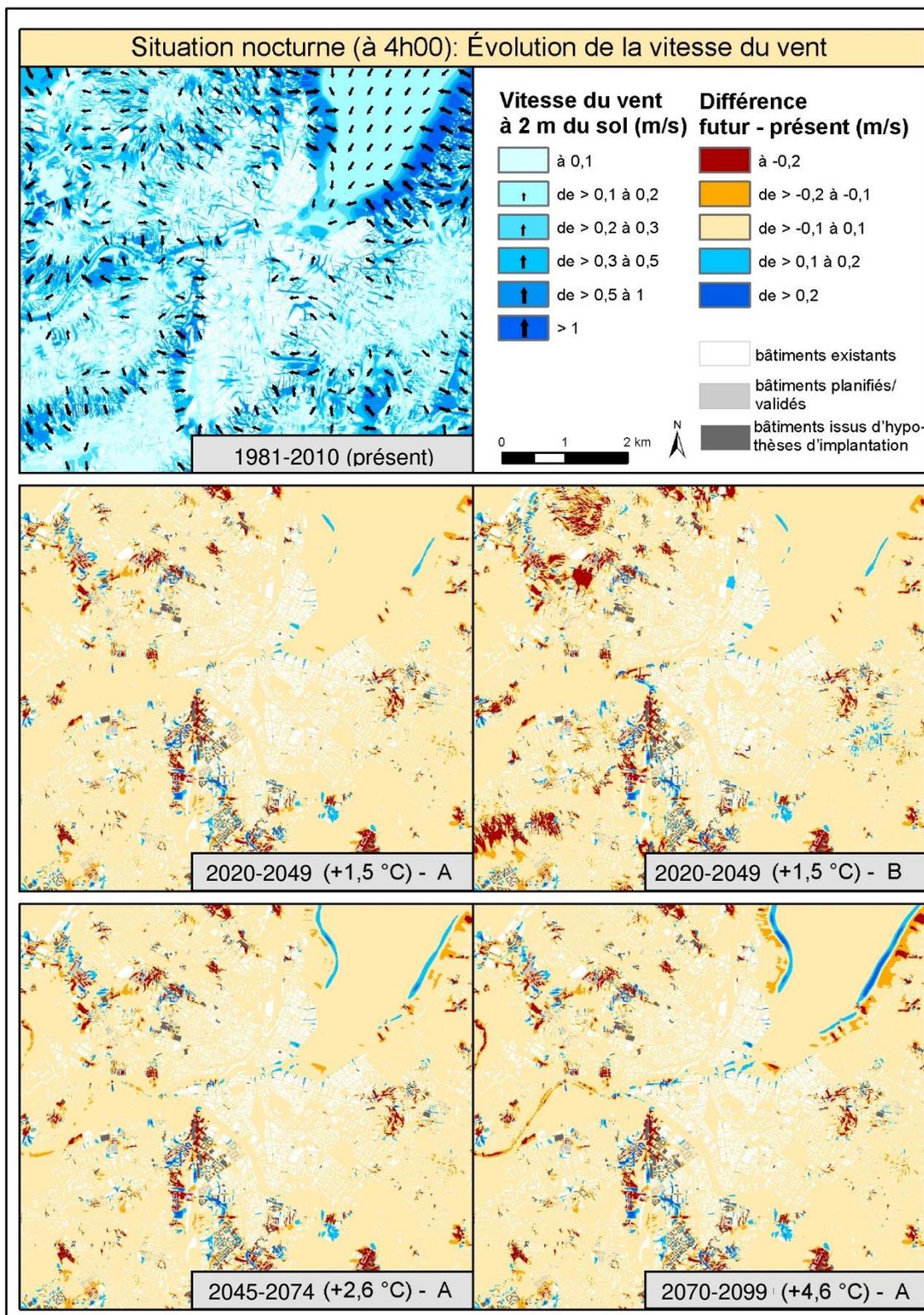


Fig. 29: Évolution de la vitesse du vent pour les périodes futures 2020-2049, 2045-2074 et 2070-2099 avec les scénarios de développement A (au milieu à gauche et en bas) et B (au milieu à droite)

4.3 CHARGE THERMIQUE PENDANT LA JOURNÉE

Les paramètres météorologiques n'agissent pas indépendamment les uns des autres sur le bien-être de l'homme, mais dans des effets biométéorologiques complexes. Des indices sont utilisés pour l'évaluation (paramètres), qui combinent des déclarations sur la température et l'humidité de l'air, la vitesse du vent ainsi que les flux de rayonnement à ondes courtes et longues (Fig. 30). Les modèles de bilan thermique calculent l'échange de chaleur d'une « personne standard » avec son environnement et peuvent ainsi estimer la charge thermique d'une personne¹⁹.

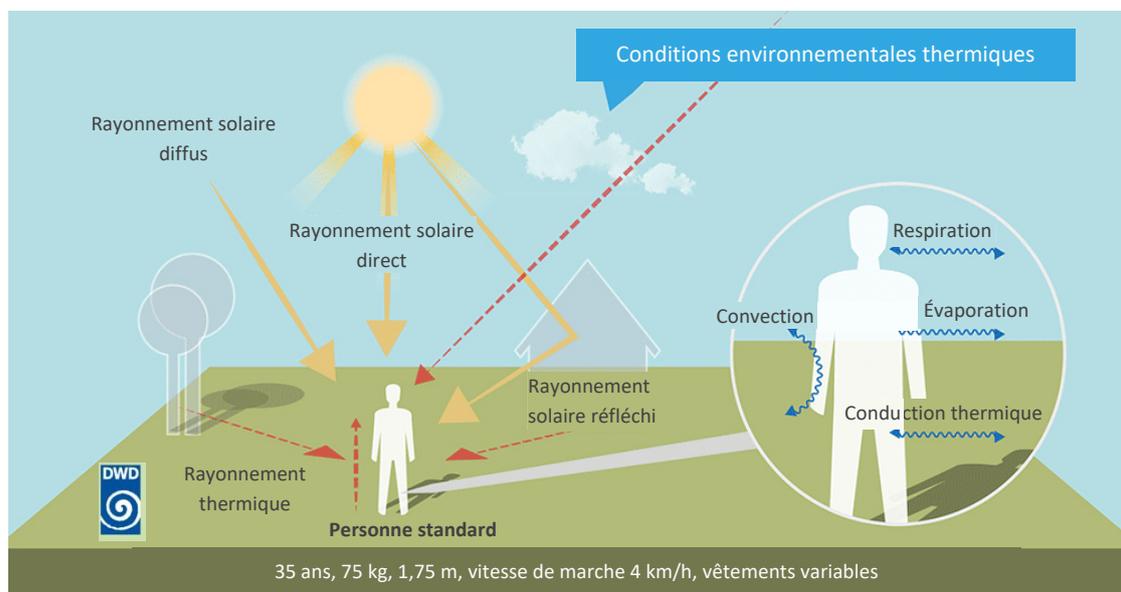


Fig. 30: Représentation schématique des différentes influences sur la sensation humaine de chaleur (DWD 2020b, modifié par GEO-NET)

Tab. 2: Attribution des seuils de l'indice d'évaluation de l'indicateur PET pendant la journée (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 la présente étude, l'indice bioclimatique humain PET à 14h00 heures est utilisé pour évaluer la situation diurne (Température physiologique équivalente ; Matzarakis & Mayer 1996). Par rapport à des

¹⁹ Modèles de bilan énergétique pour le bilan thermique humain basés sur la perception de la température d'une personne moyenne (« Klima-Michel » avec les hypothèses suivantes : 1,75 m, 75 kg, 1,9 m² de surface corporelle, environ 35 ans ; cf. Jendritzky 1990).



indices comparables, la PET a l'avantage d'être plus facile à comprendre grâce à l'unité °C²⁰. En outre, la PET est devenue une sorte de « quasi-standard » parmi les experts, de sorte que les résultats peuvent être comparés à ceux d'autres villes. Comme les autres indices humains-biométéorologiques, la PET se réfère aux conditions climatiques extérieures et montre une forte dépendance de la température de rayonnement (Kuttler 1999). En ce qui concerne l'exposition à la chaleur, elle est donc particulièrement utile pour évaluer le séjour à l'extérieur et pendant la journée. Pour la PET, la directive VDI 3787, fiche 9, contient une échelle d'évaluation absolue qui quantifie la sensation thermique et les niveaux de stress physiologique (par exemple, le stress de chaleur élevé de la PET 35 °C ; Tab. 2).

RÉSULTATS

La carte de la situation diurne (à 14h00) de la ville de Genève (voir Fig. 31, pour l'ensemble du canton Fig. A 7 en annexe) représente la PET à 1,1 m du sol en °C, la légende indiquant les valeurs les plus basses (jusqu'à 24 °C) en bleu foncé, passant par des valeurs moyennes en vert et jaune (de > 30 à 38 °C) jusqu'aux valeurs les plus élevées en rouge foncé (> 44 °C).

Par rapport à la température de l'air, la PET montre une fourchette plus élevée dans la zone étudiée. Dans la ville de Genève, elle varie entre environ 25 °C (voire 23,7 °C dans tout le canton) et 45 °C. Les valeurs les plus faibles se trouvent sur les grandes masses d'eau qui ont un effet de refroidissement sur leur environnement pendant la journée (par exemple lac Léman, Rhône, Arve). En outre, les zones forestières dont les valeurs de PET sont généralement autour d'un éventail de 30 °C, se distinguent (charge thermique essentiellement faible). La zone de vie humaine se trouve sous la canopée et est donc protégée de la lumière directe du soleil, de sorte que les forêts peuvent servir de lieux de retraite. En outre, les forêts situées à proximité de la zone bâtie peuvent également produire de l'air froid pendant la journée au profit de la zone aménagée adjacente.

Dans l'hypothèse d'une journée d'été autochtone (pas de nuages, c'est-à-dire un rayonnement sans entrave), toutes les autres zones présentent au moins une charge thermique modérée, tandis que la zone densément bâtie est surtout affectée par une forte charge thermique. Les zones bâties en périphérie du centre-ville, des Eaux-Vives dans l'est et de Champel dans le sud-est ainsi que les quartiers du Petit-Saconnex dans le nord et le nord-ouest montrent des valeurs moyennes de PET d'environ > 32 à 38 °C. Les valeurs les plus élevées se trouvent au-dessus des zones industrielles étanches et de l'espace routier et ferroviaire (plus de 41 °C de PET ; charge thermique extrême). En direction du centre-ville, les valeurs s'accroissent et peuvent atteindre des valeurs de > 42 à 44 °C, ce qui est notamment le cas pour la gare Cornavin et les voies ferrées y menant dans le nord-est tout comme pour les surfaces étanches à proximité de l'hôpital et de l'université de Genève et le quartier du PAV (notamment les artères, Acacias, Boissonnas, Vernets, Le Royer et Queue-D'Arve). Dans certaines zones de l'agglomération, de grandes différences de PET se produisent déjà dans un espace très restreint, comme dans le secteur des Avanchets. Il s'agit d'un développement de grande hauteur dans un environnement fortement boisé. Des valeurs de PET relativement faibles, de l'ordre de 29 °C, sont atteintes dans une forte densité d'arbres. En revanche, les pelouses ouvertes et exposées au soleil, dont certaines peuvent même atteindre 41 °C, contrastent avec cette situation. L'exemple de la PET des Avanchets montre également que l'effet rafraîchissant de l'ombre des grands bâtiments n'est pas aussi fort que celui des arbres.

En raison du rayonnement solaire sans entrave, la charge thermique dans les espaces ouverts non étanches atteint des valeurs tout aussi élevées (par exemple sur les terres arables de Meinier). Au sein de

²⁰ D'autres paramètres sont par exemple le PMV (Predicted Mean Vote) et l'UTCI (Universal Thermal Climate Index).

l'agglomération, les zones de parcs comme le Parc de l'Ariana, le Parc Mon Repos, le Parc de la Grange, le Parc Alfred Bertrand et le Parc des Franchises ou les cimetières (par exemple les cimetières de Saint-Georges et du Petit-Saconnex) avec leur faible charge thermique sont des lieux de retraite importants pour la population.

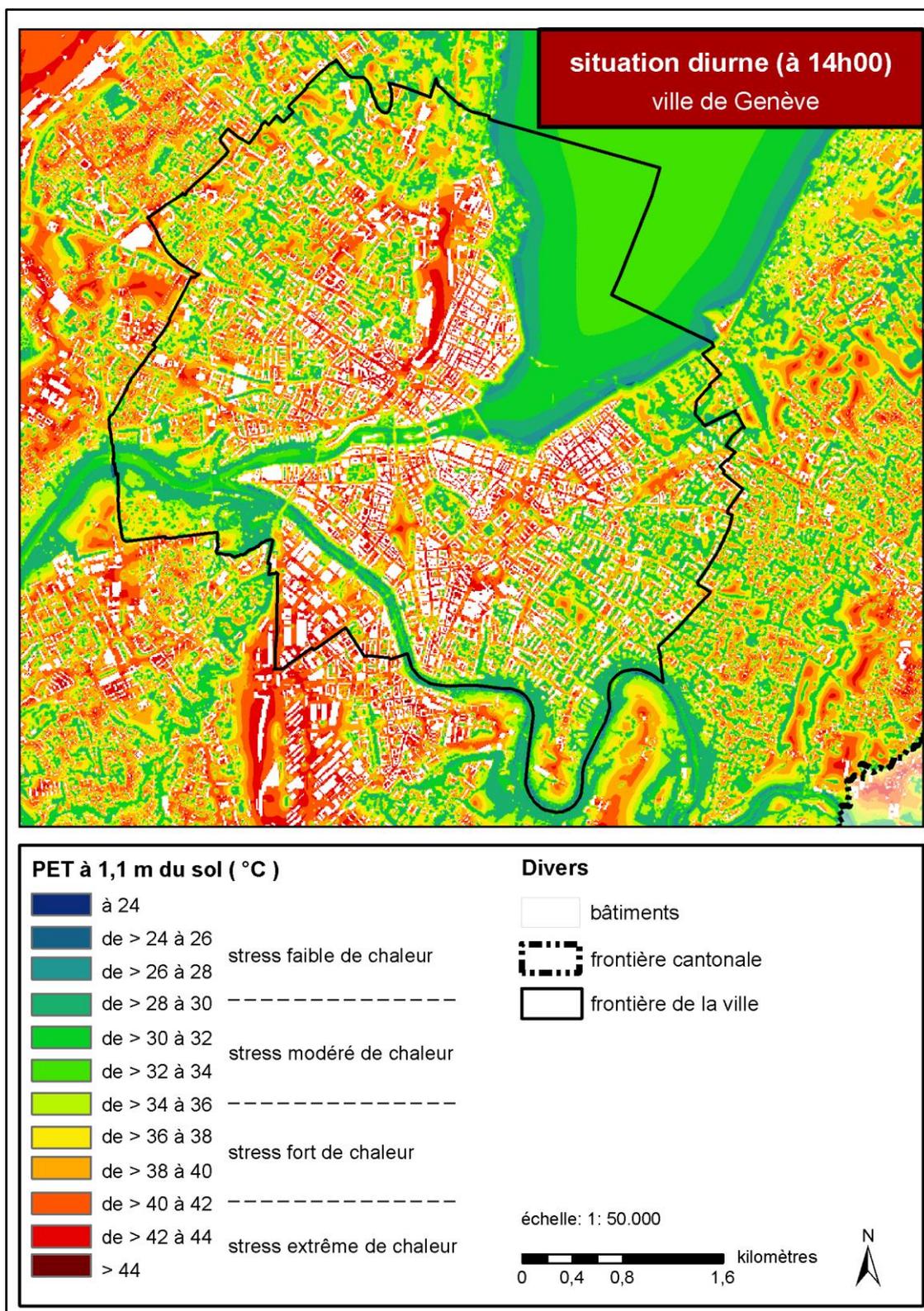


Fig. 31 : Charge thermique pendant la journée dans la ville de Genève (PET)

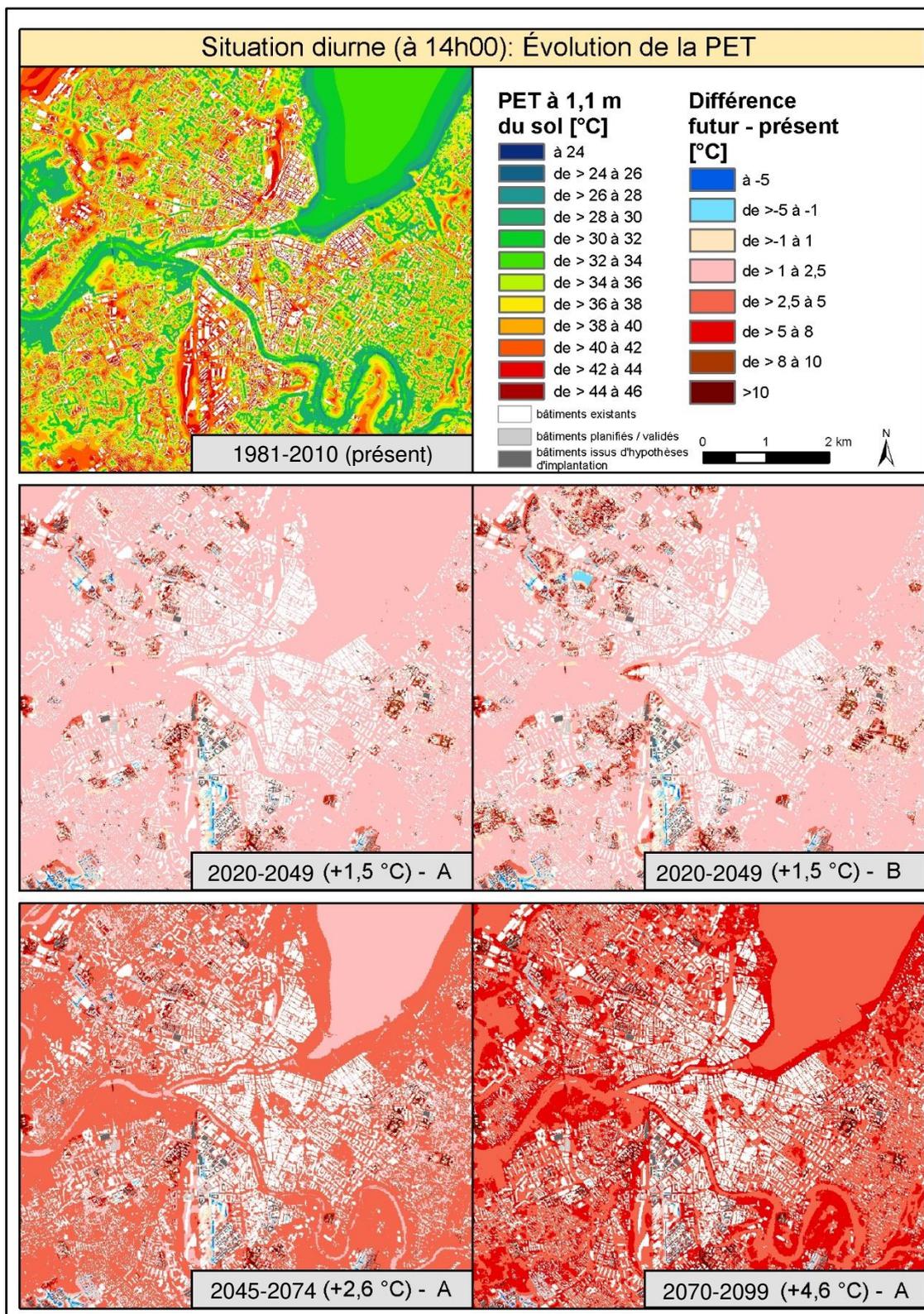


Fig. 32: Évolution de la PET diurne pour les périodes futures 2020-2049, 2045-2074 et 2070-2099 avec les scénarios de développement A (milieu gauche et bas) et B (milieu droit)²¹

²¹ Dans les cartes de l'évolution des températures, les bâtiments sont indiqués en noir s'il y a un bâtiment à l'endroit correspondant dans la situation actuelle ou dans le futur. Dans ce contexte aucune valeur de PET n'est disponible pour les emplacements des bâtiments, car il s'agit de la PET de l'air extérieur.



Comme la température de l'air (voir la fin du chapitre 4.1), la PET n'augmentera pas de manière uniforme dans le canton à l'avenir (Fig. 32). Ici aussi, les taux de changement les plus importants se produiront dans le domaine des zones de développement et seront à la fois négatifs (bleu ; diminution de la PET par rapport à la situation actuelle) et positifs (rose - rouge - marron ; augmentation de la PET par rapport à la situation actuelle). En raison de la hausse des températures de l'air et de l'augmentation du degré de l'imperméabilisation dans la plupart des zones de développement, la PET a tendance à augmenter par rapport à la situation actuelle. Toutefois, l'ombrage supplémentaire par des arbres (par exemple, le quartier du PAV) ou par de nouveaux bâtiments (par exemple, dans la zone de la société coopérative Jardins Familiaux de Villars) entraînera également une réduction de la PET et donc une amélioration de la situation bioclimatique pendant la journée.

5. Carte de l'analyse climatique

La carte de l'analyse climatique 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 zones de peuplement et de circulation, elle représente 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 heures du matin. En dehors du canton, les résultats de la modélisation permettent une représentation du processus général, mais en raison du niveau de détail plus faible ils ne permettent pas une analyse plus approfondie ou la dérivation de mesures spécifiques à une zone (en particulier vers la frontière de la zone d'étude).

COMPARAISON ENTRE LES SITUATIONS DE JOUR ET DE NUIT

Alors que l'effet d'îlot de chaleur urbain ainsi que les courants d'air froid en direction de l'agglomération se développent pendant la nuit, la situation bioclimatique pendant la journée est principalement influencée par la « température ressentie » (PET). Les zones vertes (en particulier les terres arables) se réchauffent fortement pendant la journée et sont donc aussi chaudes que les zones bâties. Comme le niveau de température des pelouses et des zones bâties est égalisé pendant la journée, l'effet d'îlot de chaleur urbain n'est que faiblement prononcé ou n'existe pas du tout dans de nombreuses zones. Dans ce contexte, la température de l'air à 14 heures est indiquée pour la situation de jour plutôt que pour l'effet d'îlot de chaleur urbain (voir la Fig. A 9 de l'annexe). Pour une comparaison entre les situations de jour et de nuit, la température de l'air à 14 heures peut être comparée à la température de l'air à 4 heures du matin (voir la Fig. A 4 de l'annexe).

En raison des faibles différences de température entre la ville et les environs pendant la journée, les brises thermiques ne sont pas aussi prononcées que la nuit. En outre, des vents ascendants de pente se produisent pendant la journée, tandis que des vents descendants de pente soufflent pendant la nuit (cf. chapitre 2.1). La nuit, les vents de pente contribuent à la réduction du stress thermique en permettant aux masses d'air froid des environs d'atteindre les zones peuplées de la vallée. Les vents ascendants en pente pendant la journée ne neutralisent pas de manière significative la charge thermique, mais peuvent contribuer au mélange de la couche d'air près du sol et provoquer une dilution des polluants atmosphériques. Par conséquent, le champ de vent près du sol pendant la journée ne fournit aucune



information significative concernant la charge thermique pendant la journée. La charge thermique pendant la journée est mieux décrite par la PET, qui résume en une seule quantité l'effet total de la température de l'air, du rayonnement, de la vitesse du vent et de l'humidité. La PET à 14 heures (Fig. A 7 en annexe) est donc un élément essentiel pour la description de la situation diurne.

La température de l'air et la PET à 14 heures permettent de décrire la situation de jour, tant pour le présent (Fig. A 7 et A 9 en annexe) que pour le futur (Fig. A 8 et A 10 en annexe). La carte de l'analyse climatique de la situation nocturne décrit également la situation actuelle et future et est expliquée plus en détail ci-dessous.

5.1 SITUATION ACTUELLE

Dans la carte de l'analyse climatique (Fig. 33, Fig. A 11 en annexe pour l'ensemble du canton), la surchauffe nocturne de la zone aménagée est basée sur la différence de température par rapport aux zones couvertes de gazon²² de toute la zone d'étude, qui ont une température moyenne de l'air de 14,4 °C dans les conditions supposées. L'**effet d'îlot de chaleur** constitue l'écart par rapport à cette valeur de référence. Par rapport aux valeurs absolues de température, cette représentation offre l'avantage que la surchauffe de la zone aménagée est également largement valable dans d'autres conditions météorologiques – bien que l'effet d'îlot de chaleur soit généralement plus prononcé dans les conditions autochtones. La température nocturne moyenne de l'air sur l'ensemble de la zone bâtie du canton de Genève est légèrement inférieure à 17,5 °C, ce qui donne un effet d'îlot de chaleur moyen de 3,1 °C.

Pour les espaces verts et ouverts, les résultats du modèle du débit d'air froid sont présentés sous forme de couleurs de surface graduées. Le débit moyen d'air froid sur l'ensemble des espaces verts et ouverts du canton est d'environ 21 m³/(s*m). En outre, le champ d'écoulement au niveau du sol est représenté par une flèche dont la signature est issue d'un vent de 0,1 m/s, considéré comme efficace du point de vue climato-écologique. Comme pour la représentation des différents paramètres (cf. chapitre 4.2), le champ d'écoulement a été agrégé à une résolution de 200 m pour une meilleure lisibilité de la carte. Les systèmes éoliens à petite échelle (par exemple, la canalisation des vents dans les tronçons de route étroits) ne sont pas visibles sur la carte ; ces informations détaillées doivent être tirées des données raster sur une base de 10 m. En plus du champ d'écoulement modélisé, la carte met en évidence les processus d'air froid spéciaux qui jouent un rôle important dans le canton de Genève. Il s'agit notamment des écoulements d'air froid provenant des pentes et des flux d'air froid multidirectionnels provenant des sommets des collines et/ou des espaces verts particulièrement frais. Les zones d'impact de l'air froid, les zones de génération d'air froid et les zones de processus sont également représentées.

Les zones de peuplement peuvent être subdivisées en zones suffisamment ventilées et donc généralement en structures de peuplement favorables au climat ainsi qu'en zones de stress climatique. La **zone d'impact de l'air froid** caractérise le débit d'air froid proche du sol des espaces verts vers les bâtiments adjacents pendant une nuit d'été autochtone. Cela s'accompagne du fait que les bâtiments de la zone d'impact présentent des conditions comparativement plus favorables la nuit. Les zones d'impact de l'air froid sont définies comme des zones résidentielles, commerciales et de circulation au sein du canton, traversées par un débit d'air froid supérieur à la moyenne > 21 m³/(s*m) ou qui atteignent des vitesses de vent d'au moins 0,2 m/s près du sol. La représentation se fait en raster au niveau des résultats du modèle, c'est-à-dire que si nécessaire, seules des parties d'un quartier ou d'une rue sont représentées comme zone d'impact de l'air froid. Dans le canton, la moitié de la surface bâtie (42 %) n'est pas une zone

²² Il s'agit de la température de l'air au-dessus des pelouses à 2 m au-dessus du sol.

d'impact de l'air froid. Elle est plus prononcée dans les zones de collines moins densément construites du canton.

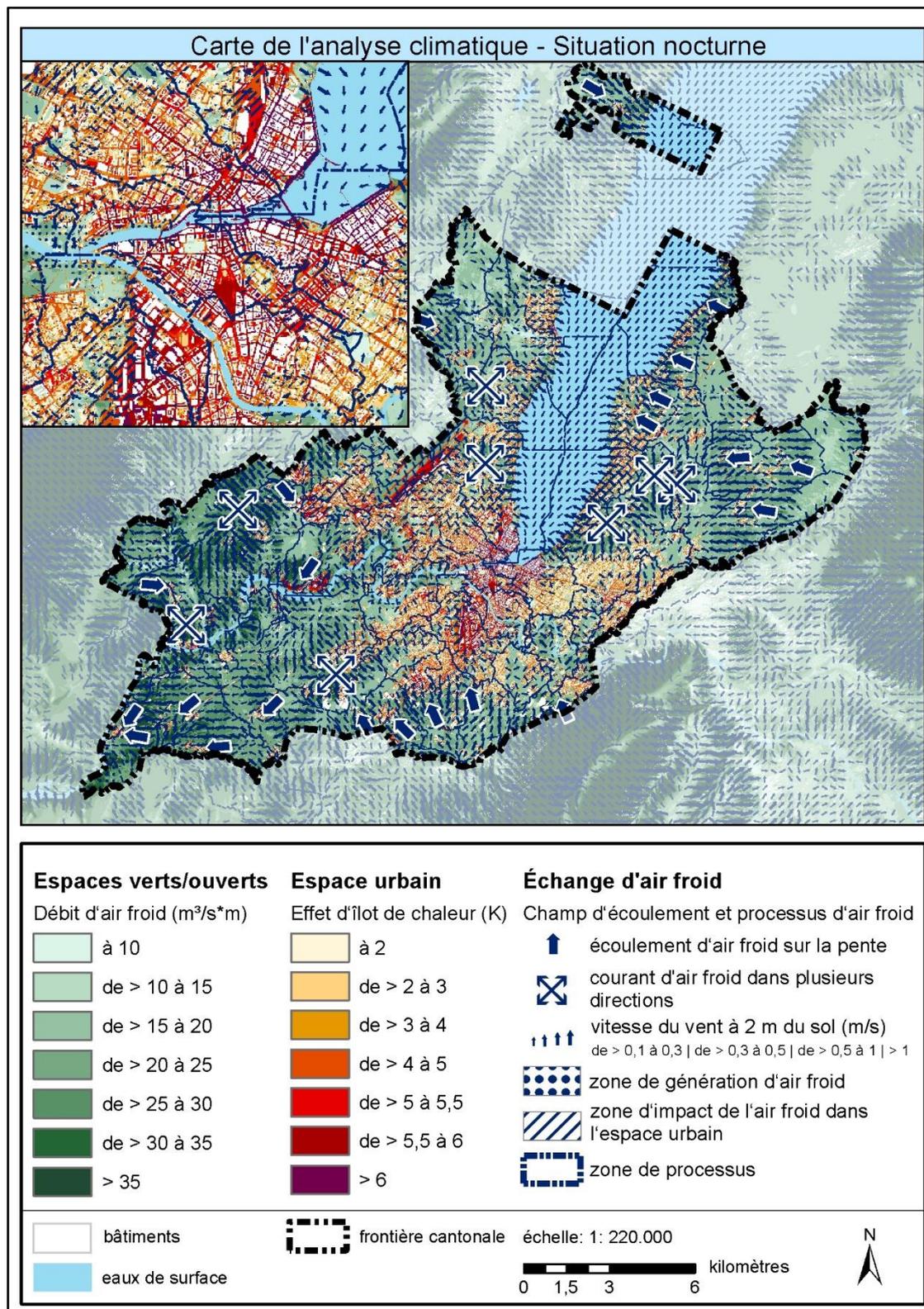


Fig. 33: Carte de l'analyse climatique du canton de Genève (situation actuelle de nuit)

Les **écoulements d'air froid** se produisent **sur une zone de pentes** non aménagées et se caractérisent par un débit d'air froid supérieur à la moyenne pour les espaces verts ou par des vitesses de vent d'au moins 0,3 m/s près du sol. En raison de la densité comparativement plus élevée de l'air froid, ils descendent en



suivant la pente. En raison de cette « accélération », les écoulements d'air froid sur une zone de pente ont généralement des vitesses d'écoulement plus élevées que les vents purement thermiques, qui se produisent en raison des différences de température. Une partie des écoulements d'air froid est dirigée vers le lac Léman, plus bas et plus chaud, et ventile une grande partie de la zone bâtie environnante. Il s'agit notamment des écoulements d'air froid dans le nord-est du canton, par exemple dans les communes de Collonge-Bellerive, Anières et Céligny. D'autres écoulements d'air froid sont situés dans les communes de l'est (par exemple Jussy, Meinier), du sud (par exemple Veyrier, Plan-les-Ouates), du sud-ouest (par exemple Laconnex, Chancy), de l'ouest (par exemple Satigny, Dardagny) et du nord-ouest (par exemple Collex-Bossy). La ville de Genève, qui se caractérise par une forte densité de construction et de faibles différences de relief, ne présente pas d'écoulements d'air froid importants. Les débits à petite échelle (par exemple le long des routes) peuvent apporter un soulagement local, mais leur effet n'est pas comparable aux écoulements d'air froid dans les communautés périphériques.

Dans le canton de Genève, il existe également un certain nombre d'espaces verts qui, la nuit, transportent leur air frais non seulement dans une direction, mais aussi dans plusieurs directions dans l'environnement bâti. Beaucoup de ces espaces verts sont situés dans la zone des sommets de collines et provoquent ainsi des ***courants d'air froid thermo-orographiques multidirectionnels***, qui atteignent des débits d'air froid ou des vitesses de vent aussi élevés que les écoulements d'air froid sur une zone de pente. De tels systèmes d'écoulement sont formés dans 8 zones différentes du canton, dont Vandœuvres (Chemin Vert), Meinier (Réserve naturelle du Marais du château) et Pregny-Chambesey (Chemin Palud). Les flux sont très étendus et dépassent généralement les limites des municipalités. Dans la ville de Genève, ces mouvements d'air à grande échelle ne sont pas observés, mais certains espaces verts du centre-ville (par exemple le Parc des Bastions, le Parc Bertrand et le Cimetière des Rois) forment ce qu'on appelle des « ***vents de parc*** » (en anglais ***park breeze***). Il s'agit de flux compensatoires induits thermiquement provenant d'un espace vert entouré de constructions qui est intégré dans un environnement nettement plus chaud. Cependant, les vents de parc dans la ville de Genève sont relativement faibles avec des débits d'air froid généralement inférieurs à $10\text{-}15 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$. En outre, la portée des vents de parc est très limitée et dépend fortement des obstacles à l'écoulement dans les environs. Des rues larges (par exemple le boulevard de Saint-Georges) ainsi que d'autres structures à faible rugosité et une orientation des corps de bâtiment parallèle aux vents (par exemple au nord du Parc Bertrand) favorisent une profonde pénétration de l'air plus froid du parc. Cependant, les espaces verts du centre-ville pendant la journée – notamment en raison de leur forte proportion d'arbres – jouent un rôle plus important que la nuit en tant qu'espaces de compensation (cf. carte indicative de planification au chapitre 6).

Les ***zones de génération d'air froid*** marquent les espaces verts avec un taux de production d'air froid particulièrement élevé et alimentent les différents flux d'air froid. Les zones vertes ont été désignées comme zones de génération d'air froid si elles produisent au moins $20,5 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ d'air froid. La limite est la somme de la valeur moyenne du taux de production d'air froid des espaces verts de Genève et de 0,5 fois l'écart-type du taux de production d'air froid des espaces verts (sur la base de la situation à 4 heures du matin).

Les ***zones de processus*** ont été identifiées sur la base d'une analyse des bassins versants selon King (King 1973). Les zones de processus climato-écologiques sont définies comme des zones contiguës plus grandes avec un schéma d'écoulement uniforme et supérieur. Dans une première étape, les bassins versants sont identifiés sur la base du modèle numérique de terrain. Les bassins versants sont déterminés à partir du résultat du calcul des directions et des trajectoires de l'écoulement (zones basses ou dépressions dans lesquelles l'air froid s'écoule). Pour chaque trajectoire de l'écoulement définie, on détermine les cellules à partir desquelles l'air froid y pénètre. Ces cellules se voient ensuite attribuées les numéros



d'identification des trajectoires de l'écoulement correspondantes. Toutes les cellules ayant le même numéro d'identification appartiennent donc à un même bassin versant. Cependant, comme dans chaque bassin versant, seuls les vents induits par le relief sont pris en compte, mais pas les brises thermiques. La délimitation des bassins versants a ensuite été révisée manuellement et ajustée avec le champ de vent à 2 m de hauteur. Les zones de processus résultent de cette étape de révision. Le canton de Genève est divisé en 58 zones de processus différentes, dont la superficie varie entre 132 et 1702 ha.

5.2 SITUATION FUTURE

Sur la base du scénario de développement A (cf. Fig. 20 au chapitre 3.3) et de la période 2020-2049, une carte de l'analyse climatique pour la situation future a été élaborée (voir Fig. A 12 en annexe). À l'avenir, les pelouses de la zone d'étude se réchaufferont en moyenne de 1,4 °C à 4 heures du matin, ce qui donnera une température moyenne de 15,8 °C. Sur la base de cette valeur de référence, le futur effet d'îlot de chaleur dans l'espace urbain a été déterminé²³. Avec le changement climatique, l'espace urbain ne se réchauffe que légèrement et de manière disproportionnée par rapport aux espaces verts et ouverts, ce qui se traduit par un effet d'îlot de chaleur moyen plus élevé (environ 0,1 °C). L'effet d'îlot de chaleur maximal n'augmente que légèrement, passant d'environ 7,7 °C à 7,75 °C. Cependant, l'effet d'îlot de chaleur urbain ne décrit que la surchauffe des zones bâties par rapport à la zone environnante. En termes absolus, la charge thermique augmente en raison du changement climatique : après tout, sur la période 2020-2049, l'espace urbain est en moyenne environ 1,5 °C plus chaud que dans la situation actuelle.

Le processus de l'air froid restera largement intact même avec le changement climatique et la réalisation des zones de développement. Les processus d'air froid à grande échelle, les écoulements d'air froid sur la pente ou dans plusieurs directions resteront. L'emplacement des zones de génération d'air froid et des zones d'impact de l'air froid ne change que légèrement en raison du changement climatique. Les projets de construction ont des effets importants sur le champ d'écoulement de l'air froid, mais aussi sur la température de l'air et la PET, qui, contrairement au changement climatique, n'ont cependant qu'un effet local (cf. évolution des paramètres climatiques au chapitre 4).

²³ Effet d'îlot de chaleur futur (°C) = température de l'air nocturne (°C) dans l'espace urbain - 15,8 °C



6. Carte indicative de planification

La carte indicative de planification se réfère à la période future 2020-2049 et se base sur le scénario de développement A (développements jusqu'en 2035, cf. Fig. 20 au chapitre 3.3). Le matériel cartographique est destiné à servir de base de planification pour l'avenir en situant dans l'espace les futures zones de charge et les espaces verts dignes de protection et en fournissant des indications générales de planification. Semblables à la carte de l'analyse climatique, des cartes indicatives de planification (CIP) distinctes ont été créées pour la situation de jour et de nuit, mais qui ne concernent que le canton de Genève. L'évaluation de la charge bioclimatique dans la zone aménagée (espace d'action) ainsi que l'importance des espaces verts comme 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'est-à-dire 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 et en déduire des informations importantes à 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 ; Fig. 34).

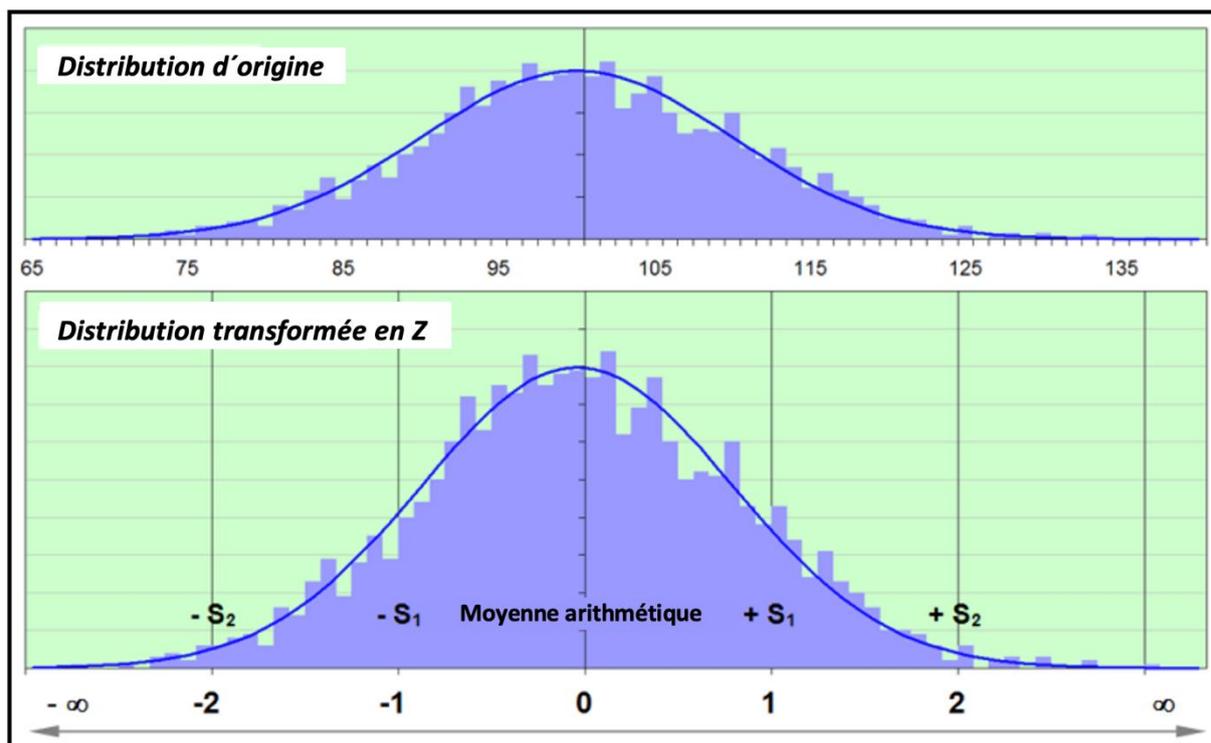


Fig. 34: Transformation en Z pour la normalisation de l'évaluation comparative des paramètres

6.2 ÉVALUATION DES ZONES RÉSIDENTIELLES, INDUSTRIELLES ET ROUTIÈRES (ESPACE D'ACTION)

La zone de peuplement et l'espace routier représentent la principale sphère d'action des processus climatiques urbains. La dérivation de la situation de la charge bioclimatique est décrite ci-dessous.

6.2.1 ÉVALUATION DE LA SITUATION NOCTURNE

La nuit, ce n'est pas tant le séjour à l'extérieur qui fait l'objet d'une évaluation, mais plutôt la possibilité d'un sommeil réparateur à l'intérieur. La directive VDI 3787, fiche 2, indique que « la température de l'air extérieur est la variable déterminante » pour l'évaluation de la situation nocturne et qu'on peut supposer une relation approximative directe entre l'air extérieur et l'air intérieur (VDI 2008b, 25). Les températures optimales de sommeil sont généralement données comme étant de 16 à 18 °C (UBA 2016), c'est pourquoi le Climate Service Center Germany définit son « Indice de sommeil de mauvaise qualité » comme étant les nuits où la température ne descend pas en dessous de 18 °C (GERICS 2019). Les nuits tropicales avec une température minimale de ≥ 20 °C sont considérées comme particulièrement stressantes – cependant, une échelle d'évaluation comparable à la PET n'existe pas (encore) pour la situation nocturne intérieure.

Pour la carte indicative de planification de nuit, l'évaluation spatiale a été basée sur la surchauffe nocturne (température de l'air). Contrairement à la carte de l'analyse climatique, l'évaluation est basée sur une transformation en Z pour saisir les différences relatives dans le canton. Pour une meilleure différenciation, la charge bioclimatique a été divisée en cinq classes, de *très favorable* à *très défavorable* (Tab. 3). Comme dans les zones industrielles, l'espace de la rue²⁴ est moins mis en avant la nuit, mais les places et les rues chauffées dégagent leur chaleur la nuit et influencent donc également la situation des bâtiments environnants.

²⁴ Seules les rues pour lesquelles une géométrie appropriée était disponible ont pu être évaluées (dérivée des géodonnées linéaires ROUTES_VECT25_ETENDU.shp). En outre, d'importantes places urbaines ont été évaluées. L'espace routier restant dans le canton ainsi que les zones ferroviaires sont sans évaluation.



Tab. 3: Classification de la charge thermique nocturne dans l'espace d'action à l'aide de la transformation en Z (la valeur moyenne et l'écart-type sont basés sur la température nocturne de l'air de la zone de peuplement ou de l'espace routier dans le canton de Genève).

Valeur Z moyenne	Classement qualitatif	Température de l'air (°C) – Zone de peuplement *	Température de l'air (°C) – Espace routier **
à -1	1 = Très favorable	à 17,1	à 18,5
> -1 à -0,3	2 = Favorable	> 17,1 à 18,2	> 18,5 à 19,5
> -0,3 à 0,3	3 = Moyenne	> 18,2 à 19,2	> 19,5 à 20,3
> 0,3 à 1	4 = Défavorable	> 19,2 à 20,3	> 20,3 à 21,4
> 1	5 = Très défavorable	> 20,3	> 21,4

* Valeur moyenne = 18,68 °C ; écart-type = 1,61 °C | ** Valeur moyenne = 19,9 °C, écart-type = 1,45 °C
(Les limites des classes pour les colonnes 3 et 4 sont arrondies jusqu'à une décimale)

6.2.1 ÉVALUATION DE LA SITUATION DE JOUR

L'indice bioclimatique humain PET à 14:00 heures a été utilisé pour évaluer la situation de jour (voir chapitre 4.3). L'évaluation du stress thermique dans la zone de peuplement et l'espace routier du canton de Genève a été divisée en cinq classes, de *très favorable* à *très défavorable* (Tab. 4), analogue à la situation de nuit sur la base des valeurs transformées en z.

L'évaluation bioclimatique pendant la journée est une mesure de la qualité du séjour à l'extérieur des bâtiments. Cela exerce une certaine influence sur la situation à l'intérieur des bâtiments, mais le climat intérieur dépend de nombreux autres facteurs et ne peut être déterminé ici.

Tab. 4: Classification de la charge thermique diurne dans l'espace d'action à l'aide de la transformation en Z (la valeur moyenne et l'écart-type sont basés sur la PET de la zone de peuplement ou de l'espace routier dans le canton de Genève).

Valeur Z moyenne	Classement qualitatif	PET (°C) – Zone de peuplement *	PET (°C) – Espace routier **
à -1	1 = Très favorable	à 35,8	à 35,9
> -1 à -0,3	2 = Favorable	> 35,8 à 38,4	> 35,9 à 38,5
> -0,3 à 0,3	3 = Moyenne	> 38,4 à 40,7	> 38,5 à 40,6
> 0,3 à 1	4 = Défavorable	> 40,7 à 43,3	> 40,6 à 43,1
> 1	5 = Très défavorable	> 43,3	> 43,1

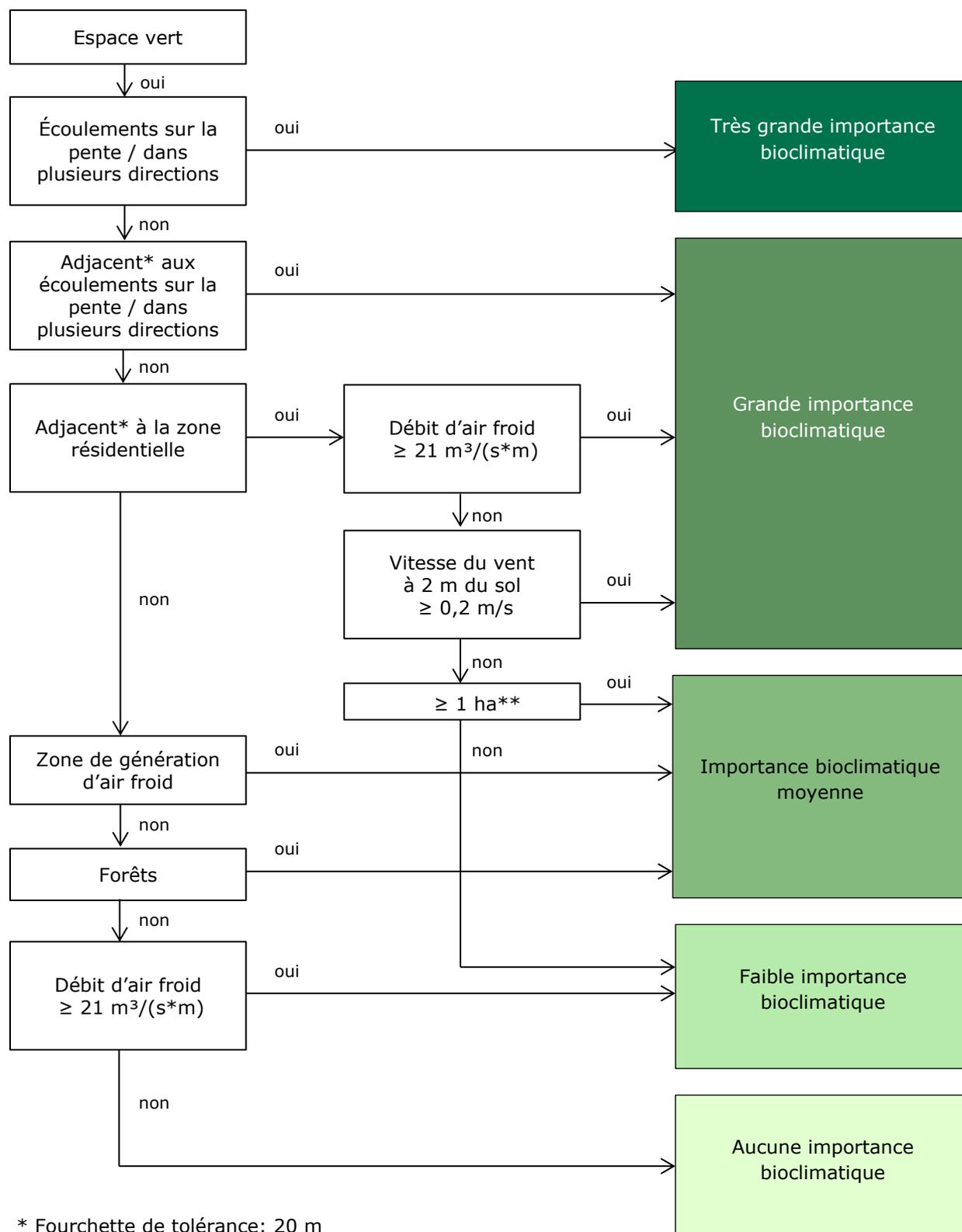
* Valeur moyenne = 39,55 °C ; écart-type = 3,76 °C | ** Valeur moyenne = 39,53 °C, écart-type = 3,59 °C
(Les limites des classes pour les colonnes 3 et 4 sont arrondies jusqu'à une décimale)

6.3 ÉVALUATION DES ESPACES VERTS ET OUVERTS (ESPACE DE COMPENSATION)

Les cartes indicatives de planification se concentrent sur l'importance climatique urbaine des espaces verts et leur sensibilité aux changements d'utilisation. L'air froid généré au-dessus des espaces verts pendant une nuit d'été autochtone n'est considéré comme pertinent que s'il est lié aux zones de peuplement qui bénéficient de leur compensation. Si, par contre, un espace vert ne remplit pas une fonction pour la zone bâtie actuelle ou ne représente pas un espace de compensation, sa signification climato-écologique doit être classée comme moins importante. En cas de développement supplémentaire dans ces domaines, leur fonction peut changer et devoir être réévaluée.

Les espaces verts ont été évalués séparément pour la situation de jour et de nuit dans une procédure partiellement automatisée et divisés en cinq niveaux d'importance bioclimatique (aucune à très grande).

6.3.1 ÉVALUATION DES ESPACES VERTS LA NUIT



* Fourchette de tolérance: 20 m

** Taille du réseau d'espaces verts (espace vert continu)

Fig. 35: Schéma d'évaluation de l'importance des espaces verts pour la situation nocturne



L'évaluation des espaces verts pendant la nuit s'est basée sur plusieurs critères dans un système d'évaluation hiérarchique. Entre autres, le bilan de l'air froid a été mis en avant. Les espaces verts avec des écoulements d'air froid sur la pente ou dans plusieurs directions se sont toujours vu attribuer la plus haute importance bioclimatique, ou ont toujours été considérés comme ayant une grande importance bioclimatique s'ils bordaient la première²⁵. En outre, la productivité de l'air froid et la proximité des espaces verts à la zone résidentielle jouent également un rôle. Les autres critères pertinents pour l'évaluation étaient le débit d'air froid (valeurs supérieures à la moyenne de $\geq 21 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$), la vitesse du vent (vent perceptible de $\geq 0,2 \text{ m/s}$ près du sol), le type d'espace vert (forêt ou pas de forêt) et la taille de l'espace vert ($\geq 1 \text{ ha}$). L'interaction des différents facteurs est résumée dans le schéma d'évaluation de la Fig. 35.

6.3.1 ÉVALUATION DES ESPACES VERTS LE JOUR

Pour la journée, l'évaluation des espaces verts est principalement basée sur la distance par rapport aux zones résidentielles et commerciales chargées et sur la charge thermique modélisée (PET). Contrairement à la situation nocturne, la qualité de séjour la plus élevée possible est également importante à proximité des zones commerciales afin d'offrir aux employés des lieux de refuge.

Tab. 5: Classification du climat des espaces verts pendant la journée à l'aide de la transformation en Z (la valeur moyenne et l'écart-type sont basés sur la PET des espaces verts et ouverts du canton de Genève).

Valeur Z moyenne	Classement qualitatif du climat de l'espace vert	PET (°C) – Espace vert *
à -1	1 = Très favorable	à 34
> -1 à -0,3	2 = Favorable	> 34 à 37,2
> -0,3 à 0,3	3 = Moyenne	> 37,2 à 39,9
> 0,3 à 1	4 = Défavorable	> 39,9 à 43
> 1	5 = Très défavorable	> 43

* Valeur moyenne = 38,51 °C ; écart-type = 4,48 °C

(Les limites de classes pour la colonne 3 sont arrondies jusqu'à une décimale)

Dans une première étape d'évaluation, le bioclimat des espaces verts genevois a été divisé en 5 classes en fonction de la PET (ou valeurs transformées en z) (Tab. 5). Dans une deuxième étape, la signification finale des espaces verts a été déterminée en combinant le climat des espaces verts avec une analyse de l'accessibilité (Tab. 6) : Les espaces verts ayant un bioclimat (très) favorable pendant la journée ont une très grande signification bioclimatique s'ils sont situés à distance de marche de zones d'habitation denses. Inversement, les espaces verts dont la situation bioclimatique est très défavorable (PET > 43 °C) n'ont aucune signification bioclimatique, quelle que soit leur accessibilité. Selon le Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR, 2018), on distingue entre une très bonne accessibilité (300 m, 5 min de marche) et une bonne accessibilité (700 m, 10 min de marche). Par souci de simplicité, la distance de 300 ou 700 m est basée sur la distance linéaire, c'est-à-dire sans tenir compte des itinéraires et des temps d'attente réels, par exemple aux feux de circulation, aux passages à niveau et aux barrières.

²⁵ Cela était judicieux, entre autres, parce que les transitions sont fluides et qu'une démarcation claire était donc difficile à établir.



Tab. 6: Schéma d'évaluation de l'importance des espaces verts pour la situation diurne

Évaluation hiérarchique				
Climat de l'espace vert	(1) Accessibilité très facile des zones de peuplement à situation bioclimatique très défavorable	(2) Accessibilité facile des zones de peuplement à situation bioclimatique très défavorable / Très facilement accessible des zones de peuplement à situation bioclimatique défavorable	(3) Accessibilité facile des zones de peuplement à situation bioclimatique défavorable	(4) Autres espaces verts
Très favorable PET ≤ 34 °C	Très grande importance bioclimatique	Très grande importance bioclimatique	Grande importance bioclimatique	Importance bioclimatique moyenne
Favorable PET de > 34 à 37,2 °C	Très grande importance bioclimatique	Grande importance bioclimatique	Importance bioclimatique moyenne	Importance bioclimatique moyenne
Moyen PET de > 37,2 à 39,9 °C	Grande importance bioclimatique	Importance bioclimatique moyenne	Faible importance bioclimatique	Faible importance bioclimatique
Défavorable PET de > 39,9 à 43 °C	Faible importance bioclimatique	Faible importance bioclimatique	Faible importance bioclimatique	Aucune importance bioclimatique
Très défavorable PET > 43 °C	Aucune importance bioclimatique	Aucune importance bioclimatique	Aucune importance bioclimatique	Aucune importance bioclimatique

* Accessibilité aux piétons:
 Accessibilité très facile = 300 m à vol d'oiseau
 Accessibilité facile = 700 m à vol d'oiseau

6.4 RÉSULTATS CARTES INDICATIVES DE PLANIFICATION

6.4.1 SITUATION NOCTURNE

La carte indicative de planification complète pour la situation nocturne est présentée dans la Fig. A 13 en annexe (carte miniature dans la Fig. 36). Elle évalue le niveau de charge thermique dans la zone bâtie et l'importance des espaces verts comme espace de compensation la nuit. En fonction de l'évaluation des zones, les sensibilités à la densification ultérieure ou aux changements d'occupation des sols et la nécessité de mesures d'adaptation au climat sont indiquées (Tab. 7, Tab. 8). Contrairement à la situation diurne, la situation nocturne se concentre principalement sur le bilan de l'air froid (par exemple, la production d'air froid et son transport dans la zone de peuplement).

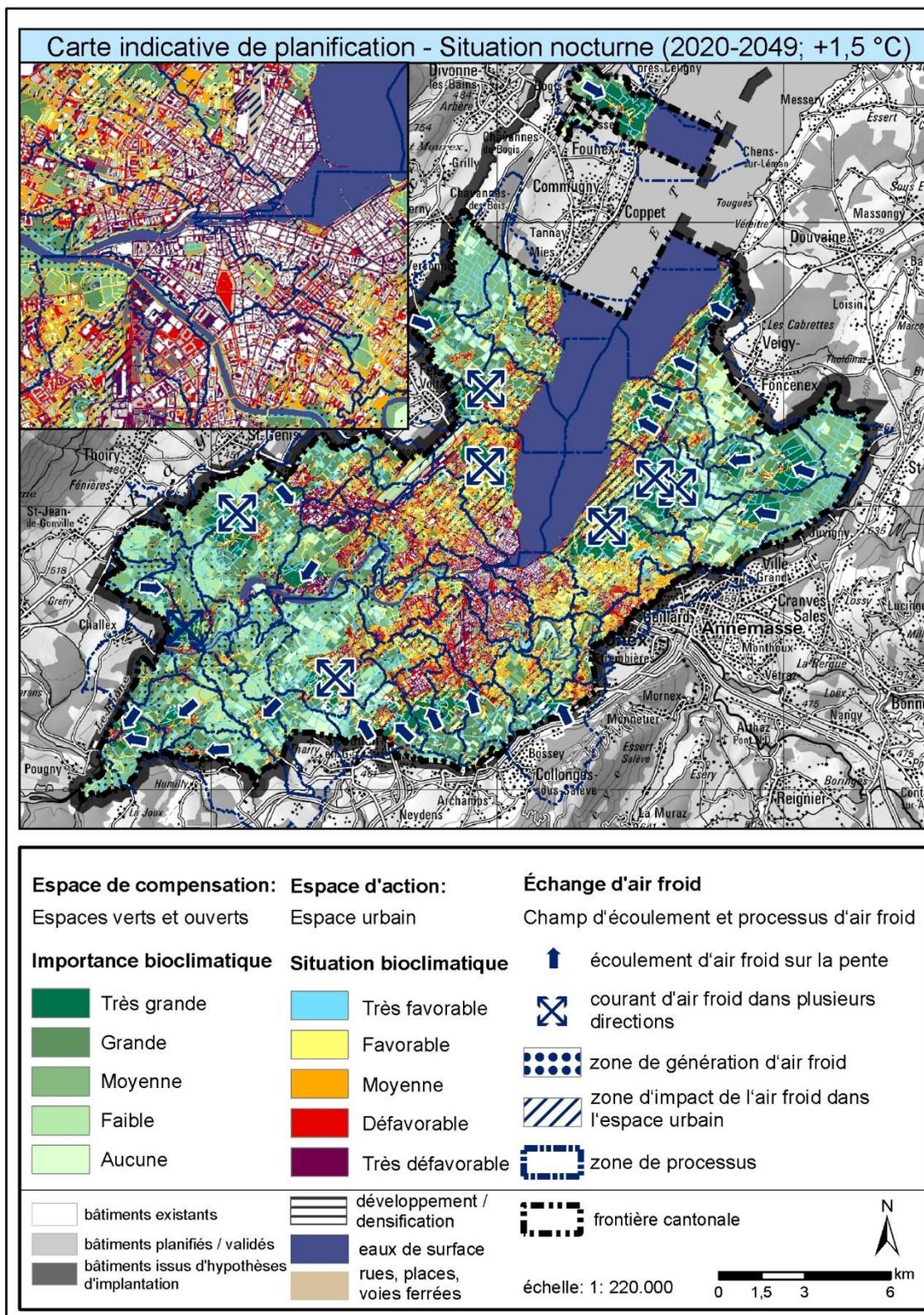


Fig. 36: Carte indicative de planification pour la situation nocturne (légende raccourcie)

Un peu moins de 6500 ha du canton de Genève ont été attribués aux zones de peuplement dans la carte indicative de planification.²⁶ Parmi celles-ci, environ un tiers des zones d'habitat du canton sont

²⁶ Le chiffre se réfère à l'occupation des sols à prévoir d'ici 2035 (scénario de développement A). Il ne vise qu'à fournir une estimation approximative.



caractérisées par une situation bioclimatique favorable ou très favorable (Fig. 37). Il s'agit en particulier des zones résidentielles avec des maisons individuelles, qui présentent généralement une proportion relativement élevée de verdure (par exemple, de grandes parties de Chêne-Bougeries). Un peu moins d'un autre tiers sont des zones d'habitat à situation bioclimatique moyenne, par exemple dans la moitié nord de Thônex. Le tiers restant peut être affecté à des zones dont la situation est défavorable ou très défavorable. Il s'agit en particulier de la zone urbaine et des grandes zones commerciales, qui présentent généralement un degré d'imperméabilisation élevée et restent relativement chaudes la nuit.

Tab. 7: Espace d'action - Indications de planification pour la situation nocturne

Évaluation de la situation bioclimatique	Espace d'action : Espaces urbains Indications de planification générales
1 = très favorable	Structure d'habitat majoritairement ouverte 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.
2 = favorable	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.
3 = moyenne	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.
4 = défavorable	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).
5 = très défavorable	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 désimperméabilisation doivent être prises (par exemple, parcs de poche, végétalisation des cours intérieures des blocs).

Dans le cas des espaces verts, un peu plus de la moitié des zones (51,9 %) ont une importance bioclimatique élevée à très élevée. Il s'agit principalement de vastes terres arables, qui non seulement se refroidissent particulièrement fort la nuit, mais transportent également de grandes quantités d'air froid dans la zone de peuplement plus chaude. Il existe 30 zones différentes réparties sur le canton (écoulements d'air froid sur la pente ou dans plusieurs directions), par lesquelles une quantité particulièrement importante d'air froid atteint la zone de peuplement. Il est important de préserver autant que possible l'effet bénéfique de ces espaces verts et de ne pas les détériorer de manière significative. Environ un quart des espaces verts de Genève ont une fonction moyenne la nuit. Il s'agit notamment de certains parcs du centre-ville (par exemple le Cimetière des Rois, le Parc des Bastions et le Parc Bertrand). Toutefois, en raison de leur taille réduite et du développement dense des environs, les parcs du centre-ville ne sont pas d'aussi bons fournisseurs d'air froid que les vastes terres agricoles situées à l'extérieur. En revanche, pour la situation diurne, les parcs jouent un rôle encore plus important (cf. chapitre 6.4.2). Les espaces verts isolés, où aucune quantité particulièrement importante d'air froid n'est



produite ni transportée, n'ont que peu ou pas d'importance la nuit (22,9 % des zones). En règle générale, les humains ne peuvent pas en bénéficier, mais l'importance de ces espaces verts peut augmenter au cours d'un nouveau développement.

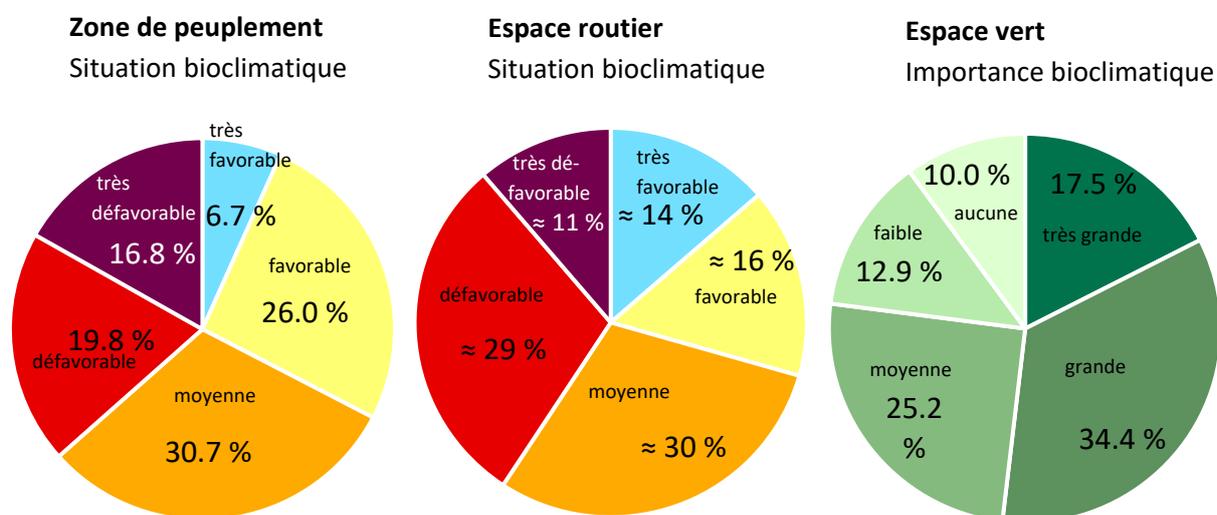


Fig. 37: Évaluation de l'espace d'action et de l'espace de compensation pour la situation nocturne : Part des surfaces dans le canton de Genève

Tab. 8: Espace de compensation – Indications de planification pour la situation nocturne

Évaluation de l'importance bioclimatique	Espace de compensation : Espaces verts et espaces ouverts Indications de planification générales
1 = très grande importance	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 sont déjà autorisées par des planifications urbaines en force doivent être effectuées en tenant compte des fonctions climatiques. Le passage efficient 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.
2 = grande importance	Les espaces de compensation climato-écologiques qui sont particulièrement importants pour la structure actuelle de l'habitat et qui sont très sensibles à l'intensification de l'utilisation. Les interventions structurelles devraient être évitées complètement ou, si elles sont déjà autorisées par des planifications urbaines en force, devraient être effectuées en tenant compte des fonctions climatiques. Il faut s'efforcer d'obtenir le passage efficient 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.
3 = importance moyenne	Les espaces de compensation climato-écologique qui sont importants pour la structure de peuplement actuelle et qui sont très sensibles à l'intensification de l'utilisation. Les interventions structurelles doivent tenir compte des fonctions climatiques et viser le passage efficient de flux d'air entre bâtiments adjacents.
4 = faible importance	Des espaces de compensation climato-écologique qui complètent la structure de peuplement actuelle 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.
5 = aucune importance	Les espaces qui ne remplissent aucune fonction climatique pertinente pour la structure de peuplement actuelle et ne sont pas très sensibles à l'intensification de l'utilisation. Les interventions structurelles doivent être menées en tenant compte des fonctions climatiques.

6.4.2 SITUATION DIURNE

La carte indicative de planification de la situation diurne évalue le niveau de charge thermique dans la zone d'habitation ainsi que l'importance des espaces verts comme espaces de compensation le jour à 14 heures (cf. la carte en annexe, Fig. A 14 ou carte miniature dans la Fig. 38).

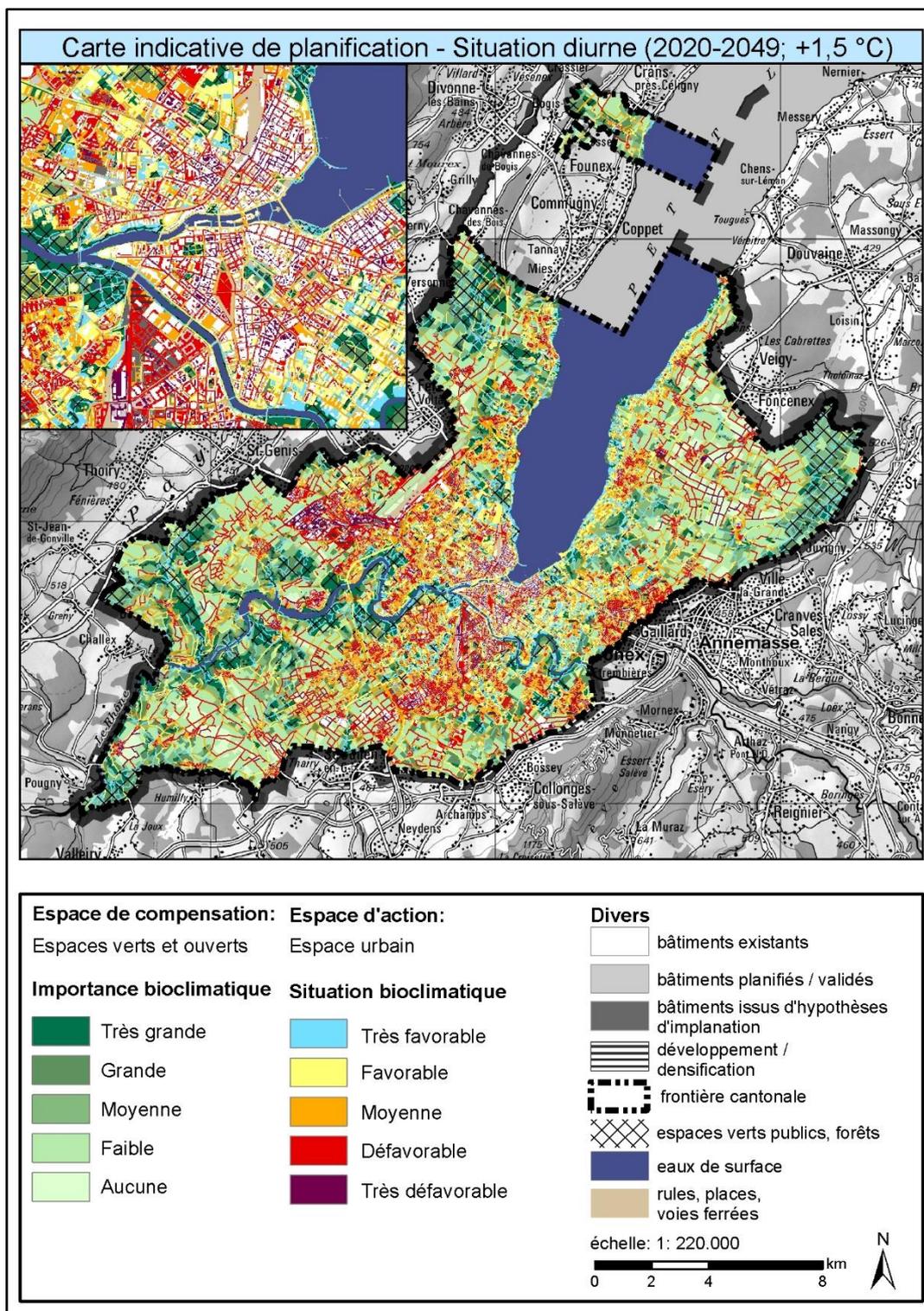


Fig. 38: Carte indicative de planification pour la situation diurne (légende raccourcie)

En fonction de l'évaluation des zones, les vulnérabilités à la densification ultérieure ou aux changements d'occupation des sols et la nécessité de mesures d'adaptation au climat sont indiquées. Alors que pour la



situation nocturne, l'équilibre de l'air froid est considéré de prime abord, l'accessibilité des espaces verts et surtout la situation d'ombrage jouent un rôle central. Les Tab. 9 et Tab. 10 contiennent donc des indications de planification générales qui se rapportent uniquement à la situation de jour et diffèrent donc des indications pour la situation de nuit.

Tab. 9: Espace d'action - Indications de planification pour la situation diurne

Évaluation de la situation bioclimatique	Espace d'action : Espaces urbains Indications de planification générales
1 = très favorable	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 (bus, tram, Léman Express). Le bioclimat très favorable doit être assuré.
2 = favorable	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 (bus, tram, Léman Express). Le bioclimat favorable doit être assuré.
3 = moyenne	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 (bus, tram, Léman Express). Pour la zone de peuplement, les espaces de compensation doivent être accessibles à pied. Il faut viser la meilleure situation d'ombrage possible et une proportion élevée de végétalisation.
4 = défavorable	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 (bus, tram, Léman Express). Une forte demande de mesures d'adaptation telles que la végétalisation et l'ombrage supplémentaires et, si nécessaire, la désimperméabilisation. Pour la zone de peuplement, les espaces de compensation doivent être facilement accessibles et à distance de marche.
5 = très défavorable	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 (bus, métros, etc.). Il existe une très forte demande pour des mesures d'adaptation telles que la végétalisation et l'ombrage ainsi que la désimperméabilisation supplémentaires. Dans la zone de peuplement, des espaces de compensation suffisants doivent être facilement accessibles et à distance de marche.

Dans la zone de peuplement, le bioclimat est favorable à très favorable sur environ 28,4 % des terres pendant la journée. De nombreuses zones de peuplement très favorables sont directement situées en bordure du lac Léman, mais aussi de l'Arve et en partie du Rhône. Cependant, l'effet de refroidissement pendant la journée n'est pas seulement causé par l'eau, mais aussi soutenu par une forte proportion d'arbres et de végétation. L'interaction entre l'eau et la végétation peut être décrite à l'aide de l'exemple de l'Arve : La rivière de montagne fraîche contribue à la réduction de la charge thermique dans son environnement immédiat. Dans la zone peu urbanisée proche de l'Arve, il existe des zones de peuplement (très) favorables, tandis que dans la zone industrielle et commerciale (rue François-Dussaud), seules des conditions moyennes à défavorables prévalent. Sans la proximité de l'Arve, la zone industrielle et commerciale serait peut-être comparable à la zone industrielle près de Zimeysa. Les conditions bioclimatiques moyennes représentent près d'un tiers de la superficie de l'agglomération et correspondent au bioclimat moyen prévu pour le canton de Genève pendant la journée. Il est représenté dans toutes les communes du canton, mais n'est pas encore considéré comme un hotspot de chaleur pour lequel des mesures sont recommandées d'urgence. Pour les zones de peuplement (très) défavorables, des mesures doivent être prises, dans la mesure du possible, pour améliorer le bioclimat. La priorité doit



être accordée aux zones où se trouve un nombre particulièrement élevé de personnes (centre-ville, notamment les places et les zones de loisirs).

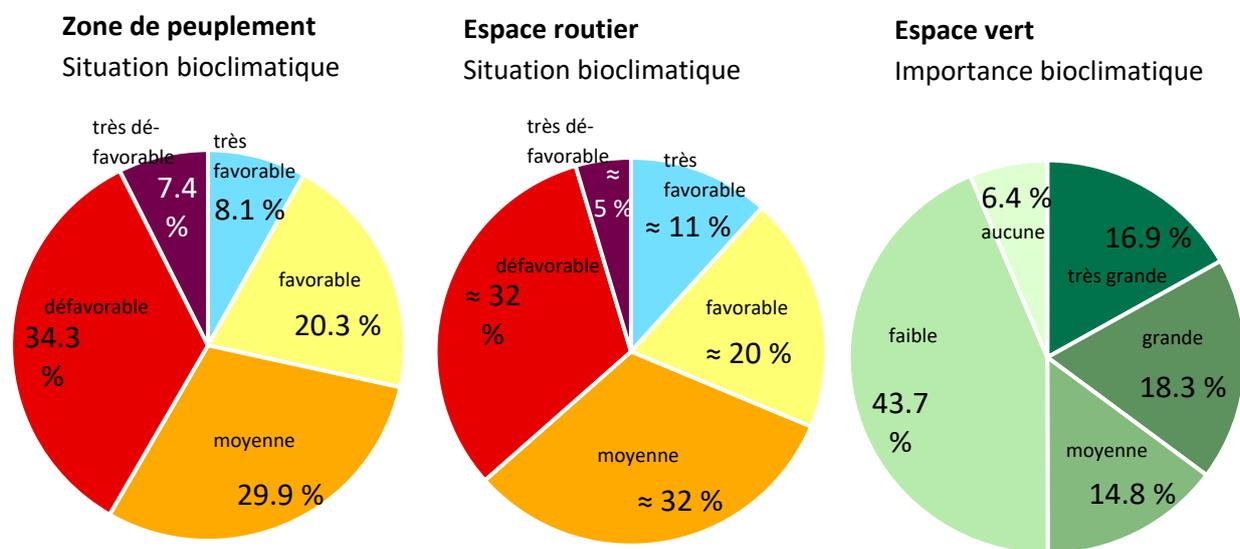


Fig. 39: Évaluation de l'espace d'action et l'espace de compensation pour la situation diurne : Part des surfaces dans le canton de Genève

35,2 % des espaces verts de Genève sont d'une grande ou très grande importance. Les parcs du centre-ville (par exemple le Parc des Bastions, le Parc Bertrand, le Parc Mon Repos, le Jardin Anglais et le Parc de la Grange) sont les principaux lieux de retraite de la population pendant la journée. Ils ont un bioclimat (très) favorable et sont en même temps (très) facilement accessibles depuis les zones de peuplement chargées de chaleur (c'est-à-dire avec une situation bioclimatique défavorable et très défavorable). Les forêts sont d'autres lieux de retraite, mais elles sont généralement situées à une certaine distance de la zone de peuplement surchauffée. 14,8 % des espaces verts ont une importance bioclimatique moyenne pendant la journée et ont donc un potentiel de valorisation élevé (augmentation de la proportion d'arbres ou amélioration de l'accessibilité de l'espace vert, mise en relation d'espaces verts). Environ la moitié des espaces verts du canton de Genève ont peu ou pas d'importance bioclimatique pendant la journée. Il s'agit principalement d'espaces arables et ouverts, mais aussi de zones de sport et de loisirs (par exemple le Centre Sportif de Rouelbeau). Toutefois, l'importance des zones doit toujours être examinée en fonction de la situation nocturne ; certains des espaces verts, plutôt insignifiants pour la situation diurne, sont importants pour la ventilation ou la production d'air froid la nuit et méritent donc d'être protégés (par exemple, les Jardins Familiaux de Villars).



Tab. 10: Espace de compensation – Indications de planification pour la situation diurne

Évaluation de l'importance bioclimatique	Espace de compensation : Espaces verts et espaces ouverts Indications de planification générales
1 = très grande importance	Espaces verts avec un bioclimat favorable à très favorable, qui peuvent être atteints à pied à partir des zones de peuplement chargées. Les éléments de végétalisation et d'ombrage doivent être préservés et protégés (irrigation si nécessaire), et une bonne accessibilité doit être assurée.
2 = grande importance	Les espaces verts ayant au moins un bioclimat moyen, qui peuvent être facilement atteints à pied depuis les zones de peuplement chargées ou les espaces verts ayant un bioclimat très favorable, qui peuvent être assez bien atteints à pied depuis les zones de peuplement chargées. Les éléments de végétalisation et d'ombrage doivent être préservés et protégés (irrigation si nécessaire) et éventuellement étendus. Une bonne accessibilité doit encore être assurée.
3 = importance moyenne	Espaces verts proches des zones de peuplement avec un bioclimat moyen à favorable, où l'influence bioclimatique positive des éléments de végétalisation prédomine. Les éléments de végétalisation et d'ombrage doivent être préservés et protégés (irrigation si nécessaire) et éventuellement étendus. Des espaces verts éloignés des zones de peuplement avec un bioclimat (très) favorable, qui ne sont pas accessibles à pied, mais qui peuvent servir de lieux de retraite. Dans ce cas, il convient de rechercher la mise en relation des espaces verts avec la zone de peuplement.
4 = faible importance	Espaces verts et ouverts avec un déficit d'ombrage (faible fonction compensatoire) ou une accessibilité insuffisante depuis les zones de peuplement chargées (ne convient pas comme lieu de retraite). Les éléments de végétalisation et d'ombrage doivent être développés ou étendus sur les espaces verts proches des habitations, en particulier les espaces verts publics (augmentation de la diversité microclimatique).
5 = aucune importance	Espaces ouverts ou espaces verts éloignés des zones de peuplement, avec peu d'ombrage et un rayonnement solaire intensif et donc un bioclimat défavorable (principalement des espaces gazonnés ou agricoles). Les éléments de végétalisation et d'ombrage doivent être développés ou étendus sur les espaces verts proches des habitations, en particulier les espaces verts publics (augmentation de la diversité microclimatique).

7. Évaluation climato-écologique des potentiels à bâtir

Le développement urbain durable est essentiel pour la santé humaine et pose des défis majeurs en termes de changement climatique et d'expansion urbaine. Ce chapitre est consacré à la question de savoir si certains développements dans le canton de Genève sont compatibles avec le climat et quels aspects doivent être pris en compte dans la mise en œuvre des projets pour que la situation climatique ne se détériore pas de manière significative.

7.1 MÉTHODE

L'évaluation climato-écologique des potentiels à bâtir est basée sur les résultats du modèle pour la période future 2020-2049, qui a été modélisée en utilisant à la fois le scénario de développement A (Genève jusqu'en 2035) et B (développement possible après 2035). Par rapport au scénario A, un total de 106 zones supplémentaires, appelées potentiels à bâtir, sont ajoutées dans le scénario de développement



B. Les réserves de potentiels à bâtir ne sont pas des développements validés dans les planifications en cours. Ils sont indiquées à titre indicatif et seront précisées et confirmés lors des planifications ultérieures. De plus, les informations données sont beaucoup plus lacunaires (cf. chapitre 3.3). C'est la raison pour laquelle ces données sont à interpréter avec une grande précaution. Les 106 zones de développement potentiel représentent environ 594 ha au total et comprennent l'extension urbaine, la densification ultérieure et le renouvellement urbain. L'évaluation des projets a été réalisée dans une perspective purement climatologique. Cela signifie que les zones de développement ou les potentiels à bâtir sont examinés en fonction de leur impact climatique (changement de la PET pendant la journée ainsi que du champ de vent et du débit d'air froid la nuit ; comparaison entre les scénarios de construction A et B). Outre le changement climatique dû au développement des bâtiments, l'importance ou la situation bioclimatique de la zone (avant la réalisation du projet) a également été un critère d'évaluation. À cet égard, les résultats des cartes indicatives de planification de jour et de nuit ont été utilisés. L'évaluation climato-écologique des potentiels à bâtir a été réalisée en 4 étapes, de « sans danger » à « non recommandé », et a été évaluée individuellement pour chaque périmètre. Il convient de noter que chaque zone de développement a été définie par une certaine extension, taille et densité de construction. Les caractéristiques supposées de la zone de développement peuvent être tirées des données d'entrée du modèle (voir chapitre 3.3). Si, en fin de compte, un type de développement différent de celui supposé dans les données d'entrée est réalisé, l'évaluation climato-écologique est également caduque. Comme pour la carte indicative de planification (cf. chapitre 6), il existe des notes et des recommandations pour chaque classe d'évaluation, qui sont résumées dans le Tab. 11.

Tab. 11: Évaluation climato-écologique des potentiels à bâtir

Évaluation climato-écologique du développement de l'espace	Indications générales	Part de l'espace [%]
(1) : Développement sans danger	Un développement des zones de cette catégorie peut être classé comme inoffensif pour le climat urbain, car il ne faut pas s'attendre à une perte de fonctions climato-écologiques importantes.	6 %
(2) à (3) : Développement avec des mesures d'optimisation justifiables	(2) Par rapport à la catégorie 3, le développement de ces zones est préférable, car les effets climato-écologiques sont comparativement faibles. Des mesures d'adaptation au climat doivent néanmoins être envisagées.	71,5 %
	(3) Ces zones ne doivent être développées que si elles ne présentent pas de désavantages importants pour les zones adjacentes. Cela peut être vérifié au moyen d'études approfondies, telles que des expertises qualitatives ou des analyses détaillées basées sur des modèles.	16,9 %
(4) : Développement non recommandé	Afin de maintenir un climat urbain sain, il convient d'éviter le développement de zones de cette catégorie. Les zones d'habitat environnantes et/ou les espaces verts existants sont menacés si le projet est mis en œuvre. En cas de développement de ces espaces, des études climato-écologiques approfondies sont recommandées.	5,6 %



L'évaluation n'indique pas si la mise en œuvre du projet prévu affectera principalement les fonctions climato-écologiques pendant la journée ou la nuit. Dans ce contexte, des informations supplémentaires sur la planification sont fournies pour certaines zones de développement :

-  Prêter attention à la situation climato-écologique pendant la journée : Les développements structurels ou les projets de densification ultérieure peuvent entraîner une détérioration notable de la situation bioclimatique pendant la journée. En cas d'aménagement de la zone, il faut veiller à ce qu'il y ait suffisamment d'arbres et d'ombre.

-  Prêter attention à la circulation de l'air froid pendant la nuit : La nuit, la surface remplit une fonction importante pour l'équilibre de l'air froid et contribue à la ventilation des zones de peuplement adjacentes. Si la zone est aménagée, les bâtiments doivent être alignés de telle sorte qu'ils ne présentent aucun obstacle à la circulation de l'air froid.

Sur la base de ces indications de planification supplémentaires, il apparaît clairement ce à quoi il faut prêter d'avantage attention en cas de réalisation (par exemple, des pelouses et des espaces d'écartement pour optimiser la situation nocturne, des arbres pour optimiser la situation diurne). Si les deux symboles sont représentés sur une zone de développement, les situations de jour et de nuit sont tout aussi importantes. Dans ce cas, il faut se demander si l'effet climatique doit être maintenu principalement la nuit ou le jour ou s'il ne doit pas être altéré si fortement.

7.2 RÉSULTATS

La carte des résultats de l'évaluation climato-écologique des potentiels à bâtir (cf. Fig. A 15 en annexe ou Fig. 40 en miniature et Tab. 11) montre que la plupart des développements prévus peuvent être justifiés par des mesures d'optimisation climatique (91 des 106 périmètres). Parmi celles-ci, 44 périmètres nécessitent une attention particulière pour la ventilation nocturne, 20 périmètres nécessitent une attention particulière pour la situation diurne (ombrage) et 7 périmètres nécessitent une attention à la fois diurne et nocturne. Sur 12 des 106 périmètres, le développement est classé comme « sans danger », y compris les zones de rénovation et de renouvellement urbaines (par exemple le grand projet du PAV). La reconversion des zones industrielles en zones résidentielles devrait augmenter la proportion de verdure et améliorer la situation bioclimatique tant le jour que la nuit. Même si les structures restent pratiquement les mêmes (par exemple, imperméabilisation et parties vertes similaires avant et après), on ne peut au moins pas supposer une détérioration de la situation climatique et le développement peut être classé comme compatible. En revanche, il y a 3 périmètres de développement (au total environ 33,4 ha), qui doivent être remis en question de manière critique en ce qui concerne les changements climatiques et dont la réalisation n'est pas recommandable. Il s'agit de périmètres d'extension urbaine situés dans la zone de transition des trois communes de Perly-Certoux, Bardonnex et Plan-les-Ouates. D'après la carte indicative de planification de la situation nocturne, il est clair que les zones de développement de Perly-Bardonnex ont une très grande importance bioclimatique. Ces terres agricoles encore non exploitées jouent un rôle central dans le bilan de l'air froid nocturne (écoulements sur la pente) et ne doivent pas être sensiblement altérées dans leur fonctionnalité. Les effets de la construction de bâtiments ne peuvent pas être suffisamment compensés par des mesures d'adaptation au climat en ce qui concerne la situation nocturne, car les mesures sont particulièrement efficaces pendant la



journée²⁷. Dans le cas de la construction de bâtiments, il est recommandé de procéder à des analyses approfondies afin que la mise en œuvre soit aussi compatible que possible avec le climat. Pour y parvenir, il convient entre autres de maintenir un espacement suffisamment large entre les bâtiments. D'un point de vue climato-écologique, il n'est pas conseillé de construire toute la section transversale des écoulements sur la pente, ce qui cependant est ou pourrait être le cas ici. Au lieu de cela, si possible, les zones doivent rester libres pour des bandes vertes individuelles afin de ne pas empêcher la circulation de l'air froid la nuit.

²⁷ Par exemple, pendant la journée, les arbres contribuent à une réduction significative de la chaleur, mais la nuit, ils agissent comme un obstacle à la circulation de l'air froid et restent généralement plus chauds que le gazon, les champs et les espaces ouverts.

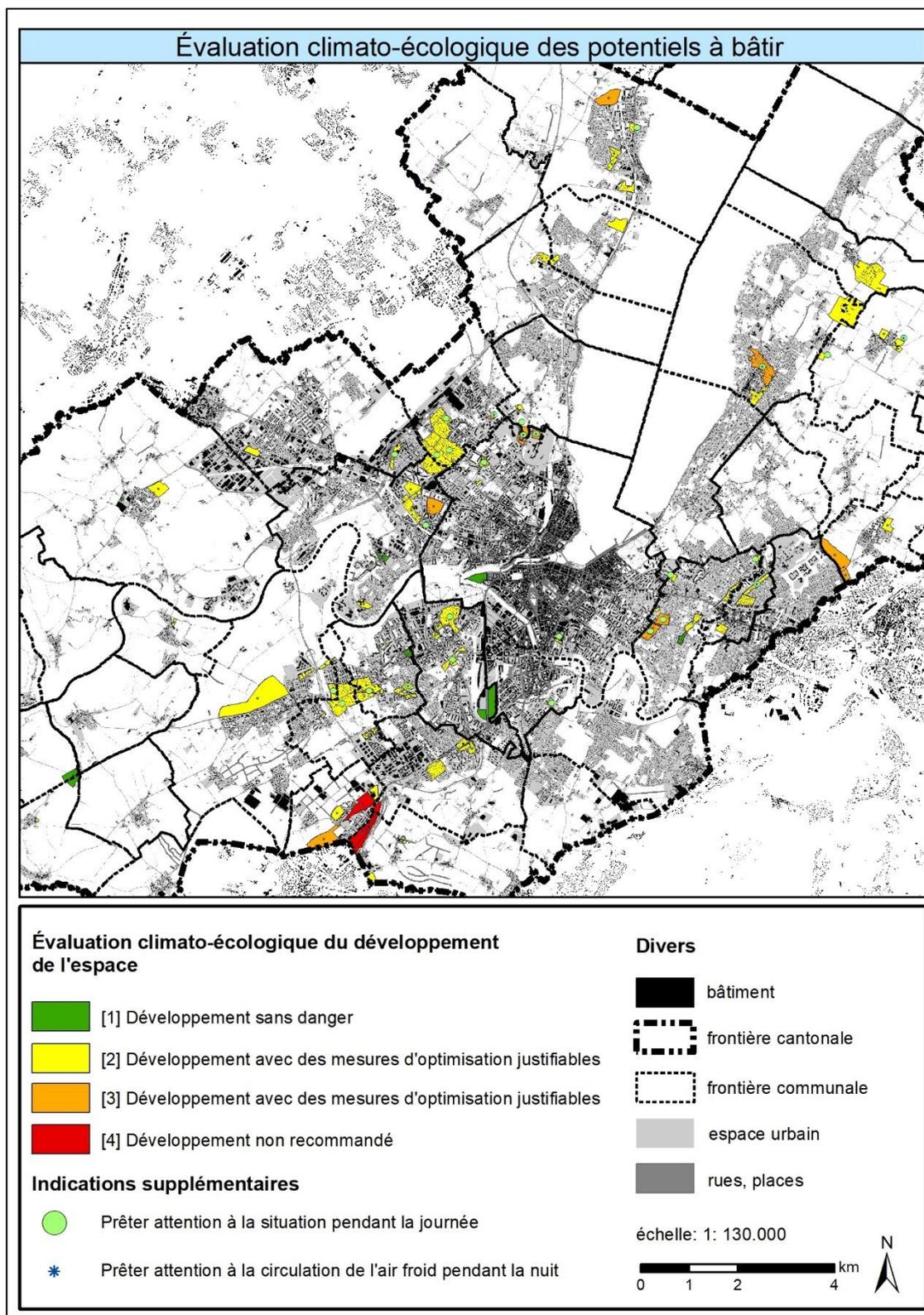


Fig. 40: Évaluation climato-écologique des potentiels à bâtir (légende raccourcie)



8. Catalogue de mesures climat urbain

La charge thermique estivale dans les villes et les agglomérations peut être réduite par un aménagement urbain qui adapte l'espace extérieur au climat. Un certain nombre de mesures peuvent être prises pour contenir l'effet d'îlot de chaleur (OFEV 2018). Dans le canton de Genève, la question de l'adaptation au climat joue déjà un rôle important. Entre autres, une stratégie genevoise d'arborisation est en cours d'élaboration. Elle prévoit une augmentation de la surface de canopée du canton à environ 30 % (République et canton de Genève, Office cantonal de l'agriculture et de la nature – OCAN). Un « Plan stratégique de végétalisation 2030 – PSV 2030 » (Ville de Genève, 2019) est déjà disponible pour la ville de Genève. Le plan formule à la fois des objectifs politiques pour la ville de Genève et une série de mesures visant à augmenter la proportion d'espaces verts et de biodiversité. Les « mesures vertes » sont une composante essentielle de l'adaptation au climat. Il existe également un certain nombre d'autres mesures qui contribuent à optimiser le climat urbain. Ce chapitre est consacré à la question de savoir quelles mesures peuvent être utilisées pour contrer le stress thermique dans le canton de Genève.

Un catalogue de 19 mesures individuelles efficaces sur le plan climato-écologique a été établi pour le canton de Genève. Les mesures sont décrites dans le Tab. 12 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'impact des mesures est décrit de manière qualitative, d'une part car des données vérifiées ne sont disponibles que dans de très rares cas 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 urbaine et contribuer ainsi à l'obtention d'un climat urbain sain à Genève – si les mesures sont combinées, les effets positifs des mesures individuelles sur le climat urbain sont généralement renforcés.

Dans la mesure du possible, la **proportion de verdure** dans la zone urbaine devrait être augmentée, en particulier dans les zones de pollution thermique (→ M01 : Végétalisation des cours intérieures et des arrière-cours, → M02 : Création d'espaces verts publics dans l'environnement résidentiel et professionnel, Fig. 41). Les espaces verts alimentés en eau et riches en structure (avec des arbres, des buissons) ont un effet positif sur le climat ambiant par leur évaporation et augmentent la qualité du séjour par leur ombre (→ M07 : Développer et optimiser les espaces verts publics, Fig. 41). Par rapport aux matériaux de construction urbains qui stockent la chaleur, les espaces verts se refroidissent beaucoup plus rapidement la nuit et peuvent (au-delà d'une certaine taille) avoir un effet sur leur environnement (proche) en tant que zones de production d'air froid. En même temps, ils remplissent de nombreuses autres fonctions telles que la fonction de détente, l'augmentation de la biodiversité et les effets de synergie pour la gestion des eaux de pluie (infiltration) et la lutte contre la pollution atmosphérique (dépôt de polluants atmosphériques).

Outre leur potentiel de réduction du stress thermique pendant le jour et la nuit (ombres, évaporation, etc.), les **arbres** (et les arbustes) de l'espace urbain assument la fonction de dépôt et de filtrage des polluants atmosphériques et améliorent ainsi la qualité de l'air. Lors de la mise en œuvre de mesures appropriées, il convient de veiller à ce que l'échange d'air (vertical) soit maintenu afin d'éliminer les



polluants et d'assurer le rayonnement nocturne. Il convient donc d'éviter les canopées fermées, en particulier dans le cas de petits tronçons de route et de trafic motorisé important. Dans le cas de routes à plusieurs voies, il est recommandé de prévoir des réserves centrales vertes pour la plantation d'arbres. Dans le domaine des couloirs d'air froid, les éléments d'ombrage ne doivent pas non plus représenter une barrière aux flux d'air froid et frais et ne doivent donc pas être installés à angle droit par rapport au sens du flux. La préférence devrait être donnée aux arbres et aux arbustes qui n'ont pas de fortes émissions de composés organiques volatils qui contribuent à la formation d'ozone. Les arbres à feuilles caduques à grande couronne sont préférables aux conifères, car ils ont moins d'influence sur le rayonnement en hiver et peuvent donc entraîner une réduction de l'énergie de chauffage et donc des coûts de chauffage et des émissions de gaz à effet de serre. Compte tenu du changement climatique, la sélection des espèces pour les nouvelles plantations ou les plantations de remplacement doit tenir compte de leur tolérance à la chaleur et à la sécheresse (voir le « Projekt Stadtgrün 2021 » du LWG Bayern 2012 ou la GALK-Straßenbaumliste 2012).

Les **mesures d'ombrage** réduisent pendant la journée le stress thermique causé par la lumière directe du soleil. Les routes, sentiers pédestres, pistes cyclables ou parkings ombragés emmagasinent moins de chaleur que les surfaces imperméables exposées au rayonnement solaire (→ M06 : Végétalisation et ombrage des parkings). De grandes surfaces d'ombrage peuvent donc également réduire l'effet d'îlot de chaleur nocturne et donc la charge thermique des zones résidentielles adjacentes (→ M17 : Ombrage des bâtiments par des arbres ou des mesures structurelles).

La **construction adaptée au climat** contient un grand nombre des mesures mentionnées jusqu'à présent et est plus facile à mettre en œuvre dans les nouveaux bâtiments, mais les mesures visant à améliorer ou à prendre en compte les préoccupations climatiques urbaines sont également possibles dans les bâtiments existants et dans la densification ultérieure. Dans les nouveaux bâtiments, il est possible d'optimiser l'orientation du bâtiment et donc de réduire l'apport direct de chaleur. En tenant compte de l'exposition au soleil et au vent, les bâtiments doivent être alignés de telle sorte que dans les pièces sensibles telles que les chambres (ou même les bureaux), l'apport de chaleur en été soit minimisé (→ M19 : Adaptation du concept d'utilisation des pièces). Cela s'applique d'autant plus aux utilisations sensibles des bâtiments comme les hôpitaux ou les maisons de retraite. En outre, une bonne ventilation avec un effet de refroidissement peut être maintenue ou obtenue par une orientation adéquate du bâtiment (orientation parallèle au flux d'air froid, évitement d'obstacles d'écoulement, espaces (verts) suffisants entre les bâtiments ; → M11 : Veiller à la position des structures et aux surfaces d'espacement). En outre, l'utilisation de matériaux de construction appropriés ne peut être mise en œuvre que dans les nouveaux bâtiments. Ce faisant, il convient de prêter attention à leurs propriétés thermiques – les matériaux de construction naturels comme le bois ont une plus faible capacité thermique et libèrent donc moins d'énergie dans l'air ambiant la nuit que l'acier ou le verre, par exemple. L'albédo peut également être influencé par le choix de matériaux de construction appropriés. Par exemple, la réflexion du rayonnement solaire est plus importante sur les surfaces claires, de sorte que celles-ci se réchauffent moins (→ M03 : Concevoir des surfaces dans l'espace extérieur afin d'optimiser le climat). Les mesures structurelles visant à améliorer le climat intérieur, telles que les toits et les façades verts, les éléments d'ombrage ou la rénovation énergétique, peuvent également être mises en œuvre dans les bâtiments existants et offrent souvent des effets de synergie avec la consommation énergétique des bâtiments (→ M15, M16, M17, M18).

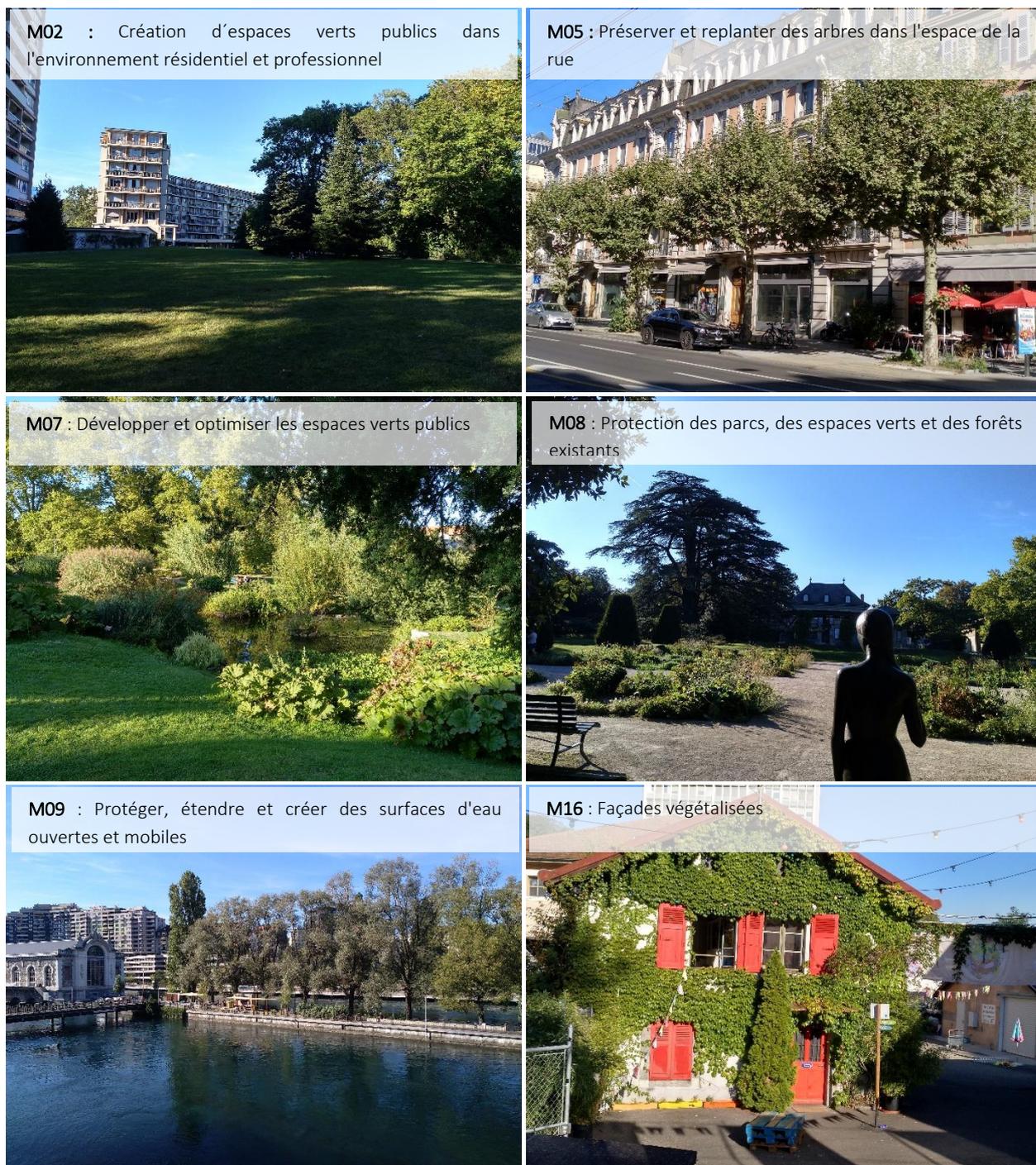


Fig. 41 : Exemples de mesures d'adaptation dans le canton de Genève

En cas de **densification ultérieure** de la zone urbaine, il convient de tenir compte des besoins d'une construction adaptée au climat (notamment la garantie d'une bonne ventilation). En règle générale, la densification ultérieure verticale est la solution la moins polluante du point de vue du climat urbain, même si la conception exacte doit être examinée au cas par cas. Afin de rendre la densification ultérieure aussi compatible que possible avec le climat, on a mis l'accent sur ce qu'on appelle le *double développement vers l'intérieur* (BfN 2016). L'objectif est de développer les réserves foncières dans la zone aménagée non seulement structurellement, mais aussi en vue d'une verdure urbaine. Ainsi, cela forme également des interfaces avec l'urbanisme, l'aménagement des espaces ouverts et la protection de la nature.



Tab. 12 : Catalogue des mesures - Recommandations de mesures d'adaptation pour le canton de Genève

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 	Dents creuses, 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 (par exemple, gestion de quartier ou au sein de la population (p. 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	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	Descellement (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 ventilationGarder 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 platePetits parcs comme tremplins pour l'air froidSynergies 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 intérieurPossible amélioration du climat extérieur directement adjacent grâce à une mise en œuvre sur une grande surface et une faible hauteur de toitSynergies pour la gestion des eaux de pluie, la biodiversité et la protection du climat	Toits plats, si nécessaire toits plats inclinés
16	Façades végétalisées	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 adjacentSynergies pour la lutte contre la pollution de l'air, la biodiversité, le bruit et la protection des bâtiments	Bâtiments (neufs et existants ; dans la mesure où la loi le permet)
17	Ombre des bâtiments par des arbres ou des mesures structurelles	Façades végétalisées, 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 nuitAmélioration du climat intérieurSynergies 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 climatAmélioration du climat intérieur pendant la journée	Bâtiments (existants)
19	Adaptation du concept d'utilisation de pièces	Optimisation de l'orientation du bâtiment et de l'utilisation des espaces intérieurs, c'est-à-dire ne pas exposer au sud les pièces sensibles (par exemple, 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

- BBSR (=Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) 2018: Handlungsziele für Stadtgrün und deren empirische Evidenz: Indikatoren, Kenn- und Orientierungswerte.
- BfN (2016) – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.): Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung. BfN-Skripten 444.
- CH2011 (2011), CH2011 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate, Services, Zurich, 88 pp. ISBN: 978-3-033-03065-7.
- 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.
- DWD (2019) – Deutscher Wetterdienst: Wetterlexikon. Online: www.dwd.de/lexikon.
- DWD (2020a) – Deutscher Wetterdienst: Stadtklima - die städtische Wärmeinsel. Online: https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_um_welt/klimawirk/stadt/pl/projekt_waermeinseln/projekt_waermeinseln_node.html.
- DWD (2020b) – Deutscher Wetterdienst: Unwetterklimatologie: Hitze. Online: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/unwetterklima/hitze/hitze.html>.
- Fahy J., M. Schlaepfer (2019): Une méthodologie pour identifier les îlots de chaleurs urbains. Présentation Powerpoint du 12 juin 2019.
- Gallinelli P., R. Camponovo & V. Guillot (2017): CityFeel – Micro climate monitoring for climate mitigation and urban design. Energy Procedia 122 (2017), 391 – 396.
- GALK (2012) – Deutsche Gartenamtleiterkonferenz e.V.: Straßenbaumliste. Online: <https://www.galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuebersicht/strassenbaumliste>.
- GERICS Climate Service Center Germany (2019): Schlecht-Schlaf-Index (Homepage). Online: https://gerics.de/products_and_publications/publications/IPCC/detail/078103/index.php.de (Abruf 21.06.2019).
- Groß, G. (1992): Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. Fluid Dynamics Research (10): 483-498.
- Häckel, H. (2012): Meteorologie. 7. Auflage. Stuttgart.
- HEPIA (2020) – Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève. Cleancity (2012-2014). En ligne : <https://www.hesge.ch/hepia/recherche-developpement/projets-recherche/termine/cleancity>
- Jendritzky, G., et al. (1990): Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). Beitr. Akad. Raumforsch. Landesplan. Nr. 114.
- King, E. (1973): Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftflusses und der Frostgefährdung durch Straßenbauten. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 130, Bd. 17. Offenbach am Main.
- 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.
- LWG Bayern (2012) – Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau: « Projekt Stadtgrün 2021 ». Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Nr.: KL/08/02. Online: https://www.lwg.bayern.de/mam/cms06/landespflege/dateien/stadtgruen2021_abschlussbericht_2008_2012.pdf.
- Malberg, H. (2002): Meteorologie und Klimatologie-Eine Einführung. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg.
- Matzarakis, A. und 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, 213.
- MétéoSuisse (Hrsg., 2013): Einführung der Normperiode 1981-2010. Fachbericht MeteoSuisse Nr. 245. M. Begert, C. Frei & M. Abbt.
- MétéoSuisse (2020a): Evolution de la température et des précipitations. En ligne: <https://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/chan-ge-ment-climatique-suisse/evolution-de-la-temper-ature-et-des-precipitations.html>.
- MétéoSuisse (2020b): Indicateurs de climat. Genève-Cointrin. En ligne: https://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/le-climat-suisse-en-detail/indicateurs-de-climat.html?station=gve&filters=TN_1961-today_JJA#.
- MVI (= Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg) (2012): Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.
- NCCS (eds.) 2018: CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. National Centre for Climate Services, Zürich.
- NEWA (2019): New European Wind Atlas, a free, web-based application developed, owned and operated by the NEWA Consortium.
- 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/the-mes/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/the-mes/air/publications-etudes/publications/nabel-luftqualitaet.html>
- Oke, T. R. (1973): City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967), Volume 7, Issue 8: S. 769-779.
- République et canton de Genève (2020): Gestion des arbres urbains : chiffres et tendances. En ligne: <https://www.ge.ch/actualite/gestion-arbres-urbains-chiffres-tendances-18-02-2020>.
- République et canton de Genève (2019) : Cool-City. Identifier des mesures efficaces pour maintenir des îlots de fraîcheur. En ligne : <https://www.ge.ch/actualite/cool-city-16-09-2019>.
- République et canton de Genève (2017) : Plan climat cantonal – Volet 2. Plan de réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'adaptation aux changements climatiques 2018-2022, en ligne : <https://www.ge.ch/document/plan-climat-cantonal-volet-2/telecharger> .
- République et canton de Genève (2015) : Plan climat cantonal – Volet 1. État des lieux, objectifs globaux et axes stratégiques, en ligne : <https://www.ge.ch/document/plan-climat-cantonal-volet-1/telecharger> .
- Service de l'air, du bruit et des rayonnements non ionisants (SABRA) (2019) : Qualité de l'air 2018, en ligne : <https://www.ge.ch/document/rapports-qualite-air-geneve-ropag/telecharger>.
- Schönwiese, C.- D. (2008): *Klimatologie*. 3. Auflage. Stuttgart.
- SEDE SA (2017) : Épisodes météorologiques sur Genève. Calibration NO2 et PM10 sur 2014.
- UBA (2016) - Umweltbundesamt: Heizen, Raumtemperatur. Online: www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/umweltbewusstleben/heizen-raumtemperatur.
- VDI (2003): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5. Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft
- VDI (2008a): VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.
- VDI (2008b): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lüfthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima.
- VDI (2014): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Klima- und Lüfthygienekarten für Städte und Regionen. Entwurf.
- Ville de Genève (2019): Plan stratégique de végétalisation 2030. Objectifs et mise en œuvre. En ligne : <https://vdgbox.ville-geneve.ch/index.php/s/CcCWZKCyb7rKJLL#pdfviewer>.



Annexe

Fig. A 1 : Occupation actuelle des sols dans le canton de Genève (au format A0)

Fig. A 2 : Occupation future des sols dans le canton de Genève : Projets d'aménagement réalisés jusqu'en 2035, scénario de développement A (au format A0)

Fig. A 3 : Occupation future des sols dans le canton de Genève : ensemble des projets d'aménagement, scénario de développement B (au format A0)

Fig. A 4 : Champ de température nocturne près du sol dans le canton de Genève (au format A0)

Fig. A 5 : Débit d'air froid nocturne pour le canton de Genève (au format A0)

Fig. A 6 : Vitesse et direction du vent proche du sol pour le canton de Genève (au format A0)

Fig. A 7 : Charge thermique pendant la journée dans le canton de Genève, représenté par la PET, situation actuelle (au format A0)

Fig. A 8 : Charge thermique pendant la journée dans le canton de Genève, représenté par la PET, période future 2020-2049 (au format A0)

Fig. A 9 : Température de l'air pendant la journée dans le canton de Genève, situation actuelle (au format A0)

Fig. A 10 : Température de l'air pendant la journée dans le canton de Genève, période future 2020-2049 (au format A0)

Fig. A 11 : Carte de l'analyse climatique du canton de Genève, situation actuelle de nuit (au format A0)

Fig. A 12 : Carte de l'analyse climatique du canton de Genève, période future 2020-2049, situation nocturne (au format A0)

Fig. A 13 : Carte indicative de planification pour la situation nocturne (au format A0)

Fig. A 14 : Carte indicative de planification pour la situation diurne (au format A0)

Fig. A 15 : Évaluation climato-écologique des potentiels à bâtir (au format A0)