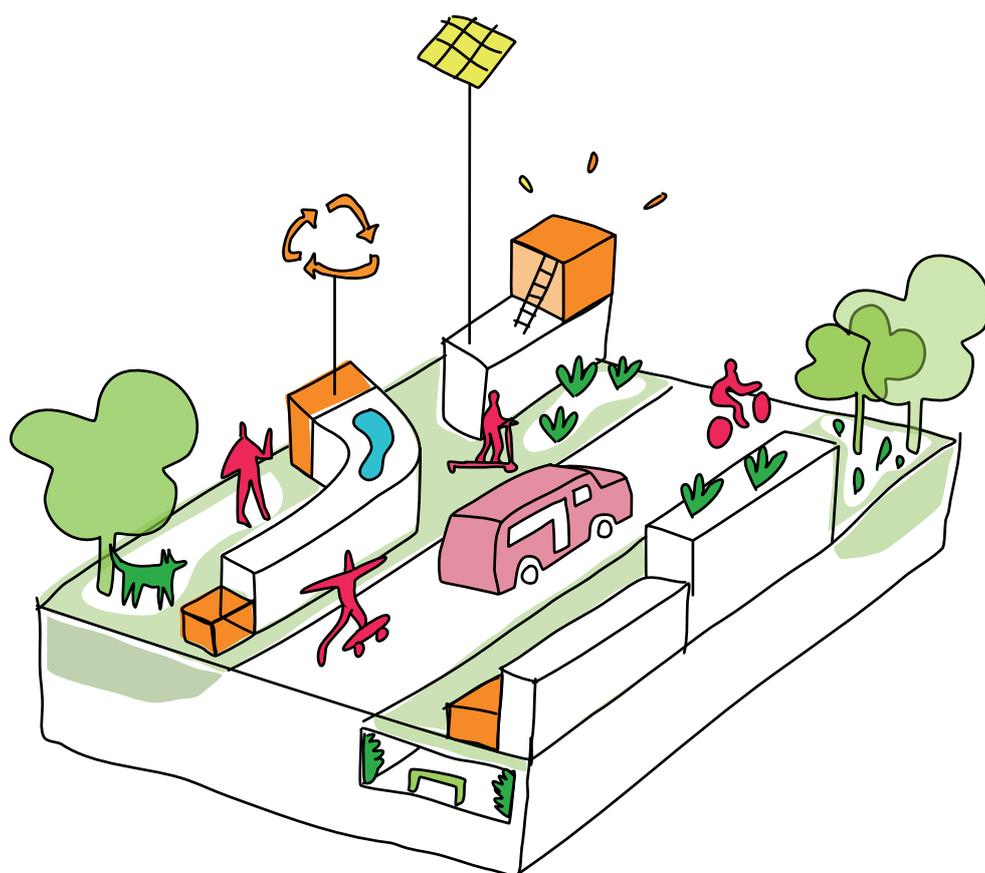


ADAPTATION CLIMATIQUE ET PROJET URBAIN

GUIDE MÉTHODOLOGIQUE À DESTINATION
DES COLLABORATRICES ET COLLABORATEURS
DE L'ÉTAT DE GENÈVE



JUIN 2024

ÉDITION

République et canton de Genève
Département du territoire (DT)
Office de l'urbanisme (OU)
Rue David-Dufour 5
1211 Genève

PILOTAGE

Sylvain Ferretti, Office de l'urbanisme
Philippe Royer, Office cantonal de l'environnement
Rémy Zinder, Direction de la durabilité et du climat

GROUPE DE TRAVAIL

Benjamin Villard, Office de l'urbanisme
Valentin Bourdon, Office de l'urbanisme
Delia Fontaine, Direction de la durabilité et du climat
Frédéric Bachmann, Office cantonal de l'eau
Patrick Fouvy, Office cantonal de l'agriculture et de la nature
Emilie Yakoubian, Office cantonal de l'agriculture et de la nature
Walter Vetterli, Office cantonal de l'environnement
Claude Realmonte, Office cantonal de l'environnement
Aline Sauter Caillet, Office cantonal de l'environnement
Pierre Kunz, Office cantonal de l'environnement
Beatriz Rincon, Office cantonal de l'environnement

MANDATAIRES

urbaplan (Marcos Weil, Igor Andersen, William Corbat)
Latitude durable (Maude Sauvain, Marc Naef)
HEPIA (Reto Camponovo, Sébastien Lorenzini)
GEO-NET (Josephine Foerster)

MISE EN PAGE

Atelier de graphisme Chatty Ecoffey

Illustration de couverture : urbaplan

Version de juin 2024

Table des matières

PRÉAMBULE	4
1 NOTIONS DE BASE	6
1.1 Définitions des trames	6
1.2 Confort climatique et îlot de chaleur urbain	7
1.3 Diurne/nocturne	9
2 DIAGNOSTIC – ANALYSE CLIMATIQUE	10
2.1 Analyse de la température ressentie (PET)	12
2.2 Analyse de la température réelle (°C)	13
2.3 Analyse des échanges d'air froid	14
2.4 Analyse de la situation bioclimatique*	15
3 PHASE PLANIFICATION	17
3.1 Adaptation par la trame verte et brune	17
Intégration par la création de sols vivants	18
Intégration par l'arborisation	20
Régénération et végétalisation des sols urbains	22
3.2 Adaptation par la trame bleue	25
Les étendues d'eau	26
Gestion des eaux pluviales	28
3.3 Adaptation par la trame grise	31
Adaptation de la morphologie urbaine	32
Diminution des surfaces minérales et imperméables	34
4 PHASE DE PROJET : ESPACE PUBLIC	36
4.1 Adaptation par la trame verte et brune	37
Arborisation des espaces urbains	38
4.2 Adaptation par la trame bleue	41
Eaux d'agrément : fontaine, jeux d'eau, bassin	42
4.3 Adaptation par la trame grise	45
Matérialité et couleur des revêtements de sol	46
Dispositifs d'ombrage	48
5 PHASE DE PROJET : BÂTIMENT, OUVRAGE D'ART	50
5.1 Adaptation par la trame verte et brune	51
Façades végétalisées	52
Toitures végétalisées ou végétation sur dalle	54
5.2 Adaptation par la trame bleue	57
Gestion des eaux pluviales des bâtiments	58
5.3 Adaptation par la trame grise	61
Matérialité des éléments construits	62
Dispositifs architecturaux	64
6 ANNEXES	66
Bibliographie	66
Lien avec la théorie	67
Glossaire	73

Préambule

L'urbanisme et l'architecture traditionnelle des villes, particulièrement dans les climats chauds et secs, a pris en compte de manière instinctive le contexte climatique dans la conception et l'adaptation du bâti aux conditions naturelles et aux ressources locales.

À travers de multiples exemples, il est observé que les formes urbaines, la morphologie des bâtiments, les matériaux, la taille des ouvertures, les dispositifs constructifs de rafraîchissement, les apports de lumière naturelle, la gestion de l'eau ainsi que la végétation peuvent être utilement mobilisés pour répondre à l'amélioration du confort des habitantes et habitants.

Ce guide entend fournir des leviers d'actions pour favoriser la prise en compte des questions d'adaptation au changement climatique dans les planifications et projets, prendre exemple sur les formes d'habitat exposées depuis des siècles aux climats extrêmes et s'inspirer ainsi des bonnes pratiques pour éviter une hyper technicité de solutions énergivores en privilégiant les solutions « no tech » et « low tech » telles que détaillées dans ce guide.

RAISONS D'ÊTRE DE CE GUIDE

Ce guide s'inscrit dans la **mise en œuvre de la mesure 4.5 du Plan Climat Cantonal (PCC)**, « Prévenir et lutter contre les îlots de chaleur en milieu urbain ».

Il s'agit ici d'une première édition de ce guide, qui se veut évolutif et pourra être mis à jour et régulièrement adapté en fonction de l'évolution des connaissances et des retours d'expériences en la matière.

Il découle d'une commande de plusieurs offices (OCEAU, OCEV-SERMA, DDC, OCAN, OU) du département du territoire (DT), traduisant ainsi une préoccupation transversale. Il a pour but d'offrir aux collaboratrices et collaborateurs de l'administration cantonale, impliqués dans des projets d'aménagement et de construction, un outil de compréhension et une meilleure prise en compte des données et enjeux climatiques dans leurs projets.

L'urgence climatique implique de saisir toutes les occasions (et donc tous les projets) pour renforcer la capacité d'adaptation de notre canton et ainsi préserver des espaces agréables pour la population.

En ce sens, une sensibilisation du personnel de l'État impliqué dans le processus de la fabrique urbaine est nécessaire.

PÉRIMÈTRE DU GUIDE

Ce guide constitue un **complément à la formation** « Analyse climatique et projet urbain »¹. Les enjeux d'adaptation au changement climatique ont structuré ce document de manière transversale, approchant les enjeux climatiques de l'échelle de la planification à celle de la réalisation du projet en répondant aux spécificités des différents offices de l'administration cantonale.

Les mesures liées au confort climatique* relèvent de multiples acteurs, qui doivent veiller à intégrer une approche climatique dans leurs pratiques du projet. En ce sens, ce guide se positionne comme un complément aux politiques publiques sectorielles et aux démarches connexes comme « Quartiers en transition » qui propose un outil d'aide à la conception pour accompagner la démarche de projet –, le guide opérationnel « Faire ensemble l'espace public » ou encore le « Guide de l'évaluation environnementale stratégique (EES) ».

Le présent document se concentre plus particulièrement sur les étapes de projet relatives aux quartiers (Image directrice, PDQ, PLQ) et aux réalisations.

Finalement, trois annexes complètent ce guide :

- une bibliographie exhaustive servant de socle théorique et pratique ;
- un lien avec la théorie reprenant et explicitant les définitions utilisées dans les différentes trames (décrites en page 6) ;
- un glossaire qui complète les termes techniques utilisés le long du présent guide (les termes sont identifiés par un astérisque « * »).

¹ Plus de cent collaboratrices et collaborateurs de l'Etat de Genève ont participé à une session de formation les 12 et 19 juin 2023.

OBJECTIFS DU GUIDE

Ce guide a pour objectif de **favoriser la prise en compte des questions d'adaptation au changement climatique**, le plus en amont possible, dans toutes les planifications et réalisations portées par l'Etat de Genève.

Il n'a pas pour vocation à constituer un catalogue de mesures. Il vise plutôt à **privilégier une réflexion contextualisée au travers de questions à traiter** à chaque étape du projet, considérant que chaque projet est différent et s'inscrit dans un contexte spécifique. De plus, toutes les mesures n'étant pas équivalentes, un travail d'analyse, notamment des effets escomptés, est à considérer. Dès lors, une réflexion contextuelle et des **arbitrages sont toujours nécessaires selon la nature et l'étape du projet**. Malgré une analyse par trame des problématiques climatiques, les porteurs de projet veilleront à maintenir une vision d'ensemble et transversale du projet, cela pour garantir l'établissement d'un projet urbain de qualité. Les thématiques climatiques peuvent ainsi trouver leur ancrage dans une diversité de documents : règlement, rapport explicatif, plan, charte des aménagements extérieurs, RIE/NIE, schéma directeur de gestion des eaux, etc.

Il est aussi à noter que certaines mesures ont des effets collatéraux bénéfiques sur d'autres politiques publiques (air, bruit, biodiversité, notamment).

STRUCTURE DU GUIDE

Le guide est organisé en suivant la ligne de vie d'un projet et ses phases clés :

1. **Diagnostic (cahier des charges)** : il permet d'identifier et de formuler les enjeux majeurs du point de vue climatique qui doivent être pris en compte dans le projet ;
2. **Phase de planification** : cette phase du projet porte aussi bien sur la **planification indicative** (image directrice, plan directeur de quartier, par exemple) que sur la **planification impérative** (plan localisé de quartier, plan de site) ;
3. **Phase de projet** : cette phase porte sur la conception du projet dans les éléments de détail (choix des essences d'arbre par exemple). Même si la procédure décisive est identique (demande en autorisation de construire), une distinction est faite entre le projet d'un **bâtiment** ou d'une **infrastructure** et celle d'un **espace public***.

L'approche séquencée proposée dans ce guide (diagnostic, conception-planification, réalisation) a été privilégiée afin de traiter les enjeux climatiques au bon moment et à la bonne échelle, afin que les leviers d'action proposés soient le plus efficaces. Cependant, parfois ces phases se superposent, et il peut en résulter une certaine redondance des mesures.

C'est pourquoi, ce guide n'a pas pour vocation d'être parcouru de manière linéaire. Les leviers d'action sont établis en fonction des phases et peuvent donc se répéter selon leur pertinence à tel ou tel moment de la ligne de vie d'un projet.

Pour chaque phase, les **leviers d'action** sont déclinés selon les **trames** constitutives de l'environnement urbain qui influencent le climat, soit les trames **verte, brune, bleue et grise**.

Les **points à considérer** constituent des questions liées à l'optimisation du projet tandis que les **points de vigilance** sont des remarques et explications complémentaires pour mieux comprendre les enjeux en présence.

Il est à noter que les options en termes d'adaptation au changement climatique et d'amélioration du confort des usagers et usagères doivent également être confrontées en termes d'usage, d'accessibilité (PMR, etc.) et d'entretien à long terme, notamment pour certains revêtements plus efficaces en termes climatiques.

1. Notions de base

1.1 DÉFINITIONS DES TRAMES

Les trames* sont souvent utilisées dans la planification urbaine, car elles permettent une représentation facilitée de la complexité des éléments qui composent le territoire. Leur fonction est de cerner et d'aborder les problématiques spécifiques liées aux différentes composantes de l'environnement urbain, telles que la végétation, les sols, la présence d'eau, etc. En matière de climat urbain, une approche par trames est particulièrement pertinente.

TRAMES VERTE ET BRUNE*²

La trame verte fait référence au réseau d'espaces verts composé de parcs, jardins et espaces naturels situés à l'intérieur et autour d'un tissu bâti (quartier, village, ville). On y inclut également la trame brune telle que le sol naturel, support nécessaire au développement³ de la trame verte.

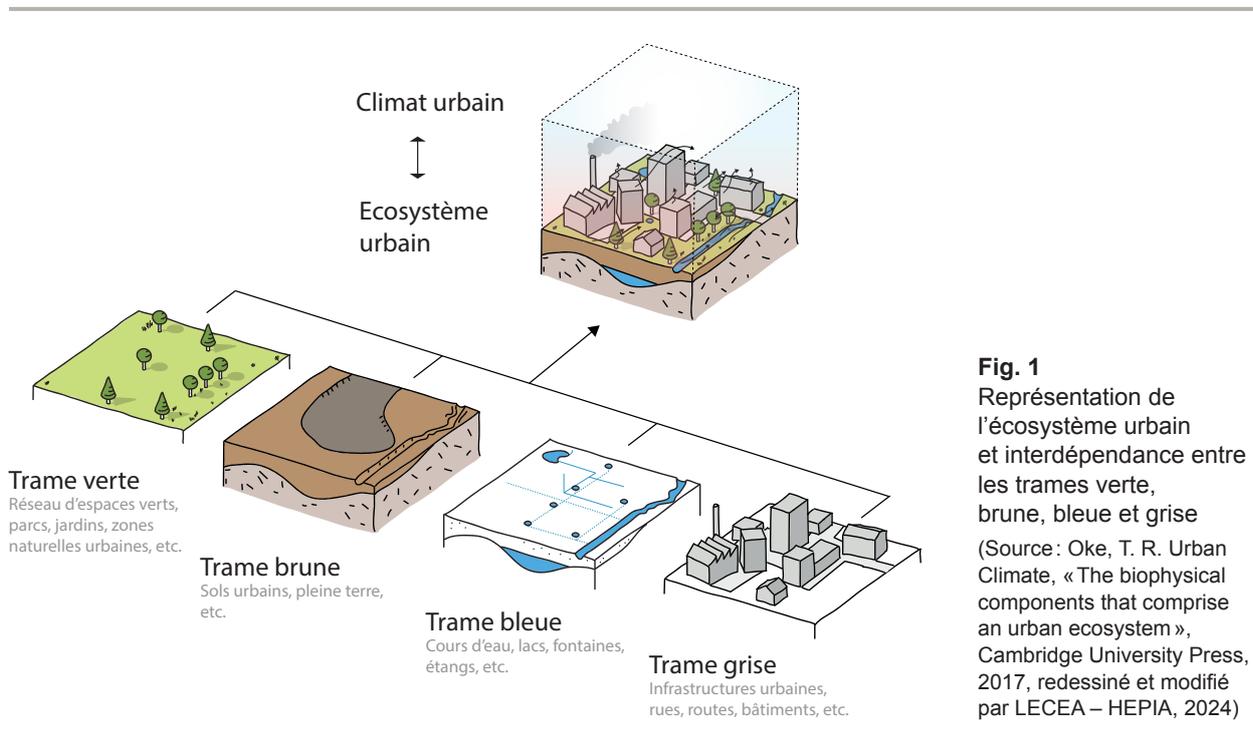
TRAME BLEUE*

La trame bleue désigne l'ensemble des éléments liés à l'eau tels que les cours d'eau, les lacs, les canaux, les noues, les fontaines, les étangs et les zones humides. Elle est intimement liée aux trames vertes et brunes.

TRAME GRISE*

La trame grise porte sur le réseau des routes, rues, trottoirs, bâtiments, parkings et d'autres infrastructures urbaines qui forment la structure bâtie de la ville et exercent une influence notamment sur des masses d'air.

Bien que les trames soient traitées individuellement, il est important de noter que l'écosystème urbain est composé de l'ensemble de celles-ci et qu'elles entretiennent des liens **d'interdépendance** entre elles et influencent conjointement le microclimat urbain*.



² La trame verte est traitée en binôme avec la trame brune, en raison de leur interdépendance dans les effets climatiques qu'elles procurent. La valorisation des sols, le maintien ou le rétablissement de leur continuité écologique, garantissent l'épanouissement du végétal et des organismes (qui ensemble, permettent le soutien à de nombreux services écosystémiques). Le végétal aura à son tour des effets positifs sur l'atténuation de la charge thermique d'un lieu et sur la qualité climatique de l'environnement pour les habitantes et habitants, grâce à l'évapotranspiration de l'eau par les plantes et de l'ombrage procuré par les arbres.

³ Une étude de l'EAWAG « Optimiser le rafraîchissement des villes grâce aux images satellites » (A. Bryner, 22.08.2023) montre que les surfaces enherbées ou les structures arrosées diminuent plus rapidement la température de surface que la plantation d'arbres. C'est pourquoi, il faut traiter l'arbre et le sol au même niveau : il faut autant planifier la création des sols fonctionnels sans connaître par avance les arbres qui y seront plantés que planifier les arbres puis déterminer le type de sol nécessaire. L'idéal est d'obtenir des sols multifonctionnels produisant des services écosystémiques multiples.

1.2 TEMPÉRATURE RESENTIE ET ÎLOT DE CHALEUR URBAIN

Il est nécessaire de distinguer le confort climatique de l'individu (ou son inconfort) exprimé par la **température ressentie** (= PET : physiological equivalent temperature) qui dépend de facteurs très localisés (température de l'air, vitesse du vent, humidité, rayonnement solaire, environnement radiatif), de l'îlot de chaleur urbain* (ICU), qui est un phénomène mesuré à l'échelle d'un territoire.

TEMPÉRATURE RESENTIE (PET)

La **température ressentie*** permet de qualifier le confort climatique. Elle équivaut à la sensation de chaleur dans des conditions environnementales contrôlées, sans rayonnement* ni vent.

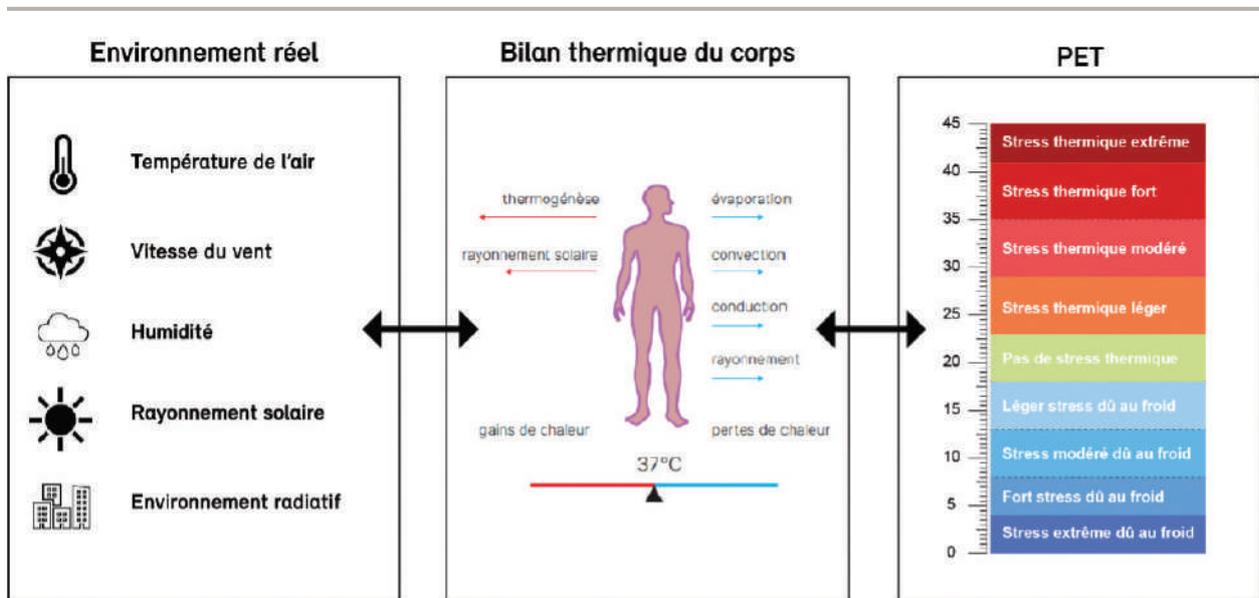


Fig. 2
Principe de Température Physiologique Equivalente (Source: LECEA)

ÎLOT DE CHALEUR URBAIN (ICU)

La température mesurée (réelle) permet de quantifier l'îlot de chaleur urbain (ICU). **L'ICU exprime une différence de température entre un milieu urbain et un milieu rural environnant.** Elle s'exprime par son intensité. Cette différence de température est particulièrement marquée la nuit, car en l'absence de rayonnement solaire, les surfaces qui ont emmagasiné de la chaleur durant la journée la restituent.

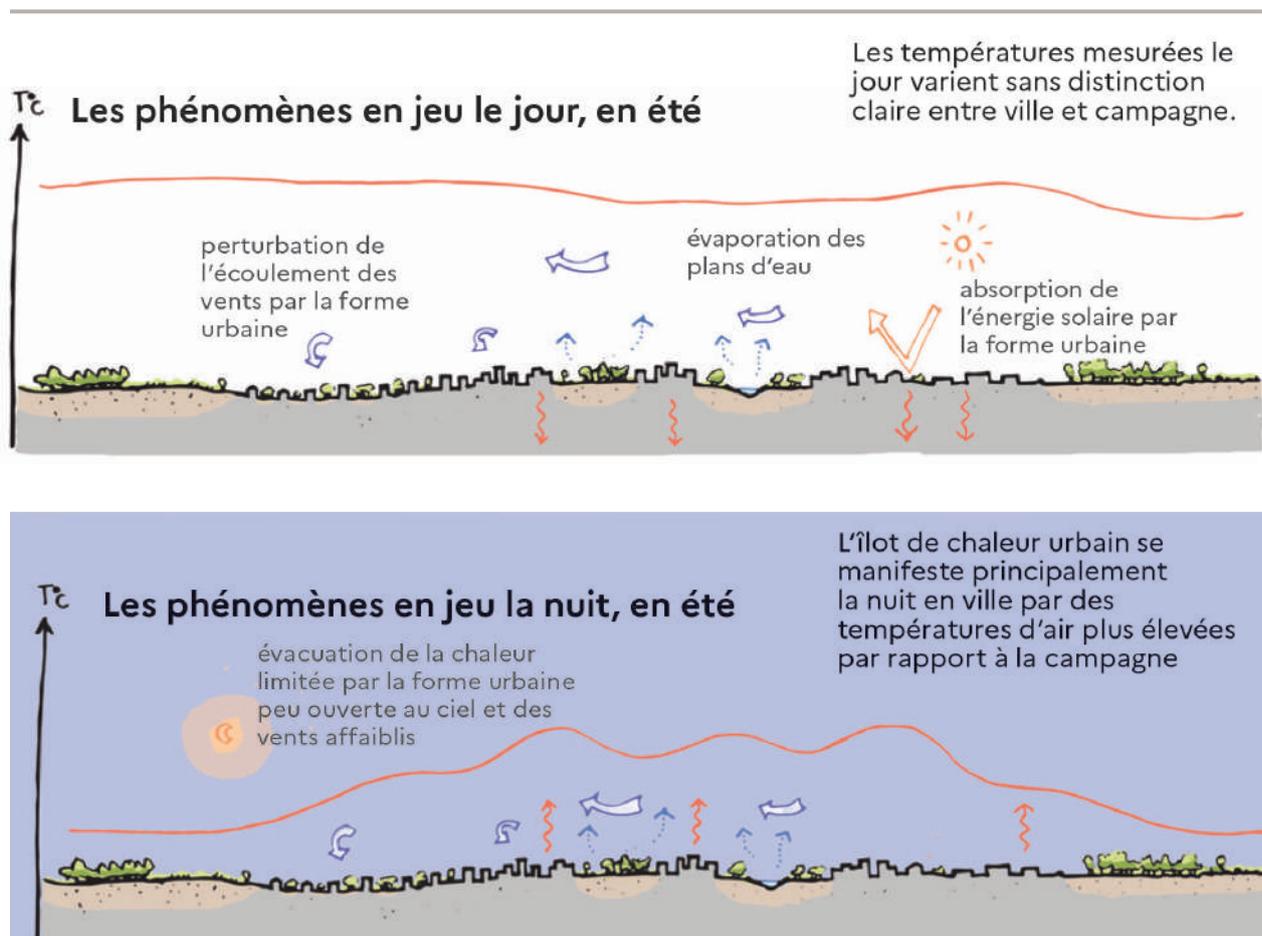


Fig. 3

Illustration du phénomène d'ICU

(Source : ADEME – Rafraîchir les villes, des solutions variées – 2021 – Illustration TRIBU)

1.3 DIURNE/NOCTURNE

La différence de dynamique du climat urbain entre le jour et la nuit nécessite des mesures d'adaptation distinctes.



PROBLÉMATIQUE DIURNE

En journée, la température de l'air reste généralement uniforme sur l'ensemble du territoire, présentant des variations sans distinction entre zones urbaines et rurales avoisinantes. Toutefois, la sensation de chaleur pour les citadines et citadins peut être amplifiée en raison de facteurs tels que la chaleur élevée des revêtements de sols et façades, l'accroissement du rayonnement solaire dû à la réflexion des façades, le manque de circulation d'air, le peu d'ombre, etc. **Les mesures d'adaptation se concentrent donc sur l'atténuation de l'inconfort climatique** en intervenant sur divers paramètres influant sur la température ressentie (PET), incluant le rayonnement solaire, les caractéristiques des surfaces, l'humidité, les vents, la pollution atmosphérique, etc.



PROBLÉMATIQUE NOCTURNE

La nuit, la température de l'air tend à être plus élevée en ville, en raison de l'effet d'îlot de chaleur urbain. Cette absence de rafraîchissement nocturne répétée, associée à de fortes chaleurs en journée, peut avoir de graves conséquences sur la santé des citadines et citadins⁴. Par conséquent, **les stratégies d'adaptation se concentrent davantage sur la réduction de la chaleur emmagasinée par les quartiers pendant la journée** (ombrage, matérialité, etc.) et sur l'amélioration de leur capacité à dissiper la chaleur (sky view factor*, écoulement d'air, etc.) pendant la nuit afin de diminuer l'intensité de l'ICU.

Dans la suite du texte :

Les leviers d'action pertinents pour le confort climatique sont identifiés par le pictogramme suivant :



Les leviers d'action pertinents pour l'atténuation de l'effet d'îlot de chaleur urbain, mais très peu pour le confort climatique sont identifiés par le pictogramme suivant :



Les leviers d'action pertinents à la fois sur le confort climatique et sur l'îlot de chaleur urbain sont identifiés par les pictogrammes suivants :



⁴ Une étude de l'EPFL démontre que : « les îlots de chaleur ne sont pas un problème de confort, mais qu'ils ont un coût sur la santé significatif, avec, par exemple, des risques respiratoires et cardio-vasculaires plus élevés qui diminuent l'espérance de vie » (Huang, W. T. K., Masselot, P., Bou-Zeid, E., Fatichi, S., Paschalis, A., Sun, T., & Manoli, G. (2023))

2. Diagnostic – analyse climatique

Le **diagnostic climatique** constitue un préalable indispensable permettant de mettre en évidence les **enjeux du périmètre d'étude ou du projet du point de vue climatique**. De manière à ce que la prise en compte de ces enjeux se fasse le plus en amont possible, une analyse climatique utilisant les données existantes sur le **SITG** devrait a minima figurer dans le cahier des charges.

Les données disponibles sur le SITG sont pleinement adéquates pour les phases de planification d'un projet. Ces indications doivent toutefois être

interprétées avec vigilance lorsque l'on passe à la phase de projet. En effet, le degré de précision (et donc de pertinence et de fiabilité des informations) des cartes est actuellement de 10m. En phase de projet d'un projet d'espace public ou d'un ouvrage, cette résolution cartographique est insuffisante, car d'autres paramètres vont influencer la température ressentie. Selon les besoins spécifiques du projet, il peut alors s'avérer nécessaire de recourir à une analyse complémentaire plus détaillée (analyse climatique à la demande et/ou parcours climatique de terrain).

CAHIER DES CHARGES

Le cahier des charges exprime la **commande technique** des politiques publiques pour un projet donné. Il constitue un levier d'action majeur tant pour la conception des projets que pour la sensibilisation de l'ensemble des parties prenantes et des personnes concernées par le projet.

Que ce soit au stade de la planification ou de la réalisation, un

chapitre du cahier des charges doit identifier les **enjeux à considérer du point de vue climatique** afin que ceux-ci soient appréhendés le plus en amont possible, tant au niveau de la composition des équipes, qu'au niveau de la conception même des projets.

La mise en avant du thème du confort climatique dans le cahier des charges constitue

également une manière de diffuser cet enjeu au sein de l'ensemble des offices et services et contribue à leur montée en compétence. En effet, la prise en compte des enjeux climatiques n'est pas l'apanage d'un seul office ou service, mais relève d'une nécessaire prise en considération transversale de cette thématique par l'ensemble des offices et services dans leurs politiques publiques.

Le présent chapitre résume les informations nécessaires à une analyse de base, tenant compte de l'importance d'interpréter ces cartes à leur juste échelle.

Les données climatiques sont regroupées sur le SITG en trois familles (les cartes des paramètres climatiques actuels et futurs (A), les cartes d'analyse climatique nocturne (B) et les cartes indicatives de planification (C)) qui ont chacune une applica-

tion et une interprétation propre. Afin de décrire les changements climatiques futurs, une période de référence P0 (1981-2010) est utilisée pour extrapoler les changements climatiques. L'évolution du climat est ensuite modélisée pour trois périodes futures, à savoir P1 (2020-2049), P2 (2045-2074) et P3 (2070-2099). Couvrant chacune 30 ans, elles sont ainsi suffisamment longues pour être représentatives des tendances à venir.

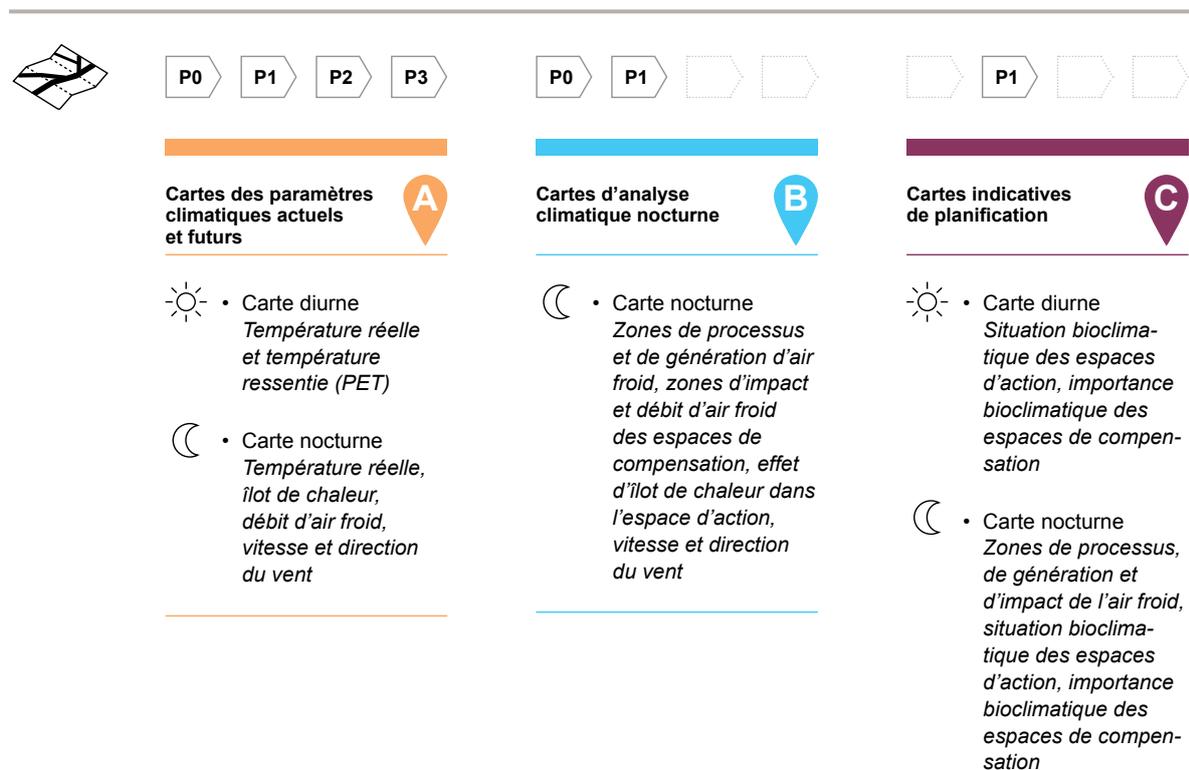


Fig. 4

Familles de cartes (voir *Analyse climatique du canton de Genève*, chapitre 6)

(Source : *Analyse climatique du canton de Genève – Guide de l'utilisateur*⁵)

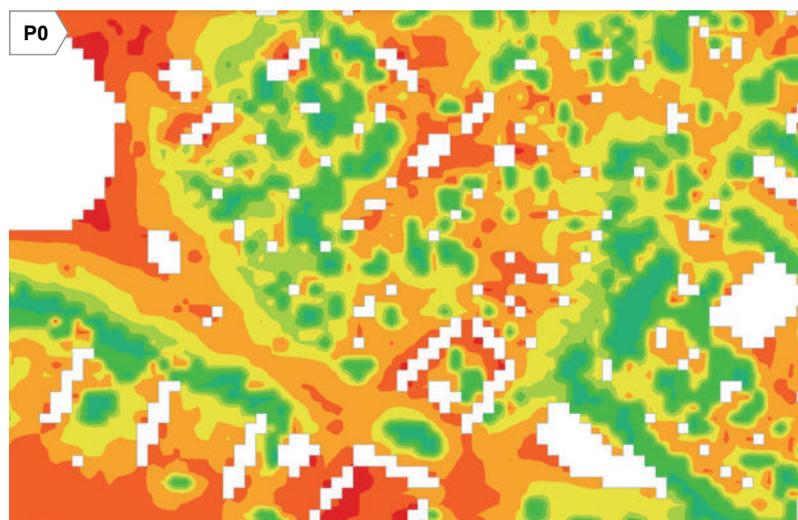
Les exemples ci-après illustrent les informations qui peuvent être déduites de l'analyse des cartes climatiques et constituent ainsi le diagnostic climatique attendu dans un cahier des charges.

⁵ Un guide de l'utilisateur pour les outils d'analyse climatique du canton de Genève est disponible sur le site internet ge.ch. Il fournit les informations nécessaires à la bonne interprétation et utilisation des données climatiques du SITG.

2.1 ANALYSE DE LA TEMPÉRATURE RESSENTIE (PET)

Situation : à 1,1 mètre du sol, situation diurne à 14 h.

Pertinence : La carte de la PET aide à identifier les points chauds ainsi que les lieux de refuge rafraîchissants qui sont bénéfiques en journée (voir Analyse climatique du canton de Genève, chapitre 4.3).



Cartes des paramètres climatiques actuels et futurs

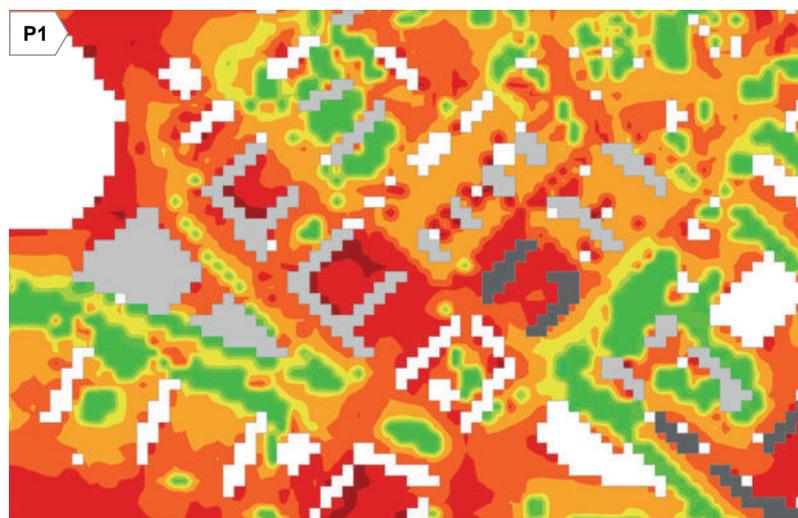
▼ Climat - Paramètres climatiques

Périodes

P0 1981-2010 2020-2049 2045-2074 2070-2099

- > Données contextuelles
- ☑ Situation diurne (14h00)
 - > Température réelle (°C)
 - ☑ Température ressentie PET (°C)
 - > Situation nocturne (04h00)

(Source : SITG)



▼ Climat - Paramètres climatiques

Périodes

P1 1981-2010 2020-2049 2045-2074 2070-2099

- > Données contextuelles
- ☑ Situation diurne (14h00)
 - > Température réelle (°C)
 - ☑ Température ressentie PET (°C)
 - > Situation nocturne (04h00)

(Source : SITG)

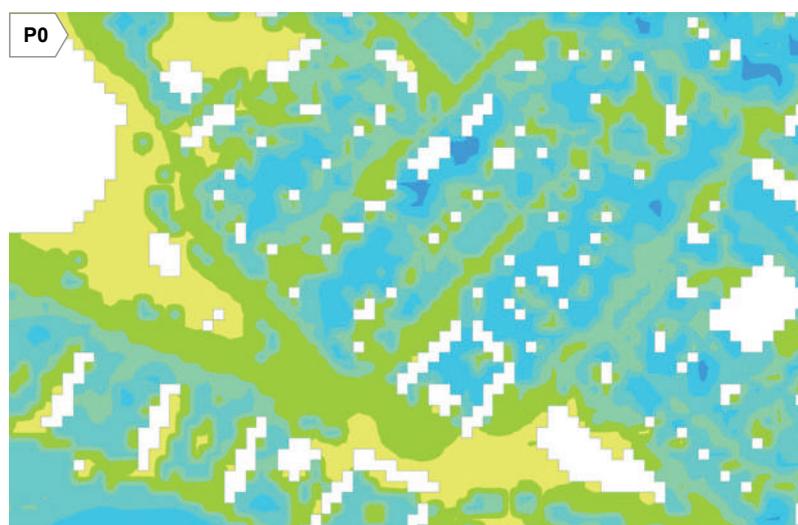
Température ressentie PET (°C)

■ à 24	■ de > 36 à 38
■ de > 24 à 26	■ de > 38 à 40
■ de > 26 à 28	■ de > 40 à 42
■ de > 28 à 30	■ de > 42 à 44
■ de > 30 à 32	■ de > 44 à 46
■ de > 32 à 34	■ de > 46 à 48
■ de > 34 à 36	■ de > 48 à 50

2.2 ANALYSE DE LA TEMPÉRATURE RÉELLE (°C)

Situation : à 2 mètres du sol, situation nocturne à 4 h.

Pertinence : La température de l'air varie considérablement en fonction du degré d'imperméabilisation, de la proportion de verdure, de la densité des constructions de sorte que les individus sont confrontés à différents niveaux de charge thermique* selon les quartiers. Ces cartes permettent d'identifier les espaces inconfortables et confortables. (voir Analyse climatique du canton de Genève, chapitre 4.1).



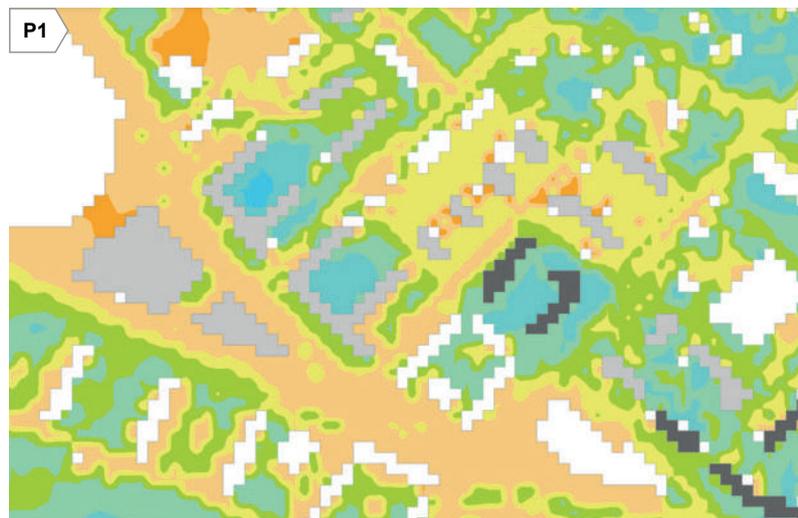
Cartes des paramètres climatiques actuels et futurs

Climat - Paramètres climatiques

Périodes: 1981-2010, 2020-2049, 2045-2074, 2070-2099

- Données contextuelles
- Situation diurne (14h00)
- Situation nocturne (04h00)
 - Température réelle (°C)
 - Ilot de chaleur (écart en °C avec pelouses)
 - Débit d'air froid (m³/[s*m])
 - Flèches de vent, résolution 10m (m/s)
 - Flèches de vent, résolution 200m (m/s)
 - Vitesse du vent (m/s)

(Source : SITG)



Climat - Paramètres climatiques

Périodes: 1981-2010, 2020-2049, 2045-2074, 2070-2099

- Données contextuelles
- Situation diurne (14h00)
- Situation nocturne (04h00)
 - Température réelle (°C)
 - Ilot de chaleur (écart en °C avec pelouses)
 - Débit d'air froid (m³/[s*m])
 - Flèches de vent, résolution 10m (m/s)
 - Flèches de vent, résolution 200m (m/s)
 - Vitesse du vent (m/s)

(Source : SITG)

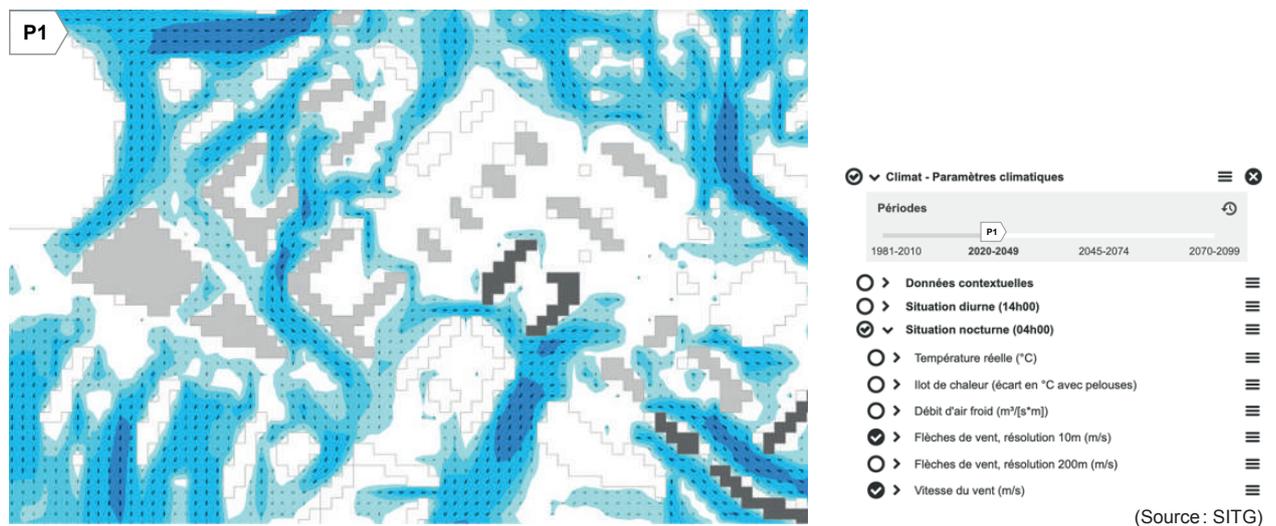
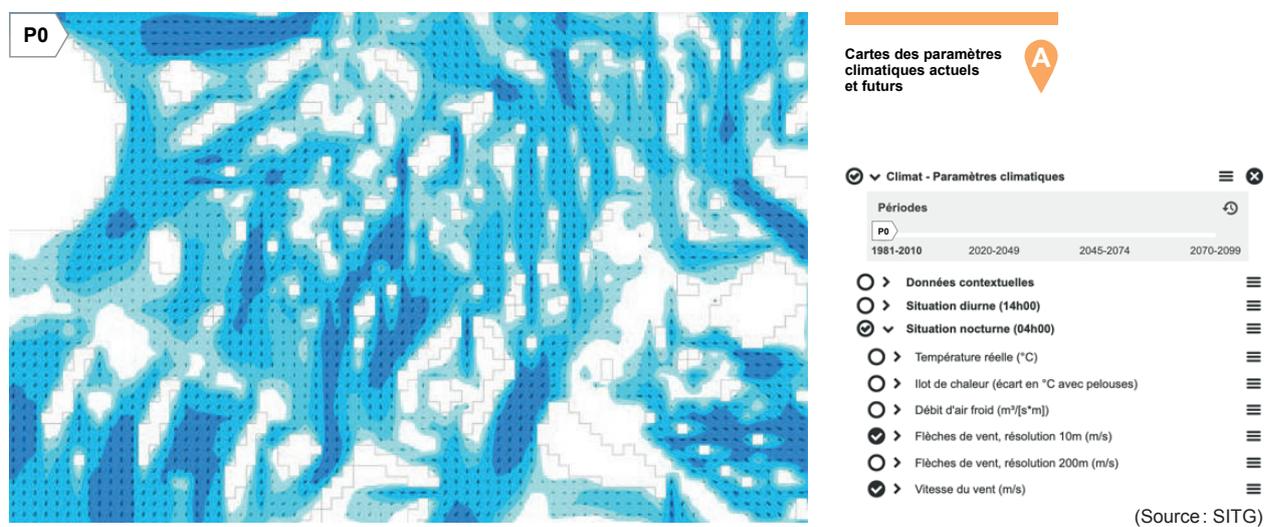
Situation nocturne (04h00) – Température réelle (°C)

à 12	de > 19 à 20
de > 12 à 13	de > 20 à 21
de > 13 à 14	de > 21 à 22
de > 14 à 15	de > 22 à 23
de > 15 à 16	de > 23 à 24
de > 16 à 17	de > 24 à 25
de > 17 à 18	de > 25 à 26
de > 18 à 19	de > 26 à 27

2.3 ANALYSE DES ÉCHANGES D’AIR FROID

Situation : à 2 mètres du sol, situation nocturne à 4 h.

Pertinence : Les courants d’air froid contribuent – même à faible vitesse – à réduire la charge thermique lors d’une situation météorologique estivale de haute pression. Les zones d’habitation profitent de l’air froid apporté par les environs. Ces cartes permettent d’apprécier comment un projet, selon son orientation, pourrait perturber l’écoulement des courants d’air froid (voir Analyse climatique du canton de Genève, chapitre 4.2).



Flèche de vent, résolution 10 m (m/s)

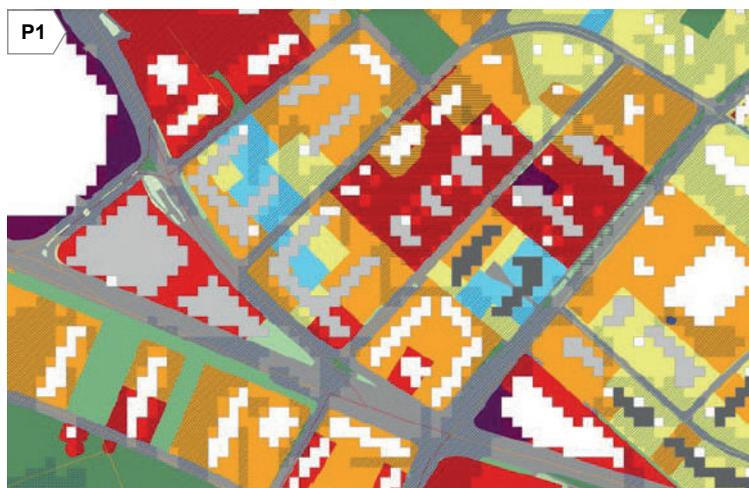
- à 0,1
- ↓ de > 0,1 à 0,2
- ↓ de > 0,2 à 0,3
- ↓ de > 0,3 à 0,5
- ↓ de > 0,5 à 1
- ↑ > 1

Vitesse du vent (m/s)

- à 0,1
- de > 0,1 à 0,2
- de > 0,2 à 0,3
- de > 0,3 à 0,5
- de > 0,5 à 1
- > 1

2.4 ANALYSE DE LA SITUATION BIOCLIMATIQUE*

Pertinence : Cette carte permet une meilleure compréhension de l'évolution des climats diurne et nocturne. Elle évalue le niveau de charge thermique dans la zone bâtie et l'importance des espaces verts comme espaces de compensation. En fonction de l'analyse, la nécessité d'agir dans les différentes zones apparaît clairement. La carte sert de base de décision pour la mise en œuvre de mesures d'adaptation au climat. Elle met ainsi en lumière les zones importantes pour la régulation du climat et les périmètres où des zones sont à protéger et où la situation doit être prioritairement améliorée, grâce à des mesures ciblées. À noter que, bien que traitant de données similaires, cette carte ne constitue pas une superposition des précédentes cartes.



Cartes d'analyse climatique nocturne B

☾

☑ Climat - Produits cartographiques

- > Carte d'analyse climatique nocturne 1981-2010
- > Carte d'analyse climatique nocturne 2020-2049
- > Carte indicative de planification diurne 2020-2049
- ☑ > Carte indicative de planification nocturne 2020-2049

(Source : SITG)



Cartes indicatives de planification C

☀

☑ Climat - Produits cartographiques

- > Carte d'analyse climatique nocturne 1981-2010
- > Carte d'analyse climatique nocturne 2020-2049
- ☑ > Carte indicative de planification diurne 2020-2049
- > Carte indicative de planification nocturne 2020-2049

(Source : SITG)

Espaces d'action :

- espace urbain
- Situation bioclimatique très favorable
- Situation bioclimatique favorable
- Situation bioclimatique moyenne
- Situation bioclimatique défavorable
- Situation bioclimatique très défavorable

Espaces de compensation :

- espaces verts et ouverts
- Très grande importance bioclimatique
- Grande importance bioclimatique
- Importance bioclimatique moyenne
- Faible importance bioclimatique
- Aucune importance bioclimatique

Les zones en bleu indiquent que les processus d'échange d'air froid sont très favorables. Ils ont donc un effet positif sur l'ICU (processus de refroidissement). Le bioclimat y est confortable et agréable, car la ventilation est satisfaisante. Ils sont donc à renforcer ou préserver.

Les espaces en vert foncé indiquent le caractère des zones refuges des espaces verts. Ils ont donc un rôle important en journée pour le confort bioclimatique. Ce sont des espaces à préserver/renforcer. À l'inverse, les espaces défavorables (en vert clair) incitent à prendre des mesures pour améliorer leur rôle bioclimatique.

ESPACE D’ACTION

Selon les caractéristiques de la température de l’air (situation nocturne) ou de la PET (situation diurne), on obtient différents niveaux de situation bioclimatique. La classe orange correspond à peu près aux conditions moyennes du canton de Genève, tandis que les zones bleues et jaunes sont relativement fraîches et les zones rouges et violettes plus chaudes que la moyenne.

ESPACE DE COMPENSATION

Selon la pertinence des processus d’air froid (situation nocturne) ou de la PET en combinaison avec l’accessibilité (situation diurne), différents niveaux d’importance sont attribués aux espaces de compensation. Les espaces verts à protéger ont une (très) grande importance bioclimatique et, inversement, les surfaces d’importance moindre peuvent être valorisées par des mesures appropriées.

3. Phase de planification

Ce chapitre concerne l'étape de planification du projet et porte à la fois sur les outils de planification indicative (image directrice, plan guide, schéma directeur, plan directeur de quartier, ...) et sur les outils de planification impérative (PLQ, plan de site).

3.1 ADAPTATION PAR LES TRAMES VERTE ET BRUNE

Les trames verte et brune jouent un rôle essentiel dans l'atténuation de la surchauffe urbaine. La trame verte agit dans la régulation de la température en absorbant l'ensoleillement et en favorisant l'évapotranspiration*, ce qui aide l'environnement à dissiper sa chaleur. Les espaces verts aident à la création de lieux de repli pour les habitantes et habitants lors de fortes chaleurs, en offrant de l'ombre, en réduisant l'absorption de chaleur et en procurant un environnement plus confortable pour tout un chacun. Cette trame verte doit nécessairement prendre en compte les trames brune et bleue pour amplifier les effets sur le milieu environnant⁶.

Le développement des trames verte et brune exige une planification minutieuse devant tenir compte des besoins en espace et en temps. Les arbres et la végétation ont des racines qui nécessitent de la place pour croître ; ils sont plus résilients dans des environnements où ils peuvent s'enraciner profondément dans des sols de qualité. Il est essentiel de veiller à préserver et à allouer suffisamment d'espace en pleine terre (sol libre), une connectivité entre les espaces ouverts (plantation continue, maillage, etc.) et une diversité des milieux (varier les strates), pour permettre leur bon développement.

Il est essentiel que les végétaux puissent avoir accès à de l'eau pluviale en suffisance. À l'échelle de la planification, l'objectif est de **maximiser** la présence et l'efficacité des trames verte et brune (voir la démarche du tryptique eau-sol-arbres), en respectant les **exigences de croissance** des plantes et en favorisant la **quantité** et la **qualité** de sols naturels, meubles et non-compactés, **d'enrichir** la diversité du végétal, en variant les milieux (arbus-tifs, prairials, etc.) et de **compléter** le développement de la trame verte par l'usage de dispositifs tels que les façades et les toitures végétalisées lorsque le contexte du projet rend la végétalisation compliquée, en raison de la forte concurrence d'occupation des sols et du sous-sol. Le **choix des essences** est un enjeu important à prendre en compte : les espèces indigènes adaptées aux situations contraignantes du contexte urbain favorisent la biodiversité et les services écosystémiques. Elles doivent être favorisées. L'ensemble de ces mesures permet aux trames verte et brune de contribuer de manière optimale à la limitation de la surchauffe urbaine. Les éléments constitutifs des trames verte et brune doivent donc être pris en compte dès l'échelle de la planification.

⁶ Pour plus d'informations voir l'article : « plus de vert et de bleu pour des villes où il fait bon vivre » (eawag, 2023).
[Lien vers l'article](#)

Intégration par la création de sols vivants

Le sol est un facteur clé pour le fonctionnement des écosystèmes terrestres. Poreux et hydraté, il pourra accueillir de la végétation, laquelle dépendra principalement des facteurs géographiques et climatiques. Le sol doit être **appréhendé** comme un espace tridimensionnel qui évolue dans le temps, un organisme autonome et une espèce parapluie qui permet à d'autres espèces, notamment végétales, de s'y installer et s'y développer. Les sols vivants existants et végétalisés doivent être protégés et maintenus ou au besoin reconstitués en milieu urbain, de manière à être en capacité de rafraîchir le milieu. L'approche la plus courante consiste à partir du besoin des arbres, puis **planifier** le sol qui permettra leur croissance. Une autre approche propose de planifier la revitalisation à large échelle des sols urbains, puis, après un temps d'observation, déterminer les arbres qui peuvent y être plantés.

LEVIERS D'ACTION

- Typologies de sols¹ :
 - espaces de pleine terre avec sols naturels vivants y c. sols pseudonaturels reconstitués ;
 - sols construits, anthropiques y c. technosols, sols artificiels ou restauration des sols dégradés ;
 - sols bruts scellés en totalité (par du ciment ou bitume) ou partiellement scellés (pavés).
- % surfaces sols naturels ou revitalisés existants (pleine terre, sols sur dalle) et projetés
- Aptitude du sol à réaliser l'ensemble de ses fonctions écologiques² (= qualité du sol).

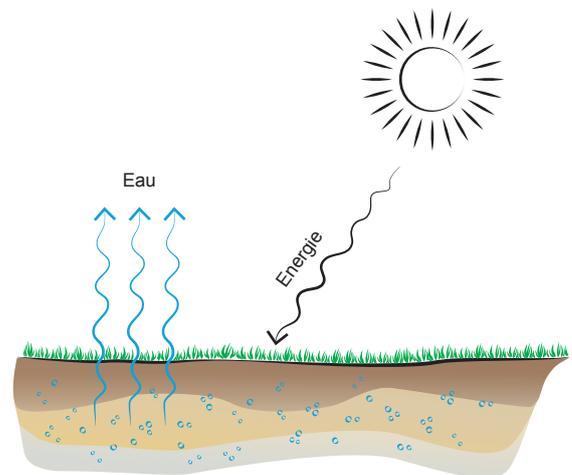


Schéma 1

Effet climatique du sol. L'évaporation de l'eau utilise de l'énergie thermique. Un sol humide ralentit le réchauffement de l'environnement.
(Source : Bastien Guex – GESDEC – 2024)

INFLUENCE CLIMATIQUE

- ☀️ ☾ • Absorption de l'énergie thermique par évaporation de l'eau ;
- ☀️ ☾ • Inertie thermique du sol liée à sa teneur en eau.



Sol technique en coupe – Stade des Cherpines (Crédit photo : B. Guex)



POINTS À CONSIDÉRER

- Le projet privilégie-t-il la préservation des sols présents sur le site ?
- Le projet conserve-t-il ou crée-t-il des espaces de pleine terre (taux de sols naturels ou pseudonaturels) ?
- Le projet revitalise-t-il des sols anthropiques dégradés ?
- La stratégie de création de sols naturels est-elle optimisée afin d'atténuer efficacement l'effet d'îlot de chaleur urbain ?
- Les besoins de surfaces portantes pour la mobilité (fonction support) et de surfaces meubles (fonctions écologiques du sol) ont-ils bien été évalués ?
- Le projet est-il basé sur un diagnostic pédologique et/ou géologique pour adapter ses objectifs à l'état existant ?
- Le projet a-t-il contrôlé le niveau de pollution du sol ou du terrain avant de proposer de nouveaux usages ?
- Le projet favorise-t-il la réutilisation des sols et des roches provenant du site ?



POINTS DE VIGILANCE

- **Saisonnalité des travaux sur les sols**
Il faut intervenir sur les sols lorsqu'ils sont le moins fragile, c'est-à-dire res-suyés (l'eau a quitté les pores les plus gros pour ne rester que dans les plus petits). Les sols secs sont plus résistants au tassement. C'est pourquoi les travaux sur les sols doivent être planifiés entre le printemps et l'automne.
- **Une ressource naturelle non renouvelable**
Les matériaux issus des sols ont nécessité plusieurs milliers d'années pour se constituer. C'est une ressource qui se raréfie localement et globalement. Un déficit cantonal en terre végétale provenant de la couche supérieure du sol (horizon A) est déjà constaté. A ce titre, la ressource sol doit être utilisée à bon escient. Par exemple, l'utilisation de terre végétale pour la constitution de mélanges terre-pierre qui serviront de fondation à des voiries ou de technosols n'est pas toujours nécessaire.
- **Porosité, la valeur clef**
Le sol est constitué d'une fraction solide et de vides dans lesquels circulent l'air, l'eau et les racines. La compaction nécessaire aux surfaces pour la mobilité va à l'encontre de la porosité du sol, laquelle est fondamentale pour la réalisation de ses différentes fonctions écologiques.

¹ Basé sur le modèle de classification SUITMAs acronyme de Soils, of Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas

² Les 3 fonctions écologiques du sol : habitat = capacité du sol à servir de milieu de vie ; régulation = capacité du sol à réguler les cycles de l'eau, des substances et de l'énergie ; production = capacité du sol à produire de la biomasse.

Intégration par l'arborisation

L'arbre est le **sujet majeur** de la trame verte par l'**ombrage** qu'il procure et sa capacité à réguler la température de son feuillage. Il joue un rôle déterminant dans la stratégie d'atténuation de l'effet d'îlot de chaleur et dans l'apport de confort climatique en milieu urbain. L'arbre est un **être vivant** à part entière qui a des besoins physiologiques nécessaires à son bon développement. Il a donc besoin d'un sol de qualité et d'eau en quantité suffisante en fonction de son essence et de sa taille. À l'échelle de la planification, il est nécessaire de planifier un **taux de canopée suffisant** et de garantir en conséquence des volumes de terre adaptés à l'arbre, en privilégiant les **surfaces en pleine terre, dans la mesure du possible sur des sols naturels**. En outre, une disposition des arbres inadéquate peut avoir un effet barrière qui maintient la chaleur au sol pendant la nuit.

LEVIERS D'ACTION

- Typologie des arbres* : 1^{re}, 2^e ou 3^e grandeur ;
- Pourcentage d'arborisation du secteur actuel et ambition projetée ;
- Sols (qualité et quantité comme support de plantation – maximisation de la pleine terre).

INFLUENCE CLIMATIQUE

- ☀️ 🌙 • Ombrage (réduction du rayonnement solaire et donc du stockage de la chaleur pendant la journée) ;
- ☀️ 🌙 • Évapotranspiration (rafraîchissement des températures par les feuilles).

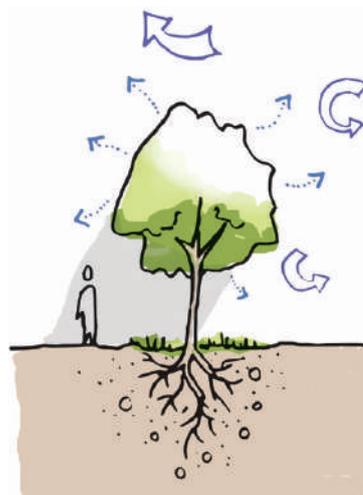


Schéma 2

Effet climatique de l'arbre. L'évapotranspiration maintient les feuillages frais, tandis que l'ombrage offre un confort aux habitant·e·s tout en réduisant la charge thermique du lieu. (Source: ADEME)



Hauts de Malagnou – Chêne-Bougeries (Crédit photo : F. De Limoges)



POINTS À CONSIDÉRER

- Le projet privilégie-t-il la préservation des arbres présents sur le site ?
- L'arborisation favorise-t-elle la biodiversité (choix des espèces, emplacement) ?
- Quelle est la contribution du projet à l'atteinte des ambitions de couverture végétale (taux de canopée) ?
- Le projet prévoit-il suffisamment d'espace et de volume en pleine terre pour répondre aux besoins physiologiques des arbres ?
- Est-ce que la pleine terre est utilisée pour la plantation d'arbres lorsque sa disponibilité est limitée ?
- Les arbres sont-ils disposés de manière à contribuer par leur ombrage direct au confort climatique des lieux de séjour ?
- La stratégie de densité et de répartition des arbres est-elle optimisée afin d'atténuer efficacement l'effet d'îlot de chaleur urbain ?
- Est-ce que la pleine terre est prioritairement utilisée pour la plantation d'arbres de 1^{re} ou 2^e grandeur lorsque sa disponibilité est limitée et que la distance aux constructions le permet ?
- La pluie tombant sur le périmètre de projet est-elle écoulee en surface dans des espaces végétalisés ?



POINTS DE VIGILANCE

- **Choix des essences**
Afin de favoriser la biodiversité, les espèces indigènes doivent être privilégiées et les espèces exotiques envahissantes doivent être proscrites (se référer à la liste officielle des espèces invasives de l'OFEV).
- **Garantie d'espace pour le développement des arbres**
Un arbre s'épanouit pleinement lorsque son besoin essentiel en qualité et en volume de sol est assuré. Compte tenu de l'occupation du sous-sol (infrastructures, réseaux), la garantie d'espace libre doit être assurée dès la phase de planification. Ignorer cette considération en ne garantissant pas suffisamment de surface en pleine terre peut entraver le bon développement des arbres, compromettant ainsi le niveau attendu du taux de canopée du projet et des qualités climatiques qui en découlent.
- **Répartition judicieuse des arbres**
Bien que la concentration d'arbres en un seul endroit du projet puisse générer un taux élevé de canopée, cette approche ne garantit pas une efficacité optimale dans la lutte contre la surchauffe urbaine. En effet, une mauvaise répartition peut engendrer un effet de barrière qui réduit la dispersion de la chaleur en période nocturne. Dès lors, répartir les arbres sur l'ensemble du projet offre de multiples zones de refuge pendant les périodes de fortes chaleurs, tout en ombrageant une plus grande surface. En outre, il faut prendre en compte les échelles de planification, car les trames verte et brune sont constituées d'éléments macro qui se déclinent localement.

■ Régénération et végétalisation des sols urbains

Les sols naturels, même non arborés, offrent des qualités climatiques non négligeables à l'environnement urbain. Leur **perméabilité**, leur **profondeur** et leur **qualité** permettent d'absorber et de stocker une grande quantité d'eau. Celle-ci, en s'évaporant, aidée par l'évapotranspiration des plantes, permet d'atténuer la chaleur absorbée par la surface, d'autant plus que la végétation basse procure un micro-ombrage qui limite l'absorption du rayonnement solaire par le sol. À l'échelle de la planification, il est nécessaire de maximiser la quantité de sols naturels remaniés et non remaniés, mais également leur qualité en préservant un maximum de surfaces en pleine terre et en prévoyant leur régénération. À noter qu'un gazon vert a un effet localisé à la surface du sol, mais qui s'atténue au-delà.

LEVIERS D'ACTION

- % de surface du secteur recouverte de terre végétale (perméabilité du sol);
- % et disposition des surfaces en pleine terre remaniées et non remaniées;
- Régénération et végétalisation des sols scellés* et imperméabilisés.

INFLUENCE CLIMATIQUE

- ☀ ☾ • Infiltration/stockage de l'eau en profondeur et évapotranspiration;
- ☀ • Surfaces fraîches pour les habitantes et habitants et l'ensemble du vivant non humain.

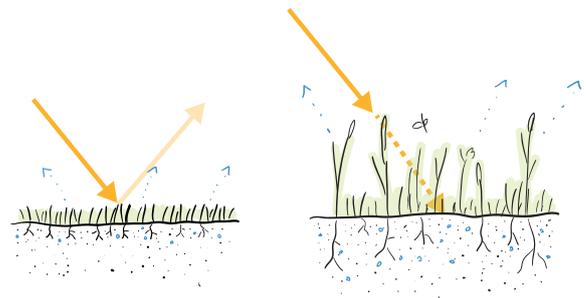


Schéma 3

Bilan thermique des sols naturels. À gauche un gazon bas, à droite une prairie. L'évapotranspiration permet de garder une surface fraîche, tandis que la végétation haute fournit un micro-ombrage bénéfique pour l'atténuation de la charge thermique du lieu. (Source : ADEME, redessiné et modifié par LECEA-HEPIA, 2024)



Exemple de sol végétal régénéré (Crédit photo : M Gafsou)



POINTS À CONSIDÉRER

- Est-ce que le sol naturel déjà présent sur le site a été préservé au maximum ?
- La végétalisation favorise-t-elle la biodiversité (choix des espèces, emplacement) ?
- Le projet intègre-t-il des surfaces végétalisées (comme des pelouses ou des prairies) ?
- Le projet contribue-t-il à la régénération des sols urbains (mesures de désimperméabilisation, de restructuration et de fertilisation) ?
- Le projet a-t-il pris en compte la qualité des sols végétalisés en assurant, entre autres, une épaisseur adéquate du sol (en favorisant les surfaces en pleine terre), le potentiel de développement des organismes vivants, en veillant à leur continuité spatiale et en prenant en compte leur entretien ?
- Les sols végétalisés sont-ils disposés et répartis de manière à atténuer efficacement l'effet d'îlot de chaleur urbain ?
- La pluie tombant sur le périmètre de projet est-elle écoulee en surface vers des espaces de pleine terre ?



POINTS DE VIGILANCE

• **Préservation et entretien des sols végétalisés urbains**

En milieu urbain, les sols naturels font face à divers stress, souvent attribuables aux usages spécifiques des zones urbaines tels que la pollution, la compaction, le déficit hydrique, etc. Il est impératif d'accorder une attention particulière à la préservation des sols naturels dans le cadre des projets urbains, tout en intégrant une perspective de régénération ou de réparation via le projet. L'entretien implique de préserver ou d'augmenter l'épaisseur et la continuité de ces sols afin de sauvegarder leurs qualités climatiques, même en période de sécheresse ou de fortes précipitations (effet éponge du sol).

• **Disposition judicieuse de la végétalisation des sols**

Prioriser la végétalisation des surfaces les plus exposées aux risques de surchauffe, telles que celles au pied des façades sud. Cette approche ciblée contribue significativement à atténuer les températures élevées dans les zones urbaines, renforçant ainsi les bénéfices climatiques de la végétalisation. Le choix des essences est un enjeu important à prendre en compte (espèces indigènes et/ou adaptées à des situations contraignantes de contexte urbain) pour favoriser la biodiversité et les services écosystémiques.

• **Choix des essences**

Afin de favoriser la biodiversité, les espèces indigènes doivent être privilégiées et les espèces exotiques envahissantes doivent être proscrites (se référer à la liste officielle des espèces invasives de l'OFEV).

• **Gestion de l'eau pour les surfaces végétalisées exposées au soleil**

Les surfaces les plus exposées au soleil évaporent une quantité d'eau plus importante, augmentant ainsi le risque de stress hydrique du sol. Il est donc essentiel de garantir une accessibilité en eau suffisante, même en période de sécheresse, pour préserver les qualités climatiques du sol. Un sol sain et vivant a une grande capacité de garder de l'eau sur une longue période.



Les Vergers – Meyrin (Crédit photo : M. Gafsou)



Place du Cirque – Genève (Crédit photo : F. De Limoges)

3.2 ADAPTATION PAR LA TRAME BLEUE

Les composantes de la trame bleue apportent une contribution majeure au confort climatique urbain. Les deux éléments principaux de cette trame sont la gestion de l'eau de surface et les étendues d'eau telles que les lacs, étangs, zones humides, noues, rivières et nants. La gestion efficace de l'eau en surface revêt une importance cruciale dans la régulation thermique urbaine et l'atténuation des îlots de chaleur. De même, les éléments naturels, tels que les lacs, étangs, zones humides, noues, rivières et nants, exercent une influence significative sur le microclimat urbain*. Ces éléments de la trame bleue peuvent être pensés conjointement aux éléments plantés de la trame verte et à la préservation/régénération de la trame brune (« triptyque Eau-Sol-Arbres » ; jardins de pluie, etc.). Cette synergie offre une opportunité de concevoir des espaces urbains où la régulation de l'eau et la préservation de la biodiversité travaillent de concert pour offrir de hautes qualités climatiques.

Les étendues d'eau

Les plans d'eau, qu'ils soient naturels comme les rivières et les lacs ou artificiels comme les bassins, jouent un rôle important dans la régulation climatique des zones urbaines. En absorbant l'énergie solaire et en la dissipant par évaporation, ils permettent de diminuer la charge thermique du lieu, créant ainsi des environnements plus frais, surtout lorsqu'ils sont bordés de végétation. Leur intégration dans la planification permet de lutter contre les îlots de chaleur, réduisant la chaleur du quartier et offrant des espaces de fraîcheur pour le vivant humain et non humain.

LEVIERS D'ACTION

- Aménagement des rives de lac et de cours d'eau ;
- Remise à ciel ouvert/décanalisation des cours d'eau ;
- Aménagement de biotopes aquatiques ;
- Aménagement de bassins d'agrément ou jeux d'eau ;
- Accessibilité aux espaces d'eau naturels et/ou artificiels.

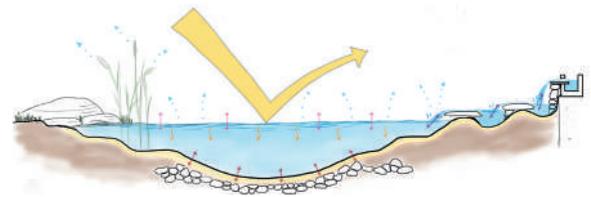


Schéma 4

Bilan énergétique d'un plan d'eau. L'énergie solaire est absorbée par la surface, mais ne monte pas en température grâce à l'évaporation du plan d'eau. (Source : ADEME, redessiné et modifié par LECEA-HEPIA, 2024)

INFLUENCE CLIMATIQUE

- ☀️ ☾ • Possibilités de contact avec les éléments d'eau. Rafraîchissement des usagères et usagers durant la journée ;
- ☀️ ☾ • Absorption du rayonnement (réduction de la charge thermique et de l'ICU) ;
- ☀️ ☾ • Surfaces fraîches pour les usagères et usagers.



Les Vergers – Meyrin – Lac des Vernes (Crédit photo : F. De Limoges)



POINTS À CONSIDÉRER

- Est-ce que le projet peut exploiter les effets climatiques des étendues d'eau (lac, cours d'eau) déjà présentes sur le site ?
- Le projet a-t-il la possibilité de remettre à ciel ouvert et renaturer des cours d'eau déjà présents sur le site ?
- Est-ce que le contexte du projet incite à l'aménagement d'un biotope ou d'un plan d'eau naturel ou artificiel ?
- Est-ce que le contexte du projet permet l'aménagement de jeux d'eau, fontaines, brumisateurs ?
- Est-ce que le projet permet une accessibilité aux plans d'eau pour les habitantes et habitants ?
- Les aménagements et l'orientation des structures autour des plans d'eau sont-ils conçus pour tirer parti d'éventuelles brises provenant du plan d'eau ?
- Le projet intègre-t-il l'articulation des différentes trames à la bonne échelle (par exemple : acheminement des eaux pluviales vers les (fosses de plantations) ?



POINTS DE VIGILANCE

- **Effets localisés des étendues d'eau**
Les effets climatiques des plans d'eau sont très localisés. Pour en maximiser les avantages, il est nécessaire de garantir l'accessibilité des rives et du centre des plans d'eau aux habitantes et habitants. Orienter les bâtiments de manière à favoriser les brises thermiques générées par les variations de température permet d'étendre les effets climatiques.
- **Rôle des plans d'eau dans le confort climatique**
Les plans d'eau de petite superficie ont un impact limité sur la température de l'air. Cependant, ils jouent un rôle essentiel en offrant des surfaces rafraîchissantes aux habitantes et habitants. Même si leur contribution positive sur le climat urbain est très localisée, ils améliorent le confort thermique des individus en offrant des zones de fraîcheur au sein d'un environnement urbain.
- **Gestion de l'eau pour les plans d'eau artificiels**
L'évaporation présente des effets climatiques favorables, mais entraîne également une consommation substantielle de l'eau. Pour les plans d'eau artificiels, particulièrement vulnérables pendant les périodes de sécheresse, l'approvisionnement en eau doit être une priorité constante. Prévenir la perte de qualité climatique de ces étendues d'eau artificielles nécessite un approvisionnement d'eau, qui doit être garanti même lorsque les conditions météorologiques deviennent arides.

■ Gestion des eaux pluviales

Les aménagements paysagers intégrant une gestion et une valorisation des eaux pluviales s'inscrivent dans une approche de gestion à la source, visant à capter la pluie au plus près de son point de chute. Ces structures agissent comme des régulateurs en ralentissant les flux d'eau, favorisent un écoulement régulé par tamponnage, et facilitent l'infiltration des eaux sur le site. Outre leur impact positif sur l'hydrologie et le cycle de l'eau, ces dispositifs présentent des effets climatiques significatifs. Temporairement ou de manière permanente, ils créent des environnements humides propices à l'évaporation et à l'évapotranspiration des végétaux. Intégrer ces aménagements dès la conception des projets permet d'atténuer les risques d'inondation, de rétablir un cycle de l'eau naturel, de réguler la température locale et de promouvoir des environnements urbains plus durables et résilients sur le plan climatique.

LEVIERS D'ACTION

- Adéquation d'espaces permettant une gestion de l'eau en surface (bassins, noues, étangs, mares).

INFLUENCE CLIMATIQUE

- ☀ ☾ • Infiltration et stockage de l'eau en profondeur (effet éponge);
- ☀ ☾ • Évapotranspiration (fraîcheur des surfaces);
- ☀ ☾ • Limitation du risque de stress hydrique des plantes.

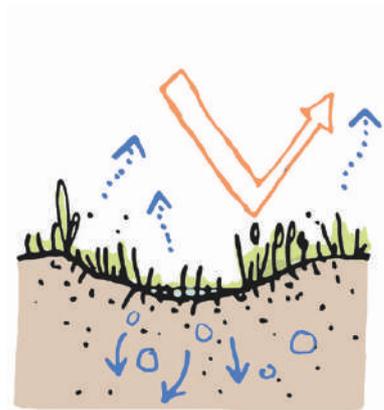


Schéma 5

Effet climatique d'une noue plantée. Elle offre des sols plus résilients aux fortes chaleurs grâce à l'évaporation de l'eau plus facilement infiltrée et stockée en profondeur. (Source: ADEME)



Noues paysagères – Les Scières (Crédit photo: F. Bachmann)



POINTS À CONSIDÉRER

- Le projet de gestion des eaux pluviales favorise-t-il le passage et le stockage des eaux de pluie sur le site ?
- Le projet porte-t-il une réflexion sur les chemins de l'eau à ciel ouvert ?
- Le projet minimise-t-il le recours à des dispositifs souterrains d'évacuation et de gestion des eaux (grilles, canalisations, bassins de rétention enterrés, ...) ?
- La réflexion au sujet de l'eau de pluie est-elle élargie à celle du triptyque Eau-Sol-Arbre/Végétation ?
- Le projet amène-t-il une plus-value au niveau des écosystèmes aquatiques ?
- Le projet intègre-t-il une réflexion sur la manière de capter, de centraliser et de valoriser l'eau de pluie pour des usages, notamment l'irrigation des espaces verts ?
- Le projet intègre-t-il les incertitudes liées aux extrêmes climatiques, notamment les pluies extrêmes et les sécheresses ?



POINTS DE VIGILANCE

- **Risque de stress hydrique* dû à la canalisation souterraine des eaux**
L'imperméabilisation des sols et la canalisation souterraine des eaux de pluie privent les sols naturels d'une grande source en eau augmentant ainsi le risque d'avoir des sols en stress hydrique en été.
- **Rôle des bassins de rétention et noues plantées dans la gestion des eaux**
Les bassins de rétention et les noues plantées sont majoritairement « secs » en période estivale. Leur principale qualité climatique réside dans le fait de favoriser l'infiltration des eaux pluviales et d'alimenter les sols en eau, fournissant des sols et une végétation plus résilientes au stress hydrique.



Bords de l'Arve (Crédit photo : L. Van Siebenthal)



Bords de l'Aire (Crédit photo : F. De Limoges)

3.3 ADAPTATION PAR LA TRAME GRISE

La trame grise contribue à l'augmentation de la surchauffe urbaine en absorbant et retenant la chaleur, en freinant les écoulements et mélanges d'air, et en entraînant des températures plus élevées que d'autres surfaces en journée. Néanmoins, la trame grise peut aussi générer des zones d'ombre grâce aux bâtiments, ce qui réduit l'absorption et le stockage de chaleur tout en offrant des espaces de refuge pour les individus et la faune. À l'échelle de la planification, l'objectif est de réduire l'impact négatif de la trame grise sur la surchauffe urbaine tout en maximisant ses avantages. Cela s'opère dans le contexte contraignant de l'urbanisation qui doit garantir la densification et la fonctionnalité des espaces urbains. En outre, les choix morphologiques ont une incidence sur la circulation des vents et par conséquent sur le ressenti thermique. Par conséquent et selon les usages futurs des

espaces, il est nécessaire de trouver un équilibre en **adaptant la morphologie urbaine et en limitant les surfaces minérales et imperméables**, afin de promouvoir un développement urbain qui minimise les effets néfastes sur les microclimats urbains et exploite les aspects positifs sur l'atténuation de la surchauffe urbaine. Il est par ailleurs essentiel de considérer également les sources de chaleur produites par les activités humaines qui exacerbent la surchauffe urbaine. La chaleur dégagée par la climatisation des bâtiments est évacuée dans l'espace extérieur, de même que le transport et d'autres activités qui génèrent une chaleur additionnelle. Dès lors, il est essentiel de les prendre en compte dès les premières étapes de la planification, afin de réduire leurs émissions autant que possible ou, à défaut, d'en atténuer les effets.

Adaptation de la morphologie urbaine

La morphologie urbaine, incluant la disposition et la hauteur des bâtiments, la largeur et l'orientation des rues, ainsi que les espaces ouverts ou fermés, joue un rôle essentiel pour améliorer le confort des usagères et usagers en prévenant des effets de « canyon urbain ». Elle influence la quantité de rayonnement solaire frappant les surfaces urbaines le jour, la quantité de chaleur dissipée la nuit, et la ventilation naturelle. À cette échelle, trois indicateurs doivent être pris en compte dans la conception du projet urbain : **la course solaire***, **la part de ciel visible*** ainsi que les éventuelles **brises thermiques*** et **vents dominants**.

LEVIERS D'ACTION

- Disposition, orientation et gabarits des structures bâties – morphologie urbaine (bâtiments, infrastructures).

INFLUENCE CLIMATIQUE

- ☀ • Course solaire ;
- ☀ ☾ • Part de ciel visible (« sky view factor » – SVF) – capacité de dissipation radiative de la chaleur sur le ciel (pour les surfaces et le corps humain) ;
- ☀ ☾ • Impact sur la circulation des vents, aération naturelle à ne pas obstruer.

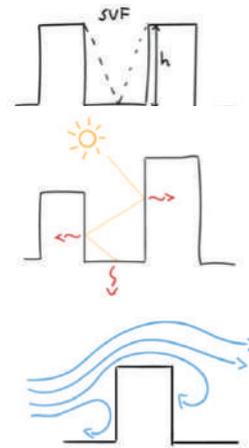


Schéma 6

Les influences climatiques de la morphologie urbaine se manifestent par une réduction de la visibilité du ciel, une circulation d'air limitée et un piégeage radiatif conséquent, contribuant ainsi à l'effet d'îlot de chaleur urbain. (Source : ADEME, redessiné et modifié par LECEA-HEPIA, 2024)



La Chapelle – Lancy (Crédit photo : F. de Limoges)



POINTS À CONSIDÉRER

- La morphologie urbaine (orientation, gabarits, disposition) intègre-t-elle la course solaire d'été, afin de réduire la quantité de rayonnement solaire absorbée ?
- La morphologie urbaine favorise-t-elle l'ombrage l'été, afin d'offrir des lieux de refuge aux habitantes et habitants ainsi qu'à la faune ?
- Est-ce que les morphologies des quartiers permettent une bonne dissipation de la chaleur grâce à une part de ciel visible importante ?
- La morphologie urbaine peut-elle capitaliser sur les brises ou mouvements d'air dominants afin d'améliorer le confort thermique en été et favoriser une circulation d'air optimale dans les rues/places ?
- Est-ce que la morphologie de l'îlot et les modénatures des bâtiments* permettent de répondre aux besoins de ventilation urbaine et d'ombres portées pour offrir des lieux tempérés dans les espaces ouverts ?
- Quelle typologie permet d'assurer un maximum d'éclairage naturel dans les pièces et un rafraîchissement naturel des logements ?
- Quelles conditions d'habitat des logements en regard à leurs prolongements extérieurs, loggias, cours intérieures, balcons, terrasses ?
- Les dispositifs proposés se retrouvent-ils sous forme réglementaire ?
- Le projet prend-il en compte les sources de chaleur anthropiques (p. ex. chaleur liée à la circulation motorisée, rejets liés à des activités économiques, dispositifs techniques en lien avec les bâtiments tels que la climatisation, etc.) ?



POINTS DE VIGILANCE

- **Gestion complexe de la part de ciel visible**
Une grande part de ciel visible peut améliorer le rafraîchissement nocturne, mais elle peut aussi augmenter l'exposition au soleil en journée, entraînant une absorption accrue de chaleur. La complexité de ces influences contradictoires dans les rues et places urbaines nécessite une pondération judicieuse entre la part de ciel visible et la course solaire pour identifier des stratégies adaptées d'atténuation de la surchauffe urbaine.
- **Conception attentive des surfaces au pied des façades sud**
Les surfaces au pied des façades sud sont fortement exposées au soleil. Elles ont donc une propension à stocker une quantité importante de chaleur. Une conception minutieuse et l'utilisation de matériaux et d'espèces végétales appropriés sont essentielles pour minimiser cet effet thermique et maintenir des conditions de confort dans les espaces adjacents.
- **Équilibre entre ciel visible et confort diurne**
Les rues ou places offrant une part significative de ciel visible ont le potentiel de libérer efficacement la chaleur la nuit, mais cela peut poser des défis de confort en journée en raison de l'exposition au rayonnement solaire. L'intégration d'arbres ou de dispositifs d'ombrage permet d'offrir des zones de refroidissement et assurer le bien-être des habitantes et habitants. Plus largement, toute le traitement des façades sud doit faire l'objet d'une conception attentive (inertie thermique découlant de la teinte et de la matérialité de la façade, expression architecturale tenant compte de l'ensoleillement, système d'obscurcissement permettant l'ombrage et le courant d'air, ...).
- **Orientation attentive des bâtiments en fonction des vents**
L'orientation des bâtiments en fonction des brises et des vents dominants demande une planification minutieuse. Un équilibre entre la course solaire et la direction des vents est essentiel pour déterminer l'orientation optimale des bâtiments et éviter des effets contre-productifs.

Diminution des surfaces minérales et imperméables

L'environnement urbain se caractérise par l'utilisation massive de surfaces minérales imperméables, comme le béton et l'asphalte, néanmoins nécessaires pour certaines activités urbaines. Cependant, ces revêtements empêchent l'absorption et la rétention de l'eau en profondeur, limitant ainsi la dissipation de la chaleur par évaporation. De plus, ils présentent une forte inertie thermique, ce qui signifie qu'ils ont la capacité de stocker puis relâcher une quantité importante de chaleur, contribuant ainsi à l'aggravation de l'effet d'îlot de chaleur urbain.

LEVIERS D'ACTION

- Surfaces routières et de stationnement, places et espaces publics

INFLUENCE CLIMATIQUE

- ☀️ 🌙 • Accumulation de la chaleur pendant la journée et restitution pendant la nuit (participe à l'effet d'îlot de chaleur urbain).

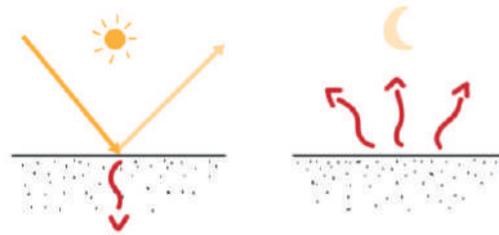


Schéma 7

Bilan énergétique des surfaces minérales et imperméables. Contrairement aux surfaces naturelles et aux surfaces d'eau, les surfaces imperméables ne peuvent pas bénéficier de l'évaporation pour diminuer la charge thermique, d'autant plus que la minéralisation des espaces extérieurs augmente la quantité de chaleur stockée. (Source : ADEME, redessiné et modifié par LECEA-HEPIA, 2024)



Belle-Terre – Thônex (Crédit photo : M. Gafsou)



POINTS À CONSIDÉRER

- Les surfaces recouvertes de revêtements de sol imperméables et minéraux ont-elles été minimisées et rationalisées de manière à réduire leur empreinte au sol ?
 - La disposition spatiale de ces surfaces minérales et imperméables a-t-elle été réfléchie de manière à les exposer moins directement au soleil ?
 - Les surfaces minérales et imperméables peuvent-elles être minimisées dans les zones les plus critiques à la surchauffe urbaine, c'est-à-dire les zones très ensoleillées et avec une faible part de ciel visible ?
 - Est-ce qu'une stratégie d'ombrage des surfaces minéralisées peut être envisagée ?
-



POINTS DE VIGILANCE

- **Ombrage des surfaces minérales exposées**
Il est essentiel de prendre des mesures pour ombrager les surfaces minérales exposées au soleil, que ce soit par des structures architecturales ou de la végétation. Cette stratégie réduit l'exposition directe au soleil de ces surfaces, limitant ainsi leur absorption d'énergie solaire. En maintenant des températures plus basses et en minimisant la rétention de chaleur, cette approche contribue à créer un environnement urbain plus confortable et frais et joue un rôle dans la réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain.
 - **Rationalisation de l'utilisation des matériaux thermiquement problématiques**
Les routes revêtues d'asphalte ou de bitume, en raison de leur nature absorbante de chaleur, contribuent significativement à la surchauffe urbaine. Bien que nécessaires pour les routes fréquentées par des véhicules, il est impératif de rationaliser leur utilisation et de limiter leur empreinte au sol exclusivement aux voies empruntées par ces véhicules. Une gestion judicieuse de ces matériaux permet de minimiser l'impact thermique négatif sur l'environnement urbain et permet l'ajout de végétaux le long des voies et des places.
-

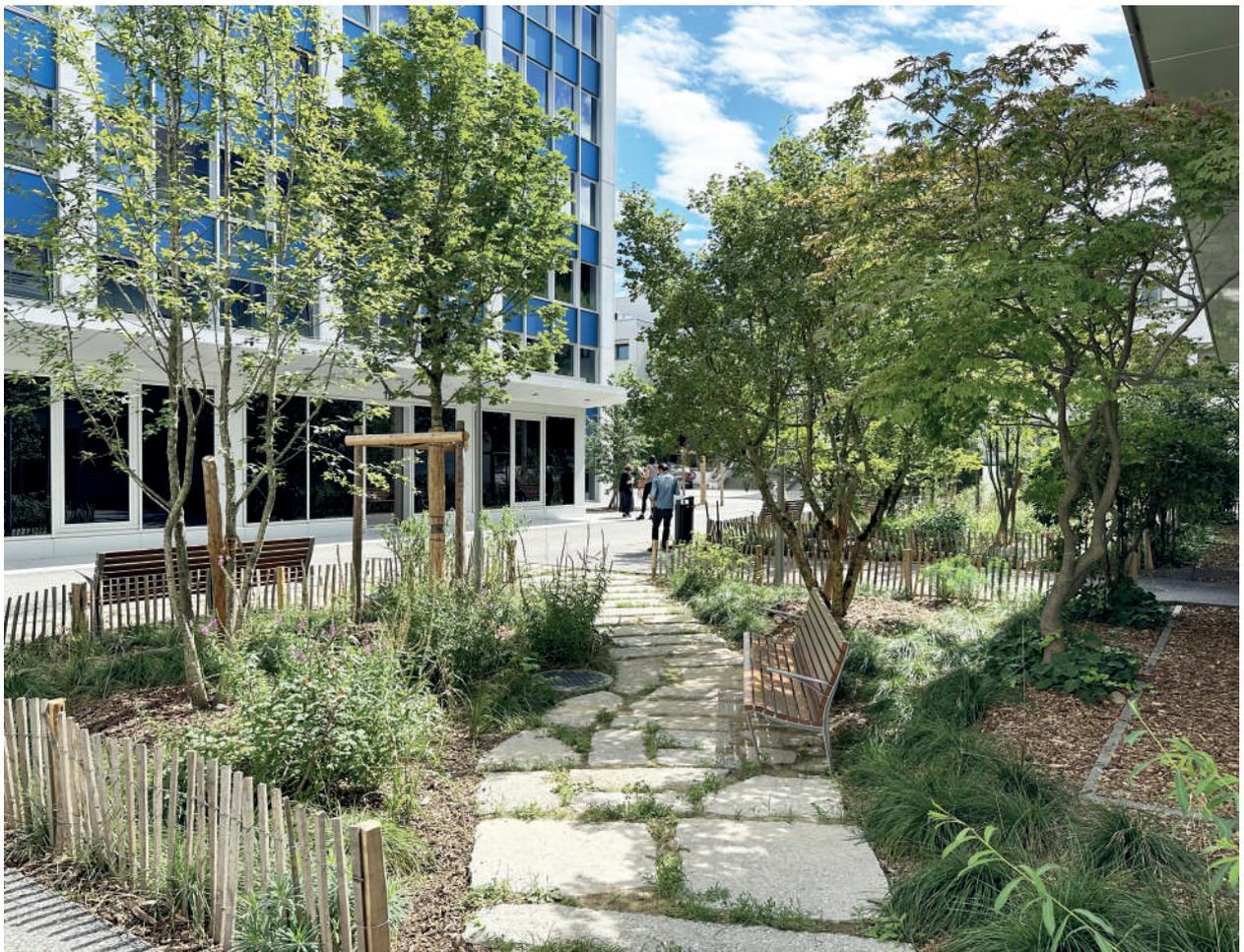
4. Phase de projet: espace public (place, parc, rue, route, ...)

L'espace public* est essentiel à une vie en ville de qualité; il assure le trait d'union entre les éléments constitutifs d'un quartier et constitue autant de lieux de rencontre, d'espaces fonctionnels, de lieux de flânerie ou encore de culture à destination de la population.

Bien souvent, de par leurs multiples usages et pour en faciliter l'entretien, les matériaux utilisés ont des capacités d'absorption et de stockage/déstockage de la chaleur qui favorisent le processus d'îlot de chaleur et d'inconfort climatique. Selon la propriété des matériaux, des contrastes de température importants sont observés. Trois paramètres doivent être pris en considération pour estimer la température d'équilibre* de chaque surface: l'albédo*, l'inertie thermique* et le mode de réflexion.

4.1 ADAPTATION PAR LES TRAMES VERTE ET BRUNE

Lors des étapes de réalisation d'un espace public, une considération approfondie des éléments constitutifs des trames verte et brune est impérative pour intégrer efficacement les préoccupations liées au climat urbain. Cette partie offre une perspective détaillée sur deux aspects essentiels de la trame verte : la strate arborée et la strate arbustive/herbacée. Ces composantes végétales ne sont pas seulement des éléments décoratifs, mais constituent des vecteurs majeurs dans la régulation thermique et la gestion des microclimats urbains. En outre, une attention particulière doit être portée au sol en tant que support essentiel de la croissance des plantes, et à l'eau en tant qu'élément indispensable à la vie.



PAV Point Nord – Genève (Crédit photo : Vimade)

Arborisation des espaces urbains

À l'échelle de la réalisation, le choix des essences, leur disposition dans l'espace et leur méthode de plantation sont déterminants. Lors de nouvelles plantations, il est primordial de sélectionner une essence adaptée au lieu et aux services écosystémiques attendus. Ainsi, les besoins physiologiques de l'arbre doivent être respectés afin qu'il puisse durablement offrir les effets climatiques escomptés. De plus, il convient de considérer sa contribution à l'aménagement et à la fonctionnalité de l'espace : comment il crée de l'ombre, à quel moment de la journée, et pour quel type d'usage, entre autres aspects. En ce qui concerne la préservation des arbres existants, l'objectif est de maximiser les avantages climatiques qu'ils procurent tout en atténuant les impacts négatifs du projet sur leurs besoins physiologiques. En outre, un agencement inadéquat des arbres peut générer un effet barrière qui maintient la chaleur au sol pendant la nuit.

LEVIERS D'ACTION

- Essences d'arbres ;
- Types de plantation ;
- Préservation des arbres existants

INFLUENCE CLIMATIQUE

- ☀ • Ombrage des surfaces aux alentours (réduction du rayonnement solaire et donc du stockage de la chaleur pendant la journée) ;
- ☀ ☾ • Évapotranspiration (rafraîchissement de la température par les feuilles) ;
- ☀ • Lieux ombragés pour les habitantes et habitants.



Parc Gourgas (Crédit photo : DR)



POINTS À CONSIDÉRER

- L'environnement entourant l'arbre, tel que la façade des bâtiments, le revêtement de sol, etc., a-t-il été conçu pour ne pas intensifier la chaleur autour de l'arbre ?
- Les arbres et leur grandeur prévue sont-ils positionnés de manière à fournir de l'ombre aux moments clés d'ensoleillement de l'espace public ?
- Le volume de terre disponible et sa perméabilité sont-ils adaptés à la grandeur prévue de l'arbre ?
- L'essence des végétaux est-elle appropriée au lieu et aux services écosystémiques (notamment pour la régulation du climat) attendus ?
- L'arborisation favorise-t-elle la biodiversité (choix des espèces, emplacement) ?
- Les espaces végétalisés ont-ils été pensés sous l'angle du triptyque Eau-Sol-Arbre/Végétation ?



POINTS DE VIGILANCE

- **Risque de stress hydrique lié à la transpiration accrue**
Lorsque l'environnement de l'arbre présente des températures de surface élevées, il est essentiel de surveiller attentivement le taux d'évapotranspiration des feuilles, car une augmentation de celui-ci peut accroître le risque de stress hydrique pour l'arbre.
- **Choix de l'essence en fonction de l'environnement**
Le taux d'évapotranspiration varie en fonction de l'essence de l'arbre. Chaque espèce choisira de réduire ses besoins en eau par une croissance plus lente, ou vice versa. Il est essentiel de choisir une essence d'arbre adaptée à l'environnement spécifique (température radiative moyenne, disponibilité en eau, etc.) afin de minimiser les risques associés au stress hydrique.
- **Choix des essences**
Afin de favoriser la biodiversité, les espèces indigènes doivent être privilégiées et les espèces exotiques envahissantes doivent être proscrites (se référer à la liste officielle des espèces invasives de l'OFEV).
- **Importance des saisons**
Les arbres et les sols sont des organismes vivants pour lesquels les saisons sont importantes. La période de manipulation des sols est d'avril à octobre et la période de plantation de novembre à mars. Les plantations devraient être réalisées au minimum 6 à 12 mois après la création des sols afin de laisser à ces derniers le temps de se reposer et « s'installer » ainsi que développer une activité biologique.



Parc des Bastions – Genève (Crédit photo : F. De Limoges)



Cressy – Confignon (Crédit photo : F. De Limoges)

4.2 ADAPTATION PAR LA TRAME BLEUE

L'eau sous toutes ses formes joue un rôle essentiel dans la qualité des projets et dans leur confort urbain, soit seule en tant qu'élément de boisson ou de rafraîchissement pour l'être humain et la faune, soit en lien avec les deux autres éléments du triptyque Eau-Sol-Arbre/Végétation.



Parc la Grange (Crédit photo : F. De Limoges)



Fontaines des Tours de Carouge (Crédit photo : F. De Limoges)

■ Eaux d'agrément : fontaine, jeux d'eau, bassin

À l'échelle de la réalisation, le mobilier urbain et les dispositifs architecturaux jouent un rôle important dans l'aménagement de l'espace public. La présence de l'eau se décline sous diverses formes telles que les jets d'eau, les fontaines, les miroirs d'eau et les petits bassins. Bien que ses effets climatiques soient limités dans l'espace et dans le temps, l'eau joue un rôle majeur dans le confort des citadines et citadins. Ces aménagements ont un impact négligeable sur l'effet d'îlot de chaleur urbain, mais ils exercent une influence significative sur le bien-être des usagères et usagers. En fournissant de l'eau potable pour se désaltérer, en offrant la possibilité d'un contact rafraîchissant, en créant un effet de brumisation qui temporairement abaisse la température de l'air et rafraîchit la peau, et en agissant comme un miroir reflétant les températures du ciel pour procurer un environnement radiatif plus favorable au confort des usagères et usagers, l'eau d'agrément est un élément central pour un aménagement adapté aux fortes chaleurs urbaines.

LEVIERS D'ACTION

- Aménagement de l'espace public.

INFLUENCE CLIMATIQUE

- ☀ ☾ • Effet de brumisation ;
- ☀ ☾ • Possibilité de contact avec l'eau pour les habitantes et habitants ;
- ☀ ☾ • Réflexion des températures fraîches du ciel.

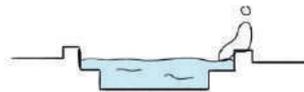
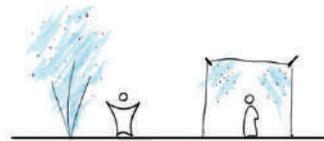


Schéma 8

Les effets climatiques des aménagements liés à l'eau varient en fonction de leur forme, ce qui influence différemment le confort des usagères et usagers. (Source : ADEME, redessiné et modifié par LECEA-HEPIA, 2024)



Quartier de l'Étang – Vernier (Crédit photo : F. de Limoges)



POINTS À CONSIDÉRER

- Est-ce que des fontaines fournissent de l'eau potable ?
- Les fontaines peuvent-elles être équipées de jets d'eau pulvérisateurs pour créer un effet de brumisation ?
- Peut-on envisager l'installation d'un dispositif de miroir d'eau dans les espaces dégagés et peu ombragés ?
- Peut-on envisager l'installation de jeux d'eau pour permettre à la population de se rafraîchir ?
- Est-il possible de concevoir un système de brumisation dans les zones les plus critiques en termes de confort climatique ?
- Est-ce que l'aménagement des plans d'eau offre la possibilité aux habitantes et habitants d'avoir un contact avec l'eau ?
- Est-ce que le projet permet de créer de nouveaux écosystèmes aquatiques, permanents ou temporaires ?
- Le projet est-il pensé en réfléchissant aux chemins de l'eau ?
- Les réflexions sur l'eau intègrent-elles celles sur la végétation et sur le sol (triptyque Eau-Sol-Arbre/Végétation) ?
- Les espaces plantés sont-ils en mesure de résister aux épisodes de sécheresse ?



POINTS DE VIGILANCE

- **Importance des jeux d'eau, fontaines et bassins**
Les fontaines et petits bassins ont un impact climatique limité, mais ils contribuent au bien-être des habitantes et habitants par temps chaud, surtout s'ils offrent la possibilité de se baigner ou si leur eau est potable.
- **Aménagements d'eau de grande ampleur**
Les aménagements d'eau de grande ampleur contribuent à réduire la température moyenne radiative à proximité en raison de la fraîcheur de leur surface.
- **Conditions pour les miroirs d'eau**
Les dispositifs de miroir d'eau ont un effet rafraîchissant efficace uniquement dans un environnement dégagé, avec une grande partie du ciel visible. En l'absence de ces conditions, la surface d'eau peut refléter les façades des bâtiments, ayant des températures de surface bien supérieures à celle du ciel.



Gare de Chêne-Bourg (Crédit photo : S. Fruehauf)



Parc Aux-Folies – Bellevue (Crédit photo : Vimade)

4.3 ADAPTATION PAR LA TRAME GRISE

Bien que la déminéralisation et la désimperméabilisation de l'espace urbain permettent d'améliorer le climat dans les espaces publics, leur réalisation est parfois entravée par des conflits d'usages. D'autres leviers d'action doivent alors être activés. Le choix des matériaux, en fonction de leurs propriétés thermiques, peut améliorer les qualités climatiques du lieu; l'intégration de dispositifs d'ombrage peut également enrichir l'aménagement de l'espace public et le verdissement du bâti (façades/toitures); la prise en compte des sources de chaleur anthropique, et plus particulièrement celles liées aux déplacements motorisés, ont également un impact sur le confort climatique du lieu.



Place du Bachet de Pesay – Lancy (Crédit photo: A Grosclaude)

Matérialité et couleur des revêtements de sol

Le choix des matériaux pour les revêtements de l'espace public est déterminant en termes de confort climatique. La sélection des matériaux doit prendre en compte leur aptitude à emmagasiner de la chaleur et à la transmettre, qui influence l'inertie thermique de l'espace et, par conséquent, la quantité de chaleur accumulée pendant la journée et libérée la nuit. La couleur, notamment la teinte claire ou foncée, joue un rôle déterminant dans l'albédo, affectant ainsi la quantité de rayonnement solaire réfléchi par la surface et la quantité d'énergie absorbée par celle-ci. Ces choix peuvent ainsi contribuer à créer des espaces plus confortables pour les habitantes et habitants avec de meilleures qualités climatiques.

LEVIERS D'ACTION

- Matérialité des éléments construits ;
- Couleur des matériaux : capacité de réflexion du rayonnement solaire (albédo).

INFLUENCE CLIMATIQUE

- ☀️ 🌙 • Réduction de la capacité de stockage de la chaleur en journée ;
- 🌙 • Vitesse de restitution de la chaleur (refroidissement) la nuit ;
- ☀️ 🌙 • Limitation des températures rayonnantes sur les piétonnes et piétons.

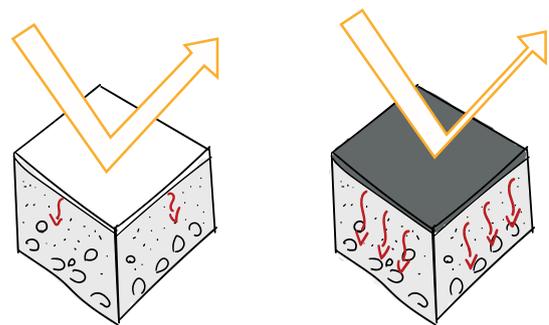


Schéma 9

La répartition de l'énergie solaire dans le sol diffère selon le revêtement. À gauche, le revêtement clair réfléchit une grande partie de l'énergie solaire, limitant ainsi l'accumulation de chaleur en profondeur. À droite, le revêtement foncé absorbe davantage de rayonnement solaire, transférant plus de chaleur en profondeur. (Source : ADEME, redessiné et modifié par LECEA-HEPIA, 2024)



Belle-Terre – Thônex (Crédit photo : M. Gafsou)



POINTS À CONSIDÉRER

- Dans quelle mesure l'inertie thermique des matériaux utilisés dans les aménagements extérieurs a-t-elle été intégrée pour réguler la température ambiante ?
- Quelle matérialité retenir en regard à l'économie des moyens, le réemploi, l'utilisation de matériaux recyclés, l'entretien et l'évitement de réflexions ?
- Est-ce que la couleur des revêtements de sol peut contribuer à un albédo élevé pour réduire l'absorption de chaleur et atténuer les îlots de chaleur urbains ?
- Est-ce que le choix de teinte des surfaces imperméables tient compte de l'inertie thermique des revêtements ?
- Est-ce que les matériaux présentent une inertie thermique adaptée pour des espaces urbains spécifiques, en tenant compte des conditions d'ensoleillement et des usages prévus ?
- Quelles techniques d'aménagement peuvent être adoptées pour tirer parti de l'albédo des surfaces et réduire la réflexion excessive de la lumière solaire ?



POINTS DE VIGILANCE

- **Problématique des revêtements asphaltés et bitumineux noirs**
Les revêtements en asphalte et bitume captent et stockent la chaleur de manière importante en raison de leur couleur sombre et de leur densité souterraine, les rendant particulièrement propices à la rétention thermique.
- **Inertie thermique du granit**
Le granit, avec une forte inertie thermique, convient aux zones à insolation courte, mais peut retenir de la chaleur s'il est exposé toute la journée. Il nécessite de ce fait une utilisation prudente en fonction de la durée d'ensoleillement.
- **Efficacité du stabilisé et du bois**
Le stabilisé, sans stockage thermique, se refroidit rapidement à l'ombre, tout comme le bois, renforçant leur efficacité climatique, mais nécessitent un entretien et une gestion adaptés.
- **Revêtements perméables et besoins en eau**
L'efficacité des revêtements perméables, comme les pavés et le gravier, dépend de leur perméabilité, activée uniquement avec un approvisionnement en eau, nécessitant une gestion hydrique appropriée.
- **Températures élevées des matériaux synthétiques**
Les matériaux synthétiques, tels que le tartan, le caoutchouc et le gazon synthétique, retiennent davantage de chaleur, ce qui doit être pris en compte, surtout dans des zones fortement ensoleillées.
- **Éblouissement en cas de matériaux à albédo très élevé :**
Les matériaux à albédo très élevé peuvent selon leur emplacement avoir un effet d'éblouissement conséquent et potentiellement dangereux.

Dispositifs d'ombrage

L'ombrage est un moyen utilisé en architecture depuis l'antiquité dans le but d'améliorer le confort thermique (vélum dans les arènes par exemple). En cas de fortes chaleurs, l'ombre offre une sensation de bien-être par rapport à l'exposition au soleil et abaisse la température ressentie (PET). L'objectif général consiste à procurer des lieux de repli pour les habitantes et habitants lors des périodes de forte chaleur. Ainsi, les dispositifs d'ombrage en milieu urbain créent des espaces où la température est plus agréable lors des journées chaudes. Cette sensation de soulagement provient de la réduction de l'exposition au rayonnement solaire, ce qui permet à la peau de maintenir une température plus confortable et de favoriser un équilibre thermique. Ces dispositifs d'ombrage peuvent être combinés avec de la végétation pour amplifier leur effet.

LEVIERS D'ACTION

- Aménagement d'espaces publics.

INFLUENCE CLIMATIQUE



- Diminution de la quantité de rayonnement solaire sur un individu ou une surface ;



- Limitation de la quantité de chaleur accumulée par les surfaces la journée.

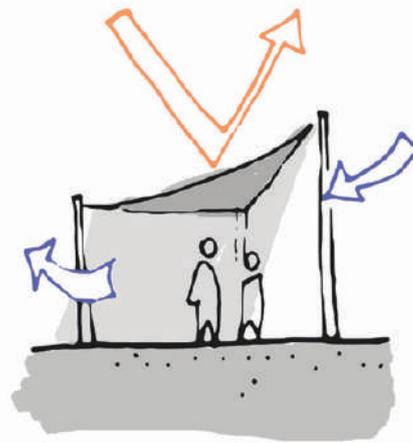


Schéma 10

Le dispositif d'ombrage diminue le rayonnement solaire arrivant sur les usagers et usagers, permettant à la peau de se débarrasser d'une source de chaleur importante, permettant au corps de trouver un équilibre thermique plus confortable. (Source : ADEME)



Jonction – Genève (Crédit photo : L. Fortunati)



POINTS À CONSIDÉRER

- Est-ce que le dispositif d'ombrage filtre suffisamment le rayonnement solaire incident ?
- Est-ce que le dispositif d'ombrage porte atteinte aux courants d'air naturels ou au contraire crée-t-il un effet de cheminée favorisant la ventilation naturelle ?
- Est-ce que des dispositifs d'ombrage sont nécessaires pour garantir suffisamment de zones de répit pour les habitantes et habitants ?
Est-ce que les espaces à l'ombre disposent de mobilier (bancs, tables, ...) permettant aux habitantes et habitants d'en profiter pleinement ?
- La conception du dispositif d'ombrage prend-elle en compte le risque d'augmentation de la température de sa structure, pouvant influencer la température radiative moyenne autour de l'individu ?
- Est-ce que le dispositif d'ombrage est pensé pour limiter l'obstruction du contre-rayonnement terrestre* ?



POINTS DE VIGILANCE

- **Impact thermique du dispositif d'ombrage sur la température radiative**
La conception et les matériaux du dispositif d'ombrage peuvent induire une élévation significative de la température de sa structure, émettant ainsi de la chaleur directement vers la personne. Cela contribue à accroître la température radiative moyenne (MRT*) autour de l'individu. Il est impératif de prendre en compte la température de la face inférieure du dispositif d'ombrage pour éviter cet effet thermique indésirable.
- **Obstruction du ciel visible**
Le dispositif d'ombrage, en obstruant la part de ciel visible peut entraver le contre-rayonnement terrestre. Une solution consiste à assurer un ajournement approprié du dispositif tout en préservant une qualité d'ombrage efficace. L'ajournement du dispositif d'ombrage permet de limiter l'obstruction du contre-rayonnement et favorise également une meilleure circulation de l'air. Cela requiert une conception équilibrée du dispositif, permettant de créer des zones d'ombre au moment opportun pour les habitantes et habitants, tout en assurant un niveau adéquat de ciel visible. Ceci favorise une dissipation plus efficace de la chaleur qui aurait pu être accumulée par les surfaces en dessous du dispositif.

5. Phase de projet : bâtiment, ouvrage d'art

Ce chapitre se concentre sur la phase de projet d'un ouvrage ou d'une rénovation. Cette étape de réalisation détaille le projet construit, les modifications apportées en cas de rénovation, ainsi que les aménagements adjacents. Cette étape se matérialise par la phase où un ouvrage est projeté et réalisé selon les phases SIA, soit de la définition des objectifs (phase 1) jusqu'à l'exécution de l'ouvrage (phase 5). Cette étape du projet prend en compte, par exemple, les concours d'architecture au sens de la SIA 142.

5.1 ADAPTATION PAR LES TRAMES VERTE ET BRUNE

L'analyse des trames verte et brune, lors des différentes étapes de la réalisation d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art, se concentre principalement sur la faisabilité et la pertinence de l'intégration de nouveaux éléments végétaux directement dans les structures construites (façades et toitures végétalisées). Cette approche trouve une pertinence particulière dans les environnements urbains où la disponibilité d'espace pour la végétalisation (comme les arbres et les sols végétalisés) est soumise à une forte concurrence. Les effets climatiques de la végétalisation des structures bâties découlent de la capacité des végétaux à maintenir leur température de surface « fraîche » grâce à l'évapotranspiration, même en étant fortement exposés au soleil. En outre, les structures végétalisées ont le potentiel d'introduire une biodiversité bienvenue dans des environnements fortement bâtis. Elles se matérialisent notamment au travers **des toitures et des façades végétalisées.**

■ Façades végétalisées

La végétalisation des façades peut se décliner sous différentes formes ; pleine terre et jardinières avec plantes grimpantes et murs vivants. Chaque dispositif doit être adapté au contexte spécifique du projet car le type de façade végétalisée mis en place diffère en terme de consommation d'eau, d'entretien, d'apport en termes de biodiversité ainsi que d'effet climatique. Ceux-ci jouent un rôle climatique en ombrageant les façades d'appui, ce qui limite la charge thermique la journée, et en préservant des surfaces fraîches grâce à la consommation de chaleur par évapotranspiration des plantes. Ainsi, garantir les besoins physiologiques des plantes est fondamental pour assurer la durabilité et l'efficacité climatique des façades végétalisées.

LEVIERS D'ACTION

- Protection solaire façade sud ;
- Mur aveugle ;
- Type de végétalisation de façades : pleine terre et jardinière avec plantes grimpantes.

INFLUENCE CLIMATIQUE

- ☀ • Ombrage des façades, diminution de la charge thermique ;
- ☀ ☾ • Surfaces « fraîches » grâce à l'évapotranspiration pour autant que l'apport d'eau soit suffisant.

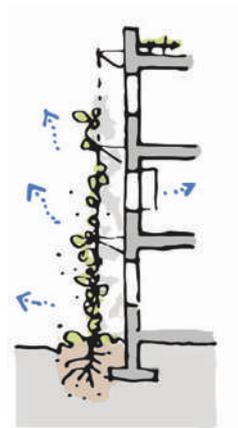


Schéma 11

Effet de la façade végétalisée. La végétalisation permet d'ombrager la façade d'accroche, tandis que l'évapotranspiration de la plante permet de préserver une température de surface fraîche. (Source : ADEME)



Plan-Les-Ouates (Source : CODHA)



POINTS À CONSIDÉRER

- La façade végétalisée peut-elle enrichir les qualités paysagères et la biodiversité dans des environnements fortement minéralisés ?
- Le choix du type de façade végétalisée a-t-il tenu compte de la consommation d'eau et de l'entretien ?
- Les possibilités d'acheminement d'eau pluviale, soit par apport direct, soit par stockage-arrosage, ont-elles été prises en compte dans le choix de la situation et du type de façade végétalisée ?
- La situation de la façade, incluant son orientation et son environnement, est-elle propice à la végétalisation ?
- Les dispositifs architecturaux autres que la végétalisation de la façade sont-ils plus adaptés dans cette situation ? (voir 5.3 « Dispositifs architecturaux »)
- Les conditions d'entretien et les besoins physiologiques des plantes sont-ils assurés même en période de sécheresse ?



POINTS DE VIGILANCE

- **Choix des plantes**
Les espèces indigènes (se référer à la liste officielle des espèces invasives de l'OFEV) doivent être privilégiées afin de favoriser la biodiversité.
- **Besoins des plantes**
Les besoins physiologiques des plantes sont cruciaux dans la conception des façades végétalisées, influençant directement l'entretien et l'approvisionnement en eau. Une attention particulière à ces aspects dès le début du projet assure des conditions optimales pour la croissance et la durabilité des végétaux intégrés.
- **Gestion de l'eau et de l'entretien**
Certains types de façades végétalisées nécessitent beaucoup d'eau et d'entretien. Il est crucial d'intégrer des solutions comme la récolte des eaux pluviales et des systèmes d'irrigation efficaces dès la conception du projet.
- **Pertinence de la végétalisation**
Dans certains contextes, d'autres solutions architecturales peuvent être plus efficaces que la végétalisation pour réduire la charge thermique des surfaces. Une analyse approfondie des besoins physiologiques des plantes et des objectifs de la façade végétalisée (apport de biodiversité par exemple) doit être prise en compte pour choisir la meilleure approche, tenant compte de l'eau, du sol et de l'entretien.

■ Toitures végétalisées ou végétation sur dalle

Les toitures végétalisées et la végétation sur dalle (notamment des parkings souterrains) permettent d'apporter des éléments de végétation dans des lieux densément bâtis. Elles se déclinent en différents types, allant des toitures extensives, caractérisées par une faible épaisseur du substrat et ne nécessitant pas d'irrigation, aux toitures semi-intensives, présentant une épaisseur moyenne et demandant une faible irrigation, jusqu'aux toitures intensives exigeant une irrigation conséquente, avec une végétation variée. Outre la biodiversité et leur aspect esthétique, les toitures végétalisées peuvent offrir des avantages climatiques significatifs. Lorsqu'elles ne sont pas accessibles, leur impact est modéré pour le confort climatique, mais elles contribuent à limiter l'élévation de la température de la surface des toits. Cet effet a des répercussions bénéfiques sur le confort intérieur pendant la saison estivale, soulignant ainsi l'importance de ces solutions dans la conception des projets urbains.

LEVIERS D'ACTION

- Toitures des bâtiments ;
- Dalle des parkings souterrains ;
- Casquette des bâtiments.

INFLUENCE CLIMATIQUE

- ☀ ☾ • Diminution de la température de surface des toitures, limitation de la charge thermique du bâtiment ;
- ☀ • Surfaces « fraîches » pour les habitantes et habitants si la toiture est accessible ;
- ☀ ☾ • Améliore le confort intérieur du bâtiment.

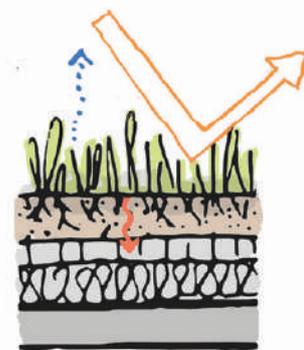


Schéma 12

La végétalisation de la toiture permet de profiter des effets climatiques des sol naturels. Leur efficacité dépend de la disponibilité en eau. (Source : ADEME)



Toits des HUG (Source : HUG)



POINTS À CONSIDÉRER

- Est-ce que le contexte du projet est approprié à la végétalisation des toitures ?
- Est-ce que la végétalisation des toitures est compatible avec les exigences ou souhaits de valorisation de l'énergie solaire du projet (panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques) ?
- Est-ce que la valorisation solaire des toitures (panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques) est compatible avec les souhaits de végétalisation des toitures du projet ?
- Est-ce que la structure et l'épaisseur du substrat sont suffisantes pour jouer le rôle d'éponge pour l'eau de pluie ainsi que pour assurer le développement et la pérennité de la végétation ?
- Est-ce que le type de végétalisation correspond aux objectifs visés par le projet (rétention d'eau, promotion de la biodiversité, régulation climatique, toiture productive/accessible, toiture biosolaire, etc.) ?
- Est-ce que la végétation dispose de suffisamment d'eau en période estivale ?



POINTS DE VIGILANCE

- **Effet climatique localisé**

Les toitures végétalisées ont un impact limité à la hauteur des toits et ont peu d'influence à l'intérieur de la couche urbaine vécue*, sauf dans le cas des dalles des parkings souterrains qui ont un impact direct dans cette couche. Leur contribution majeure réside dans l'amélioration du confort intérieur pour les habitantes et habitants.

- **Choix adaptés à la toiture**

Pour la végétalisation d'une toiture d'un bâtiment existant, il est recommandé d'opter pour une toiture végétale extensive en raison de sa faible charge sur la structure, liée à une faible épaisseur de substrat, tout en ayant conscience que moins l'épaisseur du substrat est importante moins grande est sa capacité à retenir les eaux de pluie. En revanche, pour une toiture accessible, privilégier une végétation avec des milieux secs, des prairies, ou des arbustes, en anticipant les besoins d'entretien et en assurant une gestion adéquate de l'approvisionnement en eau.

5.2 ADAPTATION PAR LA TRAME BLEUE

L'élément central de la trame bleue à traiter durant l'étape de réalisation d'une structure bâtie est la gestion de l'eau pluviale. Le principe général est d'éviter autant que possible l'évacuation de l'eau dans les canalisations et de la valoriser en tant qu'agent climatique, pour en faire profiter le végétal.



Exemple de descente de toiture (Crédit photo : DR)



Rétention Parc William Rappard – Genève (Crédit photo : Vimade)

■ Gestion des eaux pluviales des bâtiments

Les fortes chaleurs sont souvent associées aux périodes de sécheresse lors des étés dans les villes suisses. En été, les précipitations sont généralement courtes et intenses, souvent associées à des épisodes orageux et très inégalement réparties. La gestion des eaux pluviales intégrée aux bâtiments peut jouer un rôle important dans la collecte, la rétention et le stockage sur place de l'eau lors de ces précipitations, pour ensuite la restituer aux espaces extérieurs lors des périodes de fortes chaleurs, lorsque les besoins sont les plus importants. Bien que les effets climatiques soient indirects, la gestion des eaux pluviales contribue à la résilience du lieu face aux sécheresses (et aux épisodes orageux) et permet de limiter le stress hydrique des végétaux lors des vagues de chaleur. Cette approche intégrée constitue donc une mesure stratégique dans l'adaptation des bâtiments et des espaces aux enjeux climatiques des milieux urbains.

LEVIERS D'ACTION

- Toitures et façades des bâtiments ;
- Pieds des bâtiments.

INFLUENCE CLIMATIQUE

- ☀ ☾ • Limitation du risque de stress hydrique des plantes ;
- ☀ ☾ • Participation à la résilience du lieu à la sécheresse.

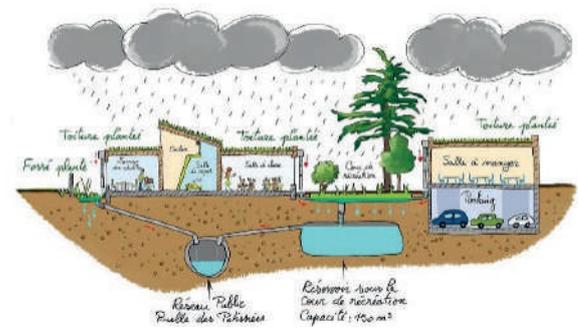


Schéma 13
Intégration de la gestion des eaux pluviales dans le projet architectural. (Source : inconnue)



Nouveaux paysages du quartier des Vergers à Meyrin (Crédit photo : T. Gardiol)



POINTS À CONSIDÉRER

- L'eau de pluie tombant sur le bâtiment est-elle évacuée au niveau du terrain naturel pour suivre son chemin à ciel ouvert plutôt qu'en sous-sol, raccordée à une canalisation ?
 - L'eau de pluie tombant sur le bâtiment ou sur les espaces extérieurs est-elle valorisée pour l'irrigation des espaces plantés, soit directement par ruissellement soit indirectement par stockage/irrigation ?
 - Les épaisseurs de substrats et de sols sur les toitures végétales et sur les espaces sur dalles sont-elles suffisantes pour assurer le rôle d'éponge ?
-



POINTS DE VIGILANCE

- **Stockage**
La mise en place d'espaces de stockage permet, lors des périodes de forte sécheresse et de stress hydrique pour les arbres et la végétation, d'irriguer les sols.
 - **Acheminement**
Favoriser le cheminement des eaux collectées vers les espaces plantés dont les besoins en eau sont les plus importants.
-



Vergers – Meyrin (Crédit photo : F. De Limoges)

5.3 ADAPTATION PAR LA TRAME GRISE

À cette échelle, l'objectif est de diminuer l'impact du bâtiment sur son environnement extérieur, tout en garantissant un espace intérieur confortable durant les périodes de fortes chaleurs. Cela peut être atteint en choisissant des matériaux de façade qui minimisent l'absorption et la réémission de chaleur, en intégrant des dispositifs architecturaux passifs qui diminuent l'apport solaire et facilitent la ventilation naturelle ou en limitant/supprimant les émissions de chaleur en lien avec la climatisation artificielle des bâtiments.

Matérialité des éléments construits

C'est à l'étape de réalisation que le choix de la matérialité des constructions s'impose. La couleur des matériaux de façade impacte directement l'absorption et la réflexion du rayonnement solaire. Les surfaces sombres absorbent davantage de chaleur que les surfaces claires, entraînant une augmentation de l'énergie absorbée par les constructions. De plus, la capacité thermique des matériaux influe sur leur capacité à stocker et à restituer la chaleur. La texture des matériaux a également des implications climatiques en ce qui concerne leur mode de réflexion du rayonnement solaire pouvant favoriser l'effet de « double soleil ».

LEVIERS D'ACTION

- Matérialité des éléments construits (inertie thermique);
 - Couleur des matériaux: capacité de réflexion du rayonnement solaire (albédo).
-

INFLUENCE CLIMATIQUE

- ☾ • Réduction de la capacité de stockage de la chaleur en journée;
 - ☾ • Vitesse de restitution de la chaleur la nuit (refroidissement);
 - ☀ • Réflexion du rayonnement sur les espaces adjacents (effet double-soleil des façades vitrées);
 - ☀ ☾ • Réduction des températures rayonnantes sur les piétonnes et piétons.
-



Rigaud – Genève (Crédit photo : F. De Limoges)



POINTS À CONSIDÉRER

- Est-ce que la couleur et la matérialité de la surface des façades tiennent compte de son exposition au soleil et de leur effet sur l'espace public ?
- Est-ce que la couleur et la matérialité de la surface des façades tiennent compte de son exposition au soleil et de leur effet sur la température dans les logements ?
- Est-ce que l'expression architecturale des façades tient compte de leur exposition au soleil (taille et nombre d'ouvertures en façade, système d'obscurcissement projeté, etc.) ?
- Est-ce qu'une stratégie d'augmentation de l'albédo ou de diminution de l'inertie thermique de la surface peut être envisagée afin de ralentir l'atteinte de la température d'équilibre de la surface ?
- Est-ce que l'effet de double soleil a été pris en compte dans la réflexion du vitrage des façades ?



POINTS DE VIGILANCE

- **Optimisation des surfaces fortement exposées au soleil**
Dans le cas d'une orientation fortement exposée au rayonnement solaire, comme les façades sud, la probabilité d'atteindre la température d'équilibre de la surface est élevée, indépendamment de sa matérialité. Il est donc crucial de privilégier des surfaces à faible inertie et à albédo élevé pour optimiser la gestion thermique et minimiser l'accumulation de chaleur.
- **Inertie des matériaux pour les orientations moins ensoleillées**
Pour les orientations moins exposées au soleil, par exemple les façades nord, la probabilité qu'un matériau à forte inertie atteigne sa température d'équilibre diminue, tandis qu'elle reste élevée pour un matériau à faible inertie. Sélectionner des matériaux adaptés en fonction de l'inertie devient essentiel pour maintenir des conditions thermiques optimales la journée.
- **Albédo et gestion de l'éblouissement**
L'albédo, soit la capacité d'une surface à réfléchir la lumière, est à considérer : un albédo élevé, soit une réflexion élevée, peut contribuer à augmenter l'éblouissement, surtout dans des zones fortement ensoleillées. Ainsi, la gestion de l'albédo devient un point de vigilance important pour assurer le confort visuel et thermique.

Dispositifs architecturaux

L'objectif est d'évaluer la conception constructive de la façade, en examinant si elle intègre des dispositifs architecturaux qui favorisent l'ombrage, tels que les brise-soleil, ou si elle met en œuvre des éléments constructifs qui créent une texture propice au micro-ombrage. Cette approche vise à anticiper l'élévation de la température en surface de la façade, contribuant ainsi à atténuer la charge thermique globale de la structure. Cette approche peut se combiner avec les réflexions sur la matérialité des façades.

LEVIERS D'ACTION

- Façades des bâtiments très exposées aux rayonnements solaires ;
- Détails constructifs des façades ;
- Typologie des logements ;
- Protection solaire.

INFLUENCE CLIMATIQUE

- ☀️ 🌙 • Réflexion du rayonnement solaire ;
- ☀️ 🌙 • Atténuation de la température et de la charge thermique de la façade ;
- ☀️ 🌙 • Atténuation de la surchauffe intérieure.



Schéma 14

Amélioration du confort intérieur. La protection solaire permet de limiter l'apport de chaleur, le ventilateur permet de mettre en mouvement l'air favorisant la dissipation de la chaleur par convection. (Source : ADEME)



Beaux-Champs – Veyrier (Crédit photo : C. Silva)



POINTS À CONSIDÉRER

- Est-ce que des éléments tels que des brise-soleil (casquettes, lames, marquises, etc.) peuvent être incorporés dans la conception de la façade ?
 - Est-il possible d'optimiser l'agencement des éléments constructifs de la façade pour créer des micro-ombrages visant à réduire un excès d'apport solaire ?
 - Lors de la planification de la façade, a-t-il été envisagé des stratégies pour atténuer l'apport de chaleur et faciliter sa dissipation, par exemple, par l'utilisation de volets extérieurs, de toiles extérieures, etc. ?
 - Est-ce que la conception architecturale favorise passivement la ventilation naturelle du bâtiment ?
-



POINTS DE VIGILANCE

- **Matérialité des brise-soleil**
Une attention particulière doit être portée à la matérialité des brise-soleil pour éviter l'accumulation excessive de chaleur. Il est recommandé de privilégier des matériaux à faible inertie thermique. Bien que ces matériaux puissent atteindre des températures élevées pendant la journée, ils émettent peu de chaleur pendant la nuit atténuant l'effet d'îlot de chaleur urbain.
-

6. Annexes

Bibliographie

Allard, Francis, et Cristian Ghiaus. 2012. *Natural Ventilation in the Urban Environment : Assessment and Design*. Routledge.

ADEME. 2021. *Rafraîchir les villes : des solutions variées*, ADEME Editions, mai 2021

Apur. 2017. *Les îlots de chaleur urbains à Paris, Cahier#4 : influence climatique des revêtements de sol à Paris*. Paris, juillet 2017

Apur. 2017. *Les îlots de chaleur urbains du cœur de l'agglomération parisienne, Cahier#3 : brises thermiques*. Paris, février 2017.

Emmanuel, Rohinton. *An Urban Approach To Climate Sensitive Design*. 1st Edition. Taylor & Francis, 2012.

Hervé Cochard, Marc Goxlan. *Réchauffement. Les arbres en première ligne*. Science, American Association for the Advancement of Science, 2013, pp.48-51.

Gerald Mills. *Luke Howard and The Climate of London*. Article in *Weather*, June 2008.

Musy, Marjorie. *L'étude des microclimats urbains : champ de recherche à l'interface entre climatologie, urbanisme et génie-civil*. *VertigO — la revue électronique en sciences de l'environnement*, n° Hors-série 12, mai 2012.

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates* (1^{re} éd.). Cambridge, Royaume-Uni : Cambridge University Press.

OFEV (éd.) 2018 : *Quand la ville surchauffe. Bases pour un développement urbain adapté aux changements climatiques*. Office fédéral de l'environnement, Berne.

Stewart, I., Oke, T. (2012). *Local Climate Zones for Urban Temperature Studies*. *Bull Am Meteorol Soc*.

Taha, H. (1997). *Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat*. *Energy and buildings*, 25(2), 99-103.

Terrin, Jean-Jacques, éd. 2015. *Villes et changement climatique : îlots de chaleur urbains = Cities and climate change : urban heat islands*. Collection *La ville en train de se faire*. Marseille : Parenthèses.

Plan climat cantonal 2030 – 2^e génération (2021) : <https://www.ge.ch/document/24973/telecharger>

Fiche 4.5 du plan climat 2030 – Prévenir et lutter contre les îlots de chaleur en milieu urbain (2021)

Analyse climatique du canton de Genève (2021) : <https://www.ge.ch/document/23298/annexe/0>

Guide utilisateur – Analyses climatiques du canton de Genève (2021) : <https://www.ge.ch/document/23298/telecharger>

Quand la ville surchauffe, Bases pour un développement urbain adapté aux changements climatiques – Office fédéral de l'environnement (2018) : <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/klima/uw-umwelt-wissen/hitze-in-staedten.pdf.download.pdf/uw-1812-f.pdf>

Gobatti, L. ; Bach, P. M. ; Scheidegger, A. ; Leitão, J. P. (2023) *Using satellite imagery to investigate Blue-Green Infrastructure establishment time for urban cooling*, *Sustainable Cities and Society*, 97

Lien avec la théorie

CHAPITRE 3 : PHASE PLANIFICATION : IMAGE DIRECTRICE / PDQ / PLQ

TRAME VERTE ET BRUNE

INTÉGRATION PAR L'ARBORISATION

Physiologie de l'arbre : La plantation d'un arbre nécessite une attention particulière à ses besoins physiologiques, sans quoi il perdrait ses avantages pour le climat urbain. Un sol déficient entrave la croissance des racines, compromettant le développement de la canopée. L'arbre dépend de deux processus cruciaux, la photosynthèse et l'évapotranspiration, orchestrés par les stomates dans les feuilles, qui régulent les échanges gazeux. Les racines absorbent l'eau du sol pour alimenter le xylème (tissu des plantes permettant la circulation de la sève), où l'évapotranspiration crée une aspiration. Les stomates ajustent leur ouverture pour moduler la transpiration et maintenir une température stable. En période de sécheresse, les stomates se ferment pour économiser l'eau, entraînant un stress hydrique et compromettant la photosynthèse et le bon développement de l'arbre. Selon l'essence, les arbres choisissent une stratégie de tolérance ou d'évitement au stress hydrique. C'est-à-dire que certains arbres préféreront photosynthétiser en laissant leurs stomates ouverts et donc consommer plus d'eau (tolérance), tandis que d'autres préféreront économiser l'eau en fermant leurs stomates et donc moins photosynthétiser (évitement). L'essence doit donc être prise en compte dans le choix des projets selon à quelles conditions l'arbre sera exposé.

Le stress hydrique de l'arbre : Lors des vagues de chaleur, les réponses physiologiques des arbres s'ajustent à l'augmentation de la température ambiante, mais des températures excessives peuvent entraîner des conséquences néfastes. Un stress hydrique survient lorsque les besoins en eau de l'arbre dépassent l'approvisionnement du sol, lié à des facteurs tels que la sécheresse, la qualité du sol et les températures élevées. Les arbres adoptent une stratégie d'évitement ou de tolérance, influençant la photosynthèse et la croissance. Les stratégies dépendent de l'essence de l'arbre et peuvent résister à un certain niveau de stress, mais une tension excessive peut provoquer une embo-

lie gazeuse, perturbant la circulation de la sève et entraînant le dessèchement des tissus, mettant en péril la survie de l'arbre.

Qualité climatique de l'arbre : L'arbre offre un confort climatique optimal aux habitantes et habitants grâce à la qualité de son ombrage. Son feuillage dense agit comme un bouclier, réfléchissant le rayonnement solaire et prévenant ainsi une élévation excessive de la température des surfaces qu'il couvre. La capacité de l'arbre à réguler la température de ses feuilles par l'évapotranspiration assure une fraîcheur constante à son feuillage, contribuant ainsi à atténuer la surchauffe urbaine et offrant des surfaces agréablement fraîches pour le bien-être des individus.

RÉGÉNÉRATION ET VÉGÉTALISATION DES SOLS URBAINS

Fraîcheur du végétal : Pendant la journée, les relevés sur le terrain indiquent une disparité de température de surface allant de 10°C à 20°C entre les sols naturels tels que le gazon et la prairie, et d'autres revêtements. Cette variation s'explique par la réaction du végétal à l'exposition au soleil. Lorsque les sols naturels sont chauffés par le soleil, une partie de l'eau présente dans le sol s'évapore directement, tandis qu'une autre partie est libérée par le végétal par le processus d'évapotranspiration. Ces deux mécanismes absorbent de la chaleur, ce qui permet à la végétation de maintenir une température modérée et d'éviter la surchauffe.

Qualité des sols végétalisés

La qualité des sols représente l'aptitude d'un sol à assurer ses fonctions au sein de son écosystème, c'est-à-dire à soutenir la production de biomasse et la diversité biologique, ainsi que préserver la santé des plantes et des animaux. La qualité d'un sol est basée sur ses fonctions écologiques et inclut la notion de services écosystémiques. A cet égard, maintenir une continuité entre les sols naturels

demeure crucial pour faciliter les échanges entre les différentes formes de vie du sol, contribuant ainsi à la régénération des sols.

Effet climatique d'un sol végétalisé

L'effet climatique des sols naturels et pseudo naturels repose sur leur teneur en eau, étroitement liée aux caractéristiques intrinsèques du sol. Un sol sec perd ses propriétés climatiques, se comportant alors comme un sol scellé. La préservation de la qualité des sols nécessite le maintien de leur capacité d'in-

filtration et de stockage d'eau, avec une préférence pour des surfaces poreuses et une réduction de la compaction résultant des activités humaines. Opter pour des surfaces en pleine terre assure une épaisseur suffisante, propice au stockage d'eau et à la vitalité des micro-organismes.

Documents de référence

- « Plus de vert et de bleu pour des villes où il fait bon vivre » (eawag, 2023). [Lien vers l'article.](#)

TRAME BLEUE

LES ÉTENDUES D'EAU

Comportement thermique des eaux de surfaces :

Pendant la journée, le soleil chauffe à la fois les surfaces terrestres et les surfaces d'eau. Ces deux surfaces réagissent thermiquement différemment. Les surfaces d'eau se réchauffent moins vite que les surfaces terrestres, en raison de la grande quantité d'évaporation. En conséquence, la température de l'air au-dessus des plans des surfaces d'eau s'élève moins rapidement que celle au-dessus de la terre. La nuit, généralement le processus s'inverse : les surfaces terrestres se refroidissent plus rapidement que l'eau, en raison de son inertie thermique. En conséquence, l'air au-dessus des surfaces terrestres descend plus rapidement en température que l'air au-dessus de surfaces d'eau.

Brises thermiques en lien avec les eaux de surface :

La différence thermique entre les surfaces terrestres et les surfaces d'eau peut créer des brises thermiques, si la différence de température de l'air entre les deux milieux est importante. La journée, l'air chaud au-dessus des surfaces terrestres s'élève, aspirant l'air plus frais des surfaces d'eau, ce qui génère une brise. La nuit le processus est inversé. Ces brises permettent de faire venir de l'air frais à l'intérieur des villes la journée et permettent une meilleure circulation de l'air la nuit.

Qualités climatiques des étendues d'eau : Les eaux de surfaces ont plusieurs effets climatiques intéressants dans l'adaptation des villes aux fortes chaleurs. La journée, elles permettent de diminuer la charge thermique d'un quartier en limitant par évaporation la chaleur accumulée. Elles fournissent

également des surfaces fraîches pour les habitantes et habitants, contribuant ainsi à leur confort climatique. La nuit, ces étendues d'eau peuvent être source de brises thermiques favorables au brassage de l'air et à l'atténuation de l'effet d'îlot de chaleur urbain.

Documents de référence

- Démarche « Eau en ville »

GESTION DES EAUX PLUVIALES

Co-bénéfice eau/végétal : L'association synergique entre l'eau et le végétal dans l'environnement urbain engendre des co-bénéfices. Le végétal permet une meilleure infiltration en améliorant la qualité du sol, permettant une absorption efficace des eaux pluviales par le sol. Cette infiltration réduit le ruissellement, prévenant ainsi les inondations et favorisant la recharge des nappes phréatiques. L'eau est un besoin physiologique important pour la bonne croissance du végétal. Simultanément, la végétation contribue à l'évapotranspiration : les plantes libèrent l'eau absorbée du sol dans l'atmosphère par leurs feuilles. Ce processus joue un rôle essentiel dans l'atténuation de la surchauffe urbaine, limitant l'effet d'îlot de chaleur urbain. En plus de ces avantages, la présence de végétation enrichit la biodiversité urbaine en offrant des habitats favorables à différentes espèces.

Documents de référence

- Démarche « Eau en ville »

TRAME GRISE

ADAPTATION DE LA MORPHOLOGIE URBAINE

La course solaire fait référence à la trajectoire apparente que le soleil suit dans le ciel tout au long de la journée. Cette trajectoire varie en fonction de la latitude géographique et de la saison. L'analyse de la forme urbaine et de la course solaire pour une journée estivale type permet de révéler l'accumulation d'ensoleillement sur les espaces ouverts, identifiant ainsi les surfaces qui sont particulièrement enclines à absorber une grande quantité de rayonnement solaire pendant la journée, mais également les surfaces les plus ombragées. Cette analyse est essentielle dans la conception des espaces extérieurs en milieu urbain pour atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU) et minimiser l'inconfort climatique. L'ombrage créé par les bâtiments permet de limiter la charge thermique des quartiers en diminuant la quantité de rayonnement solaire absorbée et donne des lieux de repli pour les habitantes et les habitants lors de fortes chaleurs.

La part de ciel visible ou Sky View Factor (SVF) mesure la proportion de ciel visible depuis un point au sol. Il indique la partie non obstruée par les bâtiments, les arbres ou autres éléments verticaux. Dans la conception des espaces extérieurs urbains, la part de ciel visible est essentielle pour dissiper la chaleur excédentaire la nuit et maintenir le confort climatique en journée. Le ciel est considéré comme une surface ayant une température propre en microclimatologie, relativement faible (proche de 0°C), influençant les échanges radiatifs avec son environnement. Cette dynamique contribue au refroidissement des surfaces, réduisant ainsi l'effet d'îlot de chaleur urbain et améliorant le bien-être des habitantes et habitants. Pour ce faire, il est nécessaire d'optimiser la morphologie du bâti (gabarit, hauteur, largeur de la rue) afin de favoriser une grande part de ciel visible et ainsi la dissipation de la chaleur accumulée durant la journée.

Les brises thermiques sont des vents qui se forment en raison des variations de température entre deux zones voisines, comme une côte et un lac ou une zone très urbanisée et un espace vert. Elles se manifestent principalement lorsque les conditions météorologiques sont caractérisées par l'absence de vent et un ciel clair. En été, les brises sont généralement peu présentes la journée en raison de l'ensoleillement intense, réduisant les écarts thermiques entre les espaces. Cependant, la nuit, les

écarts de température augmentent considérablement, créant ainsi un contexte favorable à l'apparition des brises thermiques.

Documents de référence

- Local Climate Zones for urban temperature studies © D. Stewart and T.R. Oke
- Rose des vents, Genève © MétéoSuisse
- Cadastre solaire Genève © SITG

DIMINUTION DES SURFACES MINÉRALES ET IMPERMÉABLES

Les surfaces minérales et imperméables ne peuvent pas profiter de l'évaporation de l'eau présente dans le sol pour dissiper la chaleur. Le rayonnement solaire absorbé par ces surfaces est soit stocké dans la matière (inertie thermique) soit convertie en chaleur sensible, contribuant ainsi à l'échauffement de l'air ambiant. Ces surfaces présentent également une forte inertie thermique, ce qui signifie qu'elles emmagasinent une grande quantité de chaleur pendant la journée et la libèrent plus lentement que les surfaces à faible inertie. En conséquence, elles maintiennent des températures élevées pendant la nuit, contribuant ainsi à l'effet d'îlot de chaleur urbain.

L'inertie thermique est un concept lié à la capacité d'un matériau à stocker et à restituer de la chaleur. Les matériaux avec une forte inertie thermique peuvent stocker une grande quantité de chaleur. Cela signifie qu'ils absorbent la chaleur lentement lorsque la température augmente et la libèrent progressivement lorsque la température diminue. En revanche, les matériaux à faible inertie thermique chauffent et refroidissent rapidement, car ils stockent moins de chaleur.

L'évaporation est un mécanisme naturel de rafraîchissement. Lorsque l'eau dans le sol s'évapore, elle absorbe la chaleur de l'environnement, ce qui a un effet de refroidissement. Cela contribue à abaisser la température de la surface, réduisant ainsi le risque de surchauffe. Cela explique pourquoi les surfaces perméables et bien irriguées tendent à avoir des températures plus modérées. L'impact de l'évaporation sur la température du sol est particulièrement important dans la gestion des microclimats urbains et dans la lutte contre la surchauffe en milieu urbain.

CHAPITRE 4: PHASE RÉALISATION : ESPACE PUBLIC (PLACE, PARC, RUE, ROUTE, ...)

TRAME VERTE

ARBORISATION DES ESPACES URBAINES

Température des feuilles : La température des feuilles est influencée par l'énergie reçue du rayonnement solaire et de celle émise par les objets environnants. La transpiration, processus crucial pour les plantes, joue un rôle significatif dans l'élimination de l'énergie absorbée. Chez les plantes à transpiration abondante, la température des feuilles peut être inférieure à celle de l'air. En revanche, lorsqu'une contrainte hydrique ferme les stomates, la température des feuilles peut dépasser celle de l'air.

Taux d'évaporation : Le taux d'évaporation des plantes, mesurant la quantité d'eau perdue par unité de temps, dépend de quatre facteurs environnementaux essentiels: la lumière, la température, l'humidité et le vent. La lumière solaire stimule l'ouverture des stomates, la chaleur accroît l'évaporation, une faible humidité facilite l'évaporation, et le vent augmente le mouvement de l'air, renforçant ainsi le processus de transpiration. Lorsque l'évapotranspiration des plantes est trop excessive, elle peut dépasser la quantité d'eau disponible: l'arbre est en stress hydrique. L'environnement entourant l'arbre a donc un fort impact sur le bon développement de l'arbre.

TRAME BLEUE

EAUX D'AGRÉMENT : FONTAINE, JEUX D'EAU, BASSIN

Effet de la brumisation : Les jets d'eau et les brumisateurs pulvérisent l'eau en fines gouttelettes, qui s'évaporent plus facilement dans l'air, engendrant une légère baisse de la température de l'air. Cet effet de brumisation est très limité dans l'espace (1 à 2 fois le diamètre du dispositif) et dans le temps (disparaît une fois le dispositif éteint).

Effet de réflexion du ciel : Un plan d'eau peut créer un environnement radiatif favorable en réfléchissant le ciel, qui est plus frais (environ 0°C par temps dégagé). Pour que cet effet soit notable, l'individu doit être au centre d'un plan d'eau assez vaste, presque capable de « marcher » sur l'eau pour une réflexion maximale du ciel. En se rapprochant des rives, la surface de l'eau peut refléter des

« surfaces chaudes » comme les façades des bâtiments. Cependant, si l'environnement urbain est trop proche ou élevé, la surface de l'eau peut refléter les températures chaudes de cet environnement plutôt que le ciel.

Importance du contact avec l'eau : L'eau, en tant que conducteur thermique plus efficace que l'air, offre un mécanisme de rafraîchissement essentiel. Lorsqu'il y a contact entre la peau et de l'eau plus froide, cela induit un refroidissement par conduction de la partie du corps en contact avec l'eau. Les gouttes d'eau présentes sur la peau (après brumisation par exemple) absorbent la chaleur de la peau pour s'évaporer, créant également un effet rafraîchissant par évaporation. Ainsi, la possibilité d'un contact avec l'eau est cruciale pour offrir un effet significatif au confort des individus.

TRAME GRISE

MATÉRIALITÉ ET COULEUR DES REVÊTEMENTS DE SOL

L'**albédo** d'une surface représente sa capacité à réfléchir le rayonnement solaire incident. Il s'exprime par le rapport entre le rayonnement solaire reçu et réfléchi. Sa valeur varie entre 0 et 1. Un albédo de 0 signifie qu'aucun rayonnement n'est réfléchi, alors qu'un albédo de 1 signifie que l'entier du rayonnement est réfléchi.

L'**inertie thermique** est la capacité d'un matériau à stocker de la chaleur. On parle d'inertie faible lorsque le matériau stocke peu de chaleur et d'inertie forte lorsqu'il en stocke beaucoup. Un matériau à faible inertie chauffe très rapidement, mais dissipe plus facilement la chaleur, tandis qu'un matériau à forte inertie chauffe plus lentement, mais dissipe plus difficilement la chaleur.

La **température d'équilibre** au rayonnement solaire est la température maximale qu'une surface peut atteindre lorsqu'elle est exposée au soleil sur une période prolongée. Ce point est atteint lorsque la surface absorbe et émet autant de chaleur. La vitesse à laquelle cela se produit dépend de l'inertie thermique et de la couleur du matériau. Les matériaux avec une grande inertie thermique, comme la pierre, se réchauffent lentement, nécessitant plus d'énergie pour augmenter leur température. En revanche, les matériaux à faible inertie thermique, comme le bois, se réchauffent rapidement. De plus, la couleur joue un rôle : les surfaces sombres absorbent plus de chaleur que les surfaces claires en raison de leur faible albédo, tandis que les surfaces claires reflètent davantage de chaleur, maintenant des températures plus fraîches.

DISPOSITIFS D'OMBRAGE ARCHITECTURAUX

La **température du ciel** : En microclimatologie, le ciel est considéré comme une surface ayant une température propre pour quantifier les échanges radiatifs entre un sujet et son environnement, y compris la part visible du ciel. Cette température est généralement basse dans des conditions dégagées (de l'ordre de quelques degrés Celsius voir négative, même en plein été). Sous un dispositif d'ombrage, la température du ciel est « remplacée » par la température de la sous-face du dispositif.

Le **contre-rayonnement terrestre** désigne le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre vers l'atmosphère en réponse au rayonnement solaire absorbé par la Terre. Lorsque le soleil réchauffe la surface terrestre, celle-ci émet une partie de cette chaleur sous forme de rayonnement infrarouge vers le ciel. Il s'agit du principal phénomène qui permet aux surfaces de dissiper leur chaleur. Si la vision du ciel est entravée par un dispositif d'ombrage, les surfaces ne peuvent plus contre-rayonner et donc dissipent moins leur chaleur.

FAÇADES VÉGÉTALISÉES

Fraîcheur du végétal et effets des façades végétalisées sur la MRT (température moyenne radiante) : Les façades végétalisées offrent un avantage notable en raison de leur placement direct dans l'environnement immédiat des piétonnes et piétons. La capacité des plantes à maintenir leur température fraîche par évapotranspiration, même en cas d'exposition intense au soleil, assure la présence de surfaces fraîches à proximité d'un individu. Cette propriété contribue à réduire la température moyenne radiative (MRT) autour de la personne. Les façades végétalisées fournissent ainsi des surfaces fraîches qui facilitent le rayonnement corporel, favorisant la dissipation de la chaleur et permettant à l'individu de maintenir plus aisément un équilibre thermique favorable.

CHAPITRE 5: PHASE DE PROJET : BÂTIMENT, OUVRAGE D'ART

TRAME VERTE

TOITURES VÉGÉTALISÉES OU VÉGÉTATION SUR DALLE

La couche urbaine vécue : La couche urbaine vécue est une zone de l'atmosphère située en milieu urbain entre la surface du sol et le haut des toitures des bâtiments. Cette couche est particulièrement impactée par les conditions microclimatiques urbaines.

Effet climatique des toitures végétalisées : La qualité climatique des toitures végétalisées dépend du type de toiture installée, ainsi que du niveau d'entretien demandé. Les toitures végétalisées extensives ne nécessitent pas d'entretien ni d'arrosage, mais ont un impact climatique moindre en raison du type de plantation. Les toitures végétalisées intensives ou la végétation sur dalle peuvent reproduire les effets climatiques des sols naturels (voir 2.2.2). Cependant, l'absence de pleine terre nécessite bien plus d'entretien et un arrosage plus fréquent, ce qui peut être difficile à garantir, notamment en période de sécheresse, pour préserver ces bénéfices climatiques.

TRAME GRISE

MATÉRIALITÉ DES ÉLÉMENTS CONSTRUITS

L'albédo, l'inertie thermique et la température d'équilibre : voir le descriptif page 71.

L'effet « double soleil » est un phénomène causé par les propriétés physiques du verre qui affectent la façon dont il réfléchit, transmet et absorbe le rayonnement solaire. Le verre réfléchit fortement la lumière solaire, ce qui empêche la façade de se réchauffer, mais en contrepartie, cela crée un effet de « double soleil » avec une réflexion géométrique et unidirectionnelle. Cet effet peut augmenter la température des surfaces environnantes et influencer le confort des piétonnes et piétons en milieu urbain.

Glossaire

Ce glossaire contient les termes utilisés tout au long du document ainsi que ceux abordés lors des deux journées de formation du 12 et 19 juin 2023. Il ne se veut pas exhaustif. Les termes sont à retrouver dans le guide par la mention d'un astérisque « * ».

Albédo

L'albédo d'une surface représente sa capacité à réfléchir ou à ne pas absorber le rayonnement solaire incident pendant la journée. Il s'exprime par le rapport entre le rayonnement solaire incident et celui réfléchi. Sa valeur varie entre 0 et 1. Un albédo de 0 signifie qu'aucun rayonnement n'est réfléchi (et donc tout est absorbé), alors qu'un albédo de 1 signifie que l'entier du rayonnement est réfléchi.

Arbres de 1^{re}, 2^e ou 3^e grandeur

Il s'agit d'essence de 1^{re} grandeur quand la hauteur d'un arbre adulte est supérieure à 20 m, de 2^e grandeur quand la hauteur d'un arbre adulte est comprise entre 15 et 20 m et de 3^e grandeur quand la hauteur d'un arbre adulte est comprise entre 10 et 15 m.

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). Phénomène qui se développe particulièrement lors de journées stables avec beaucoup de soleil. Les brises thermiques ne doivent pas être confondues avec les vents dominants d'une région, qui sont causés par des influences climatiques et géographiques à plus grande échelle.

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.

Charge thermique

La charge thermique représente la quantité de chaleur emmagasinée par une surface, un bâtiment, un quartier ou l'intégralité de la ville. La journée, le rayonnement solaire « charge » thermiquement les matériaux. La charge thermique représente l'intégralité de cette énergie. Une entité (surface, quartier ...) qui accumule une grande charge thermique durant la journée, est susceptible de participer davantage à l'effet d'îlot de chaleur urbain en relâchant cette chaleur la nuit.

Conduction

La conduction (thermique) est un mode de transfert de chaleur à travers un matériau ou entre des objets en contact direct.

Confort climatique

En intérieur, le confort thermique se concentre principalement sur la température de l'air ambiant, car les surfaces intérieures (murs, plafonds, etc.) sont généralement proches de la température de l'air. En revanche, en extérieur, plusieurs facteurs sont pris en compte, tels que le rayonnement solaire, le rayonnement thermique des surfaces, l'humidité de l'air et la vitesse du vent. On parle alors de confort climatique. Un confort climatique optimal se caractérise par des conditions climatiques permettant à une personne de maintenir son équilibre thermique avec un minimum d'effort.

Convection

La convection est un mode de transfert de chaleur qui se produit lorsqu'un fluide chaud (air, eau) se déplace et fait circuler la chaleur avec lui.

Contre-rayonnement terrestre

Le contre-rayonnement terrestre désigne le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre vers l'atmosphère en réponse au rayonnement solaire absorbé par la Terre. Lorsque le soleil réchauffe la surface terrestre, celle-ci émet une partie de cette chaleur sous forme de rayonnement infrarouge vers le ciel. Ce phénomène est à l'origine de l'effet de serre et a permis le développement de la vie sur Terre telle que nous la connaissons actuellement.

Couche limite atmosphérique

La couche limite atmosphérique est une zone relativement mince de l'atmosphère terrestre qui est directement en contact avec la surface de la Terre. Elle s'étend depuis la surface jusqu'à une altitude variable, généralement entre quelques centaines de mètres à quelques kilomètres, en fonction des conditions météorologiques et des caractéristiques du terrain. Il s'agit de la couche de l'atmosphère impactée par la surface de la Terre.

Couche limite urbaine

La couche limite urbaine fait référence à la zone de l'atmosphère située près de la surface terrestre, directement influencée par les caractéristiques urbaines telles que les bâtiments, les rues et les infrastructures. Elle présente des différences significatives par rapport à la couche limite atmosphérique non urbaine en termes de turbulences, de circulation de l'air, de température, d'humidité et de pollution.

Couche urbaine vécue

La couche urbaine vécue est une zone de l'atmosphère située en milieu urbain entre la surface du sol et le haut des toitures des bâtiments. Cette couche est particulièrement impactée par les conditions microclimatiques urbaines.

Course solaire

Le graphe de la course du soleil représente la position du soleil dans le ciel à toute heure de la journée et de janvier à décembre. Il permet de définir la hauteur (angle d'incidence) et la direction du soleil pour chaque heure de l'année.

Débit d'air froid

Le débit d'air froid décrit la quantité d'air froid qui circule chaque seconde dans la section d'une pente ou d'un couloir d'air froid. En termes simplifiés, il s'agit du 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 à travers laquelle il s'écoule (largeur d'écoulement; unité $m^3/(s*m)$). Par exemple, contrairement au champ d'écoulement, le débit d'air froid tient également compte des mouvements d'écoulement au-dessus de la couche proche du sol.

Double soleil

L'effet de double soleil désigne un phénomène où les rayons du soleil se reflètent sur une surface lisse comme du verre ou du métal, créant ainsi une source additionnelle de chaleur. Cette réflexion peut intensifier la chaleur ressentie localement, simulant l'effet de deux sources de chaleur solaire.

Environnement radiatif

Toute matière émet un rayonnement infrarouge qui est proportionnel à sa température et ses propriétés de surface. L'environnement radiatif considère l'ensemble des rayonnements infrarouges émis par les matériaux qui le composent.

Espace public

Selon la stratégie cantonale des espaces publics, l'espace public présente de multiples facettes :

- Un lieu ouvert, accessible à toutes et tous et gratuit, en milieu urbain ou villageois.
- Une mixité d'usages et de fonctions, variables dans l'espace et/ou dans le temps.
- Les surfaces soumises à autorité publique : le domaine public cantonal et communal.
- Les espaces privés à vocation publique et/ou accessibles au public, ouverts ou bâtis (p. ex. Gares).
- Les rives urbaines du lac et des cours d'eau.
- Les parcs, espaces verts, forêts urbaines, les chemins de randonnées pédestres.
- Un espace qui s'insère dans un tissu urbain et qui est connecté à un réseau constitué d'autres espaces en relation avec le bâti et le paysage.

Évapotranspiration

L'évapotranspiration joue un rôle fondamental dans la physiologie des plantes. Ce processus combiné d'évaporation de l'eau à partir des surfaces végétales et de la transpiration des feuilles par les stomates permet aux plantes de réguler leur température interne, de transporter les nutriments du sol vers les parties aériennes avec le soutien de la capillarité et de l'osmose, d'assurer la circulation de l'eau dans les tissus et de maintenir l'équilibre hydrique du végétal.

Évaporation

L'évaporation est le processus par lequel un liquide se transforme en gaz. Pendant ce changement d'état, le liquide absorbe de la chaleur à son environnement immédiat.

Homéotherme

Il s'agit d'une caractéristique des espèces animales (oiseaux, mammifères) qui ont la capacité à maintenir une température corporelle constante, malgré les variations de température externe. L'être humain est homéotherme, sa température corporelle doit être maintenue à une température proche de 37 °C.

Îlot de chaleur urbain (Urban Heat Island)

L'îlot de chaleur urbain correspond à une élévation de la température de l'air au-dessus de la ville, comparée à la température des environs ruraux et forestiers. Cette différence de température «ville-campagne» est plus importante la nuit, ce qui témoigne de la difficulté de la ville à dissiper la chaleur accumulée durant la journée. La différence peut aller jusqu'à 10° dans les grandes villes. La température de l'air dans les villes dépend fortement de la géométrie des bâtiments, des propriétés thermiques des matériaux de construction, des propriétés de rayonnement des surfaces et des émissions d'origine humaine, du trafic et de l'industrie.

Îlot de chaleur de la couche limite urbaine

L'îlot de chaleur de la couche limite urbaine est une différence entre la température de l'air mesurée au-dessus de la ville et la température de l'air à hauteur équivalente au-dessus de la région rurale environnante.

Îlot de chaleur de la couche urbaine vécue

L'îlot de chaleur de la couche urbaine vécue est une différence entre la température de l'air mesurée entre le sol et les toitures des bâtiments et la température à hauteur équivalente au-dessus de la région rurale environnante.

Îlot de chaleur de surface

L'îlot de chaleur de surface est une différence entre les températures de surfaces urbaines et les températures de surfaces de la région rurale environnante.

Inertie thermique

L'inertie thermique est la capacité d'un matériau à stocker de la chaleur. On parle d'inertie faible lorsque le matériau stocke peu de chaleur et d'inertie forte lorsqu'il en stocke beaucoup. Un matériau à faible inertie se réchauffe et se refroidit très rapidement tandis qu'un matériau à forte inertie se réchauffe et se refroidit lentement.

Jour tropical

Une journée tropicale est considérée, en Suisse, comme une journée lors de laquelle la température maximale de l'air dépasse les 30 °C.

Microclimat urbain

Le microclimat urbain se réfère aux conditions climatiques spécifiques qui se forment à l'intérieur d'une zone urbaine en raison des caractéristiques propres à l'environnement bâti et des activités humaines. Les matériaux de construction, la densité des bâtiments, les espaces verts, la circulation automobile, les émissions de chaleur et d'autres facteurs modifient les caractéristiques thermiques, hydriques et aérologiques de la zone urbaine.

MRT

La MRT (Température radiative moyenne) est une température intervenant dans le calcul du bilan thermique d'un corps avec son environnement. Elle permet de synthétiser en une seule température la quantité de chaleur que le corps humain reçoit de la part de son environnement proche par rayonnement.

Nuit tropicale

Une nuit tropicale est considérée en Suisse, comme une nuit lors de laquelle la température minimale de l'air ne descend pas en dessous de 20°.

PET

Le PET (Température physiologique équivalente) est un indicateur qui utilise un modèle de bilan thermique du corps humain qui intègre les données de température, rayonnement, humidité et vents ainsi que les caractéristiques du sujet tel que l'activité, l'habillement, l'âge et le sexe. Il calcule une température équivalente à la sensation de chaleur dans des conditions environnementales contrôlées, sans rayonnement ni vent.

Photosynthèse

La photosynthèse est un processus biochimique essentiel dans lequel les plantes utilisent la lumière du soleil pour convertir le dioxyde de carbone (CO_2) et l'eau (H_2O) en hydrate de carbone et en oxygène. Grâce à la photosynthèse, les plantes produisent une partie de leur propre nourriture, le solde provenant du sol par les racines permettant leur croissance, et libèrent de l'oxygène dans l'atmosphère, contribuant ainsi à la régulation de la composition chimique de l'air. La formule chimique simplifiée de la photosynthèse est: $6 \text{H}_2\text{O} + 6 \text{CO}_2 + \text{lumière} = \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2$.

Rayonnement

Le rayonnement (thermique) est un mode de transfert de chaleur sous forme de rayonnement infrarouge entre des objets distants à des températures différentes, sans contact ou sans objet (rayonnement thermique de la terre vers le ciel).

Rayonnement solaire spéculaire

La réflexion spéculaire se caractérise par une réflexion géométrique et unidirectionnelle du rayonnement solaire sur une surface lisse et réfléchissante, telle qu'une façade en verre ou en métal poli. Contrairement à la réflexion diffuse, où la lumière est réfléchie de manière homogène dans toutes les directions, la réflexion spéculaire crée des reflets nets et clairs dans une direction spécifique.

Services écosystémiques

Il s'agit des bénéfices que les humains retirent des écosystèmes sans qu'ils aient à agir pour les obtenir.

Sky View Factor

Le sky view factor (SVF) mesure la proportion de ciel visible depuis un point au sol. Il indique la partie non obstruée par les bâtiments, les arbres ou autres éléments verticaux. Le SVF est utilisé pour évaluer l'exposition solaire, la ventilation, le refroidissement urbain, etc. Un SVF élevé signifie une plus grande ouverture vers le ciel, avec des implications pour le confort, la qualité de l'air et la planification urbaine.

Sols scellés

Un sol scellé fait référence à un sol dont la partie superficielle a été complètement recouverte ou fermée, souvent par des matériaux tels que le béton, l'asphalte ou les pavés. Son objectif principal est de prévenir l'infiltration d'eau dans la profondeur du sol, fournissant ainsi une résistance structurelle et une dureté accrue. Cependant, cette imperméabilisation rend le sol incapable d'échanges avec l'atmosphère, ce qui entraîne sa dégradation et la perte des nombreux services écosystémiques qu'il offre, comme la régulation des inondations, l'activité biologique et l'atténuation de l'effet d'îlot de chaleur urbain.

Stomates

Les stomates sont de petites ouvertures sur les feuilles et les tiges des plantes, permettant les échanges gazeux avec l'environnement. Ils régulent la transpiration, l'apport de dioxyde de carbone pour la photosynthèse et la libération d'oxygène. Sensibles à la lumière, la température et l'humidité, ils s'adaptent aux besoins de la plante et aux conditions environnementales.

Stress bioclimatique

Le phénomène de stress bioclimatique/ thermique se réfère à la chaleur reçue en excès par rapport à celle que le corps peut tolérer sans trouble physiologique.

Stress hydrique

Un arbre peut se trouver en stress hydrique lorsque son sol n'a plus la capacité de fournir l'eau nécessaire à la demande évaporative des feuilles. Ce problème peut survenir lors de sécheresses prolongées privant les sols de ressource en eau, lorsque le sol n'infiltré et ne retient pas suffisamment d'eau ou lorsque les températures élevées accélèrent l'évaporation par les feuilles. Pour s'adapter, l'arbre ajuste son fonctionnement interne mais cela peut affecter sa croissance. Dans les cas extrêmes, un stress hydrique sévère peut entraîner la mort de l'arbre.

Taux de canopée

Le taux de canopée est calculé comme la proportion du territoire (espace urbain ou ensemble du territoire communal) dont la hauteur de végétation est supérieure à 3 ou 6 m.

Température apparente du ciel

En microclimatologie, le ciel est considéré comme une surface ayant une température propre pour quantifier les échanges radiatifs entre un sujet et son environnement, y compris la part visible du ciel (voir définition Sky View Factor). Cette température est généralement basse dans des conditions dégagées et une atmosphère propre (de l'ordre de quelques degrés Celsius, voire négative, même en plein été). Elle est notablement plus élevée lors de la présence d'une couche nuageuse ou d'un voile de pollution.

Température d'équilibre de la surface

La température d'équilibre d'une surface est la température à laquelle la quantité de chaleur que la surface absorbe de son environnement est égale à la quantité de chaleur qu'elle dissipe. Cela signifie que la surface a atteint un état stable où elle ne gagne ni ne perd de chaleur, restant à une température constante.

Température physiologique ressentie

Pour faciliter l'interprétation des différentes grandeurs qui influencent le confort climatique d'un individu, il existe de nombreux indicateurs qui les intègrent pour en tirer une température physiologique ressentie ou équivalente, c'est-à-dire une température correspondante à l'intérieur d'un bâtiment qui aboutirait à une sensation thermique comparable. Il existe plus d'une centaine d'indicateurs; les plus importants sont le PET et l'UTCI.

Trame

Terme couramment utilisé en aménagement du territoire, en conservation de la biodiversité et protection du paysage. Dans ce guide, la notion de «trame» fait référence à la structure spatiale qui organise et articule le tissu urbain ou l'espace rural. Elle désigne la disposition et la configuration des éléments constitutifs d'une ville ou d'une zone urbaine, tels que les rues, les bâtiments, les espaces ouverts et les infrastructures. Chaque type de trame (verte et brune, grise, bleue) représente une composante spécifique du paysage urbain et remplit des fonctions particulières. Ces différentes trames interagissent et se superposent pour créer un réseau complexe et diversifié qui façonne l'écosystème urbain.

UTCI

L'UTCI (Indice de température climatique universel) est un indice permettant d'évaluer la température ressentie par une personne dans un environnement thermique complexe. Il intègre les grandeurs physiques telles que la vitesse du vent l'humidité, la MRT, le rayonnement solaire et la température de l'air. Cet indice permet ainsi de prendre en compte l'ensemble des échanges thermiques entre l'être humain et son environnement en extérieur.

