

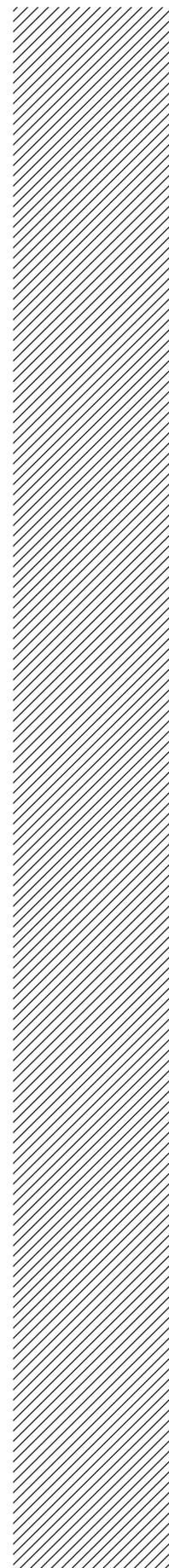
📖 ÉTUDE

ATTÉNUER LES ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS

CAHIER #5 : MÉTHODES ET OUTILS DE CONCEPTION
DES PROJETS

MARS 2020





Directrice de la publication : **Dominique ALBA**

Étude réalisée par : **Julien BIGORGNE**

Sous la direction de : **Paul BAROIN**

Avec le concours de : **Emmanuelle ROUX, Yann-Fanch VAULÉON**

Cartographie et traitement statistique : **Julien BIGORGNE**

Photos et illustrations : **Apur sauf mention contraire**

Mise en page : **Apur**

www.apur.org

19P020202

Sommaire

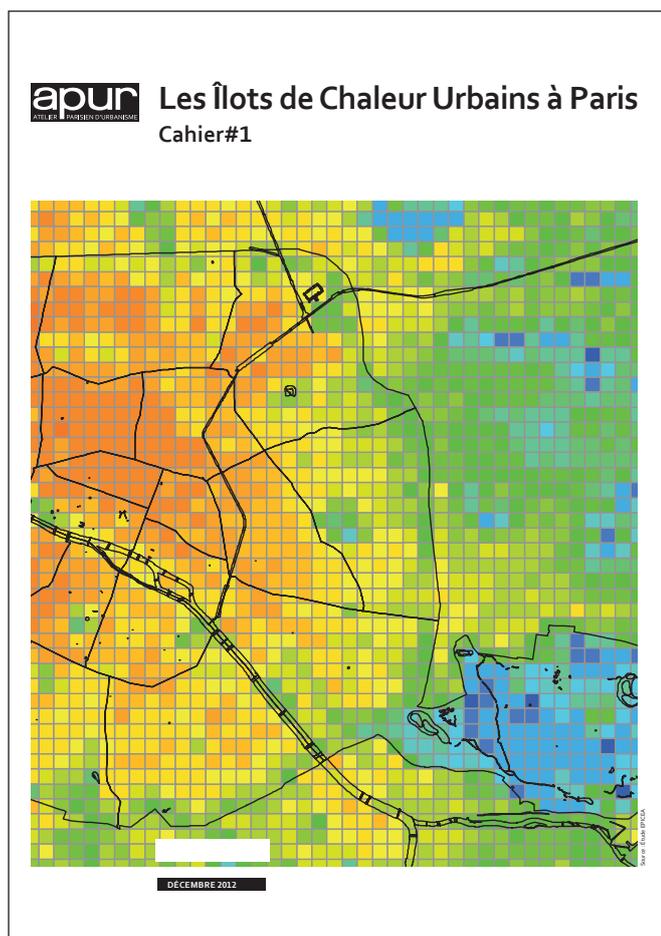
INTRODUCTION	4
1. Le phénomène d'îlot de chaleur urbain	6
2. Intégrer la question climatique à la conception des projets	10
Le microclimat : un enjeu dès les premières esquisses du projet	10
Capitaliser sur des outils simples	12
3. Grammaire	18
La végétation	18
Les revêtements de sol	27
L'arrosage	31
Le confort d'été dans les bâtiments	33
La chaleur anthropique	40
ANNEXE	42
BIBLIOGRAPHIE	46

INTRODUCTION

Depuis l'adoption du premier Plan Climat de la Ville de Paris en 2007, et, afin d'accompagner les politiques parisiennes et métropolitaines, l'Apur a engagé une série de travaux afin d'identifier les potentiels d'adaptation des tissus urbains au regard des évolutions climatiques en cours.

Dans ce cadre, l'Apur a réalisé quatre cahiers traitant spécifiquement de la question des îlots de chaleur :

- Cahier #1 : les îlots de chaleur urbains à Paris ;
- Cahier #2 : simulations climatiques de trois formes urbaines parisiennes et enseignements ;
- Cahier #3 : brises thermiques ;
- Cahier #4 : influence climatique des revêtements de sol à Paris.



<https://www.apur.org/fr/nos-travaux/ilots-chaueur-urbains-paris-cahier-1>

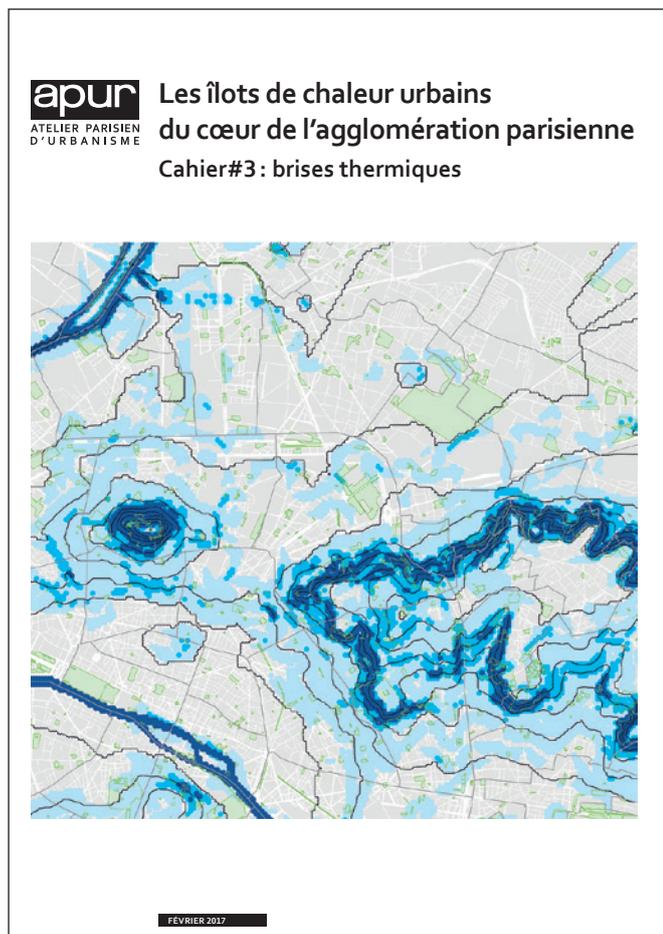


<https://www.apur.org/fr/nos-travaux/ilots-chaueur-urbains-paris-cahier-2-simulations-climatiques-trois-formes-urbaines>

Ce cinquième cahier traite de la prise en compte des îlots de chaleur urbains (ICU) lors des phases de conception du projet urbain. Ce document, qui s'appuie sur les quatre cahiers précédents, propose une base méthodologique permettant d'explicitier quelques outils de conception relatifs à la question des ICU. Il tente d'apporter aux architectes, urbanistes et à leurs maîtrises d'ou-

vrage des pistes d'intégration de la question climatique dès les premières esquisses du projet. Il faut néanmoins se garder de l'idée qu'il existerait une doctrine de conception qui édicterait ce que serait une ville climatiquement vertueuse.

Ce cahier est une aide à la conception et un garde-fou face aux erreurs aujourd'hui couramment constatées.



<https://www.apur.org/fr/nos-travaux/ilots-chaueur-urbains-coeur-agglomeration-parisienne-cahier-3-brises-thermiques>



<https://www.apur.org/fr/nos-travaux/ilots-chaueur-urbains-paris-cahier-4-influence-climatique-revetements-sol-paris>

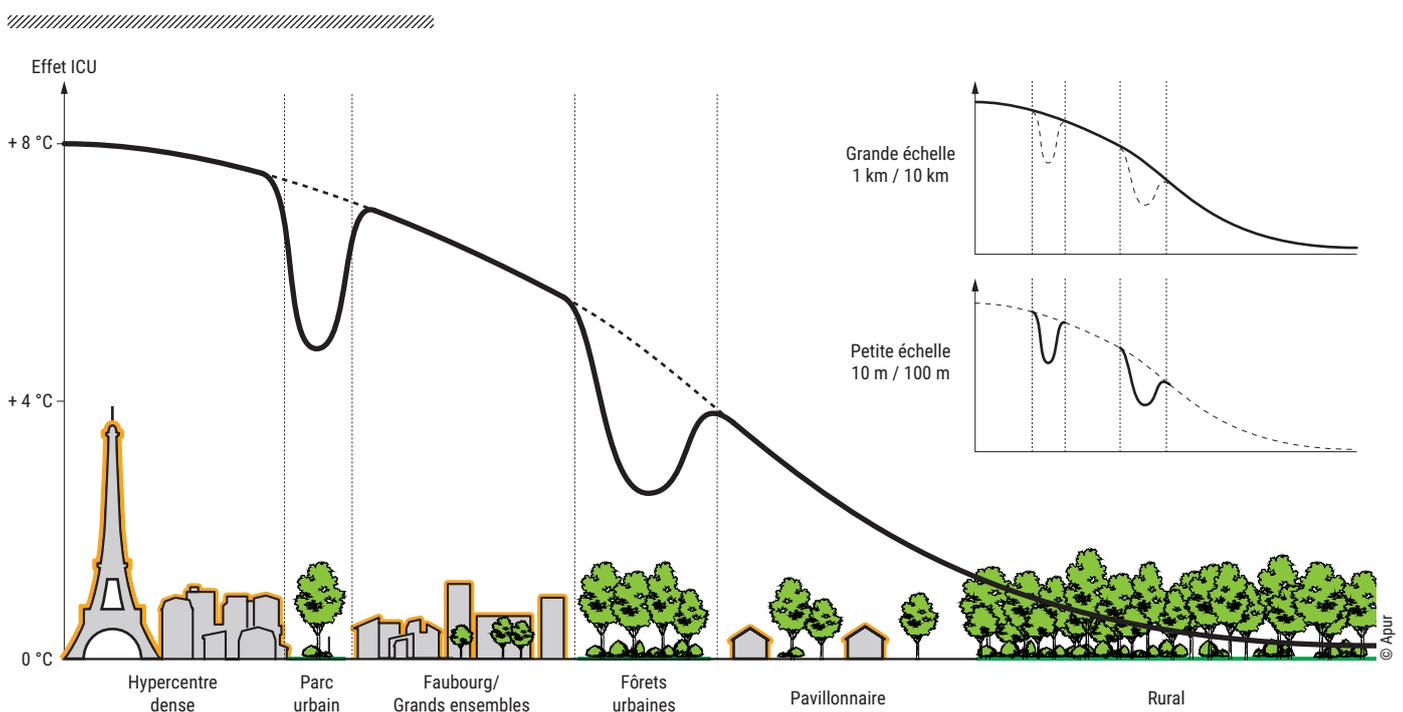
1. Le phénomène d'îlot de chaleur urbain

L'îlot de chaleur urbain se manifeste dès qu'il y a artificialisation d'espaces naturels au profit de l'urbanisation. L'usage de matériaux captant la chaleur, l'imperméabilisation qui bloque le cycle naturel de l'eau et la consommation d'énergie pour les activités humaines participent à l'élévation de la température en ville par rapport aux zones naturelles avoisinantes. Quoiqu'indépendant du changement climatique, l'ICU se révèle de plus en plus pénible pour les habitants des villes à mesure que la température globale augmente.

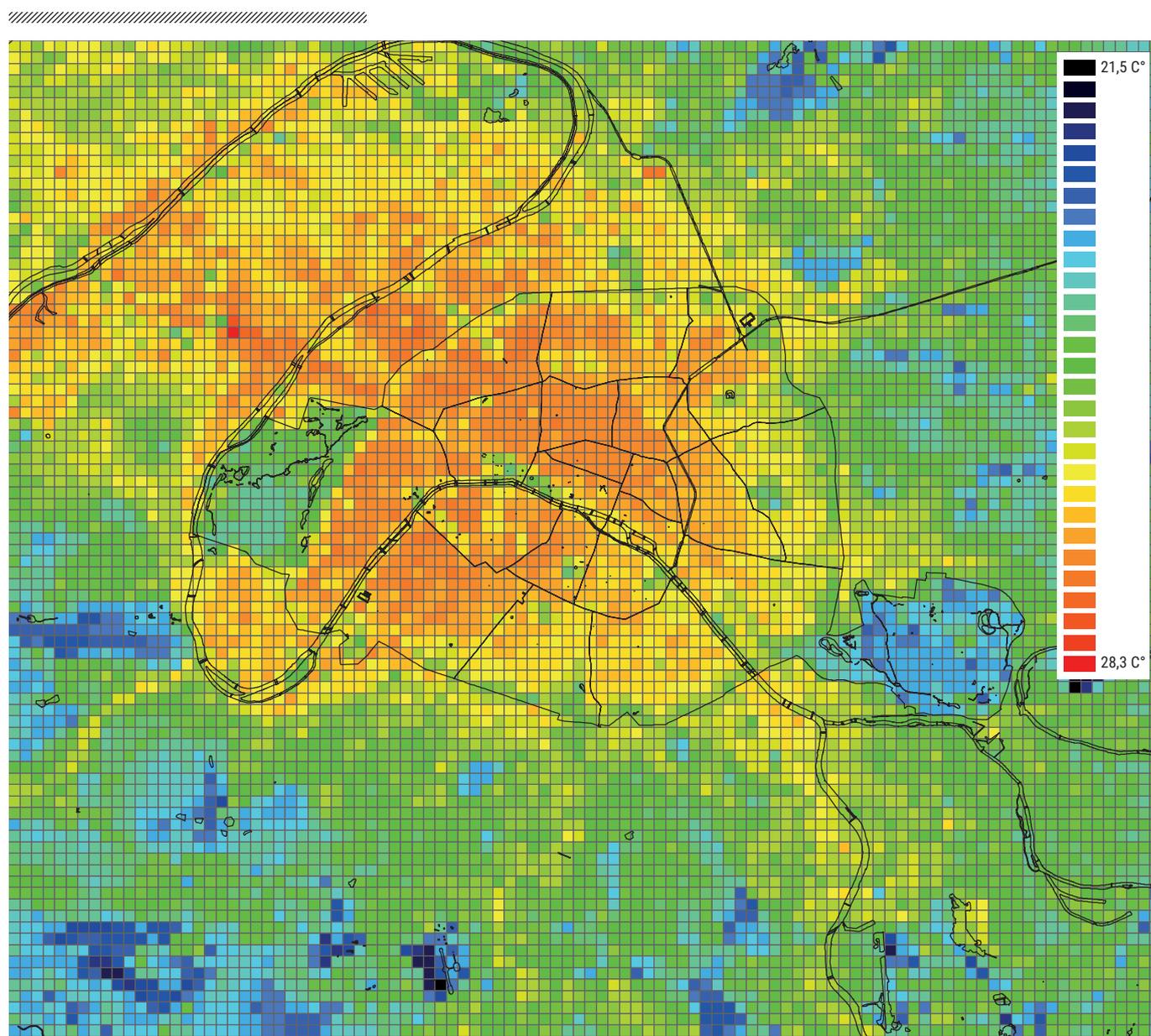
Les mesures de lutte contre les ICU décrites dans cette étude sont des mesures **d'adaptation** à prendre **localement** pour faire en sorte que la ville puisse éviter de trop emmagasiner de la cha-

leur. Elles doivent être envisagées en parallèle des mesures **d'atténuation** du changement climatique qui reposent sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre induites par les villes afin de limiter leur contribution au changement climatique **global**. S'il existe des mesures d'adaptation efficaces, toutes ces mesures restent des mesures correctives, elles sont très efficaces à condition que la dérive que subit le climat actuel reste contenue. C'est le sens du seuil des 2 °C qui est souvent invoqué comme étant la ligne rouge à ne pas franchir. Passé ce seuil les mesures d'adaptation qui se basent sur la végétalisation, la réintroduction d'un cycle de l'eau, la transformation des revêtements et la limitation des émissions de chaleur des activités humaines per-

COURBE DE TEMPÉRATURE



TEMPÉRATURE DE L'AIR À 2 M DU SOL LE 10 AOÛT 2003 À 6 H DU MATIN (4H UTC)



draient leur capacité d'amélioration du climat urbain, les ordres de grandeurs d'élévation de températures devenant trop pénalisants.

L'ICU est une anomalie climatique liée à l'urbanisation. On peut la qualifier d'intermittente et de multi-échelle.

- Elle est **intermittente** car elle ne se manifeste qu'à certains moments de l'année, en particulier durant les journées sans vent et sans couverture nuageuse. Bien que souvent associé à un épisode estival, l'ICU se manifeste également en hiver, il est alors facteur d'amélioration du confort urbain, ce qui fut longtemps perçu comme un avantage notamment au XIX^e siècle où l'on mourait de froid dans les villes. Aujourd'hui c'est surtout en été que l'ICU apparaît comme préoccupant puisque cette tendance des villes à la surchauffe vient amplifier les épisodes caniculaires liés au changement climatique.
- Elle est **multi-échelle** car : il existe un effet global de « dôme » de chaleur qui se manifeste à grande échelle, par exemple sur des distances de plusieurs kilomètres. À l'intérieur du « dôme » de chaleur, il existe des différences de température notables correspondant à la présence de parcs, jardins, cimetières arborés ou cours d'eau. Les échelles sur lesquelles se manifestent ces différences vont de plusieurs dizaines de mètres à des centaines de mètres.

L'ICU connaît des variations horaires importantes, et se mesure préférentiellement la nuit car c'est à ce moment-là que les écarts de température entre la ville et la campagne sont les plus importants.

- En journée, le rayonnement solaire est fortement capté par les villes notamment par les bâtiments et les sols

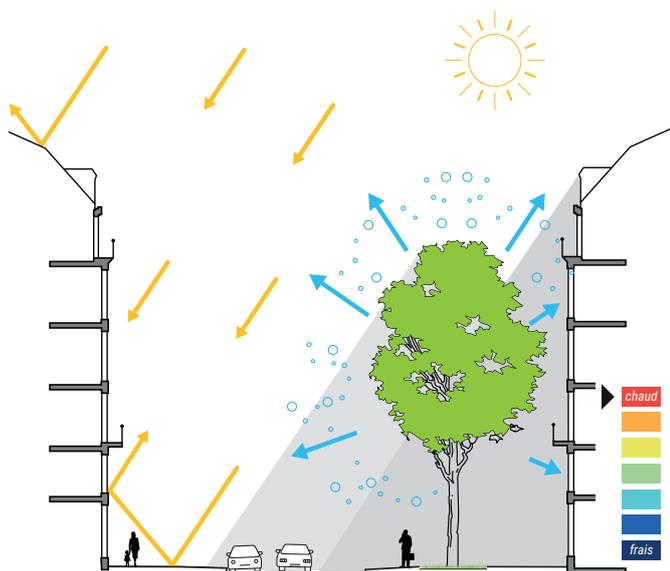
minéralisés. Dans le contexte urbain, les ombres sont prodiguées par les bâtiments et les arbres notamment les arbres à grand développement. L'ombrage évite au sol urbain minéralisé de trop emmagasiner de chaleur. En journée le mécanisme d'évapotranspiration qui est à l'œuvre au sein des végétaux rafraîchit l'air ambiant. Pour ce faire, l'eau liquide contenue dans le sol est captée par les racines des végétaux et évaporée en surface. Ce mécanisme est très actif en milieu forestier, il l'est beaucoup moins en ville et notamment sur les espaces publics qui sont généralement imperméabilisés. Dans le système urbain ordinaire, l'eau n'interagit pas avec le sous-sol de la ville, l'eau de surface est captée dans les égouts et évacuée hors de la ville.

- La nuit la ville se refroidit mal puisqu'elle a emmagasiné beaucoup d'énergie le jour. Cette énergie est réémise. Ce mécanisme est absent en zone rurale, c'est pour cette raison que la différence de température nocturne peut être très importante avec la ville dense.
- En ville la consommation d'énergie nécessitée par les activités humaines joue un rôle dans l'ICU. Toute consommation d'énergie, quelle qu'en soit sa source (gaz, électricité, vapeur, etc.), est toujours accompagnée de dégagement de chaleur. Il peut s'agir par exemple des climatiseurs, des moteurs des véhicules, des éclairages, etc. Ces consommations sont d'autant plus pénalisantes qu'elles engendrent souvent des rejets de chaleur au niveau des piétons. Ainsi les climatiseurs des commerces évacuent de la chaleur à proximité immédiate des trottoirs, tout comme les véhicules qui circulent.

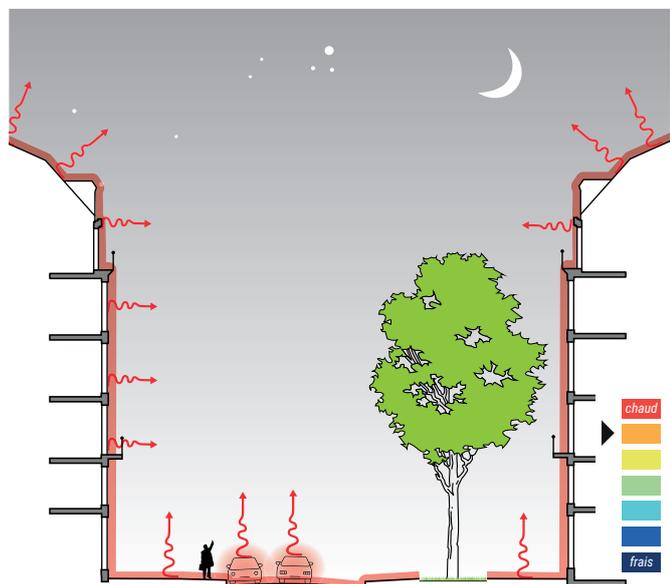
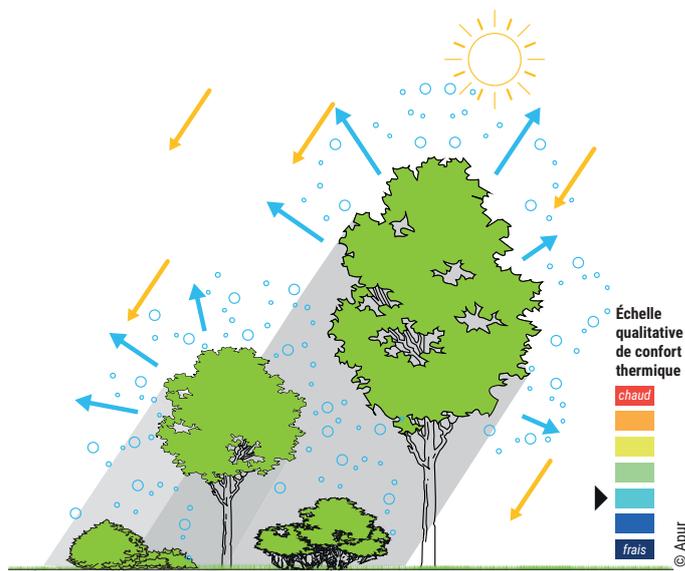
COMPARAISON CLIMATIQUE ENTRE VILLE DENSE ET ZONE RURALE



Climat de la ville dense caractérisé par la présence d'un ICU



Zone rurale dépourvue d'ICU



2.

Intégrer la question climatique à la conception des projets

Nous résumerons le projet urbain à deux situations : les projets qui s'insèrent dans des tissus existants et ceux qui consistent en la création de nouveaux quartiers. Dans le 1^{er} cas, le projet vient s'insérer dans une forme urbaine préexistante avec souvent un parcellaire contraint et des espaces publics préexistants, alors que dans le 2^e cas le concepteur a la latitude de créer, de

dimensionner la totalité des espaces. Du point de vue de l'ICU, il n'y a pas de différence d'approche entre les types de situations rencontrées, simplement une différence de degrés de liberté. Le travail reste le même, il consiste à poser la question de l'ICU en amont au même titre que toutes les autres thématiques : paysage, réseaux, schéma de circulation, m² à bâtir, etc.

Le microclimat : un enjeu dès les premières esquisses du projet

Si l'acte d'urbaniser, d'artificialiser se traduit toujours par un échauffement local du climat, l'enjeu est de comprendre comment minimiser les impacts climatiques des projets. **Il s'agit d'associer à la conception en amont des projets la question climatique et d'en faire, parmi d'autres enjeux, une variable qui permettra d'élaborer de façon itérative les multiples esquisses du projet.** Pour cela, il est nécessaire que le concepteur puisse manipuler avec souplesse et simplicité la question microclimatique. **En ce sens les questions énergétiques, qu'elles relèvent de la performance thermique des bâtiments ou de l'impact microclimatique du projet urbain, ne doivent pas faire l'objet d'une sous-traitance technique opaque, mais doivent être appréhendées simplement par des ordres de grandeurs suffisants à l'esquisse du projet.** Depuis l'après-guerre, les questions techniques sont trop systématiquement le domaine réservé des

ingénieurs. **Il y a donc une nécessité et une obligation de réappropriation des problématiques techniques pour les architectes et les urbanistes.** À l'inverse des questions techniques relatives aux bâtiments, les questions microclimatiques sont relativement récentes, il y a une dizaine d'années elles étaient le sujet exclusif de chercheurs. Aujourd'hui il n'existe pas de réglementation nationale sur la conception microclimatique, il n'existe pas de modèles officiels contraignants comme il en existe dans le secteur du bâtiment notamment à propos de la performance énergétique. Nous vivons actuellement une séquence assez ouverte dans laquelle chacun peut proposer sa propre méthode d'appréciation du sujet, ce qui est plutôt une chance pour les architectes et urbanistes.

Dans ce contexte, il est préférable pour le concepteur de développer des méthodes d'appréciation de l'impact microclimatique des projets les plus simples

possibles, en mettant de côté les modélisations numériques dans une première approche¹. L'objectif est que l'équipe développe une compréhension empirique des phénomènes d'ICU qui lui permettra de réinterroger le projet tant qu'elle n'aura pas abouti à une formulation qui constitue une stratégie globale et cohérente du point de vue climatique. Ainsi le projet sera élaboré selon une gymnastique itérative à toutes les phases de conception afin d'intégrer la conception climatique à celle du paysage, de la configuration des espaces non bâtis, de la taille des bâtiments, des matériaux etc.

Dans la question d'ICU, il existe une notion complexe qui est celle de la dualité entre le confort thermique des espaces extérieurs et le confort thermique dans les bâtiments. Dans une première approche, il est utile de considérer que **les choix de conception des bâtiments doivent se faire indépendamment de la qualité climatique des espaces extérieurs**. En effet :

- Le confort dans les logements est surtout tributaire de la capacité qu'a un bâtiment à faire face à l'ensoleillement de par sa conception et à assurer une ventilation efficace². En amont de la conception, le concepteur peut décider

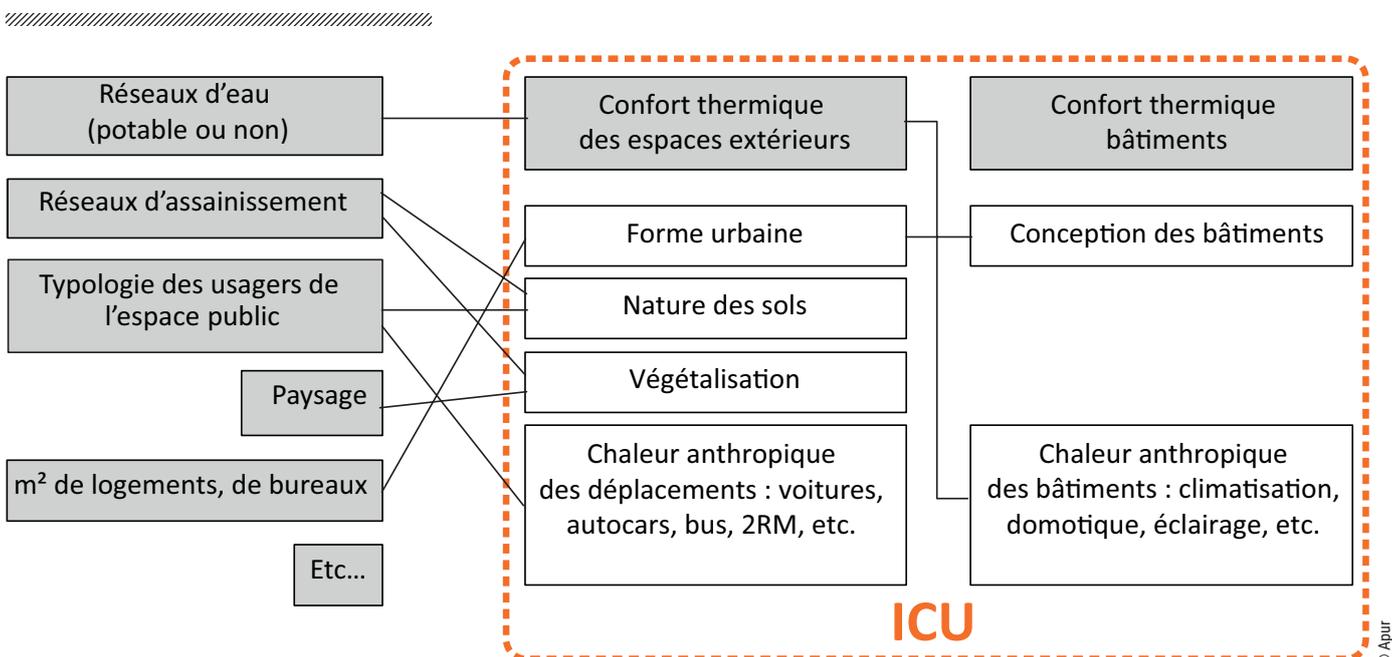
de faire des logements qui sont uniquement traversants pour faciliter la surventilation nocturne estivale, il peut décider de faire des bâtiments parsemés de puits de lumière ou de courettes pour stimuler l'effet de cheminée thermique et renforcer la circulation de l'air, etc. Toutes ces questions arbitrent des choix de formes urbaines qui auront des répercussions sur le confort thermique des espaces extérieurs.

- De la conception climatique du bâtiment dépend ou non le recours à la climatisation. Cette climatisation est presque requise dans tous les cas s'il est prévu une occupation commerciale des rez-de-chaussée. Ainsi, la gestion des rejets de chaleur liés à l'utilisation de l'énergie dans le bâtiment doit être pensée afin d'éviter les situations où de l'air chaud est directement expulsé au droit des trottoirs. Si ces rejets ne peuvent être évités, il sera préférable de prévoir des évacuations en toiture.

De ce qui précède, on déduit aisément que, de la conception des bâtiments, résultent des impacts sur la forme urbaine et sur la gestion de la chaleur anthropique qui ont toutes deux une influence directe sur le confort thermique des espaces extérieurs.

1 - L'annexe de ce document apporte des éléments complémentaires concernant les modèles numériques et les thermographies.
2 - Un chapitre de cette étude est consacré à la question du confort d'été dans les bâtiments.

EXEMPLES DE RELATIONS ENTRE CONTRAINTES DU PROJET URBAIN AUXQUELLES SONT INTÉGRÉES LES OBLIGATIONS EN TERME D'ICU

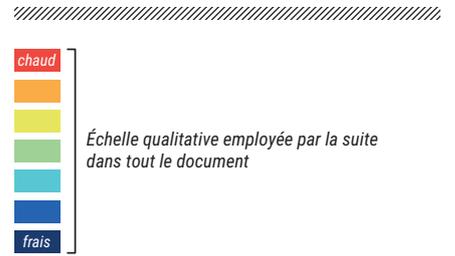


Capitaliser sur des outils simples

Il est recommandé au concepteur d'approcher les questions d'ICU avec des outils relativement rudimentaires qui lui donneront une base de travail suffisante pour comprendre les phénomènes en jeu dans les questions de confort thermique sur les espaces extérieurs, notamment la nuit.

Pour cela, il peut être pratique d'avoir recours à une échelle qualitative qui représente le confort thermique du piéton. Dans les exemples suivants, on a retenu de façon arbitraire 7 niveaux de confort thermique pour les espaces extérieurs.

ÉCHELLE QUALITATIVE DE CONFORT THERMIQUE



EXEMPLE DE PLAN D'ENSOLEILLEMENT CUMULÉ D'UN 15 AOÛT



Parc Monceau, Paris 17^e.



Sud du boulevard Vincent Auriol, Paris 13^e.

L'ensoleillement

Le premier niveau d'analyse est de regarder la forme urbaine et l'ensoleillement cumulé sur les espaces libres sur une journée type en été. Dans cet exercice on se contente de faire un simple calcul solaire d'une journée en ne prenant en compte que les bâtiments. À ce stade on ne s'intéresse ni à la nature du sol, ni à la présence d'arbres.

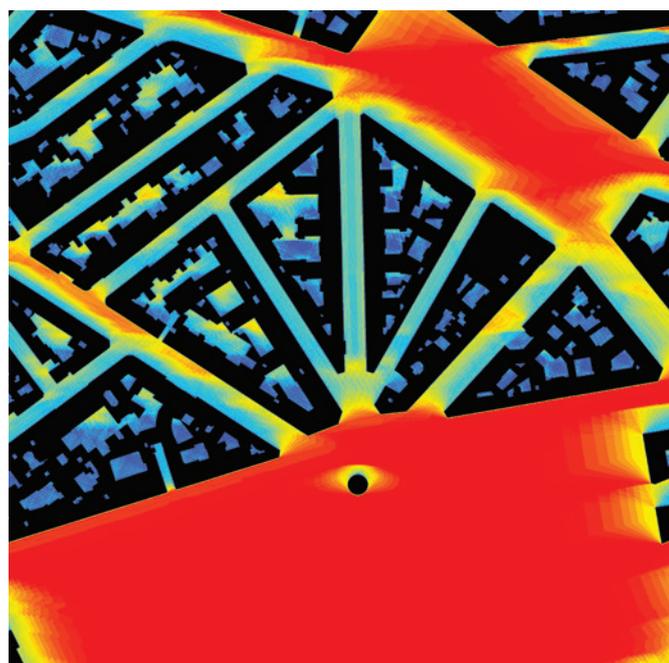
Apparaissent ainsi les espaces les plus ensoleillés, ceux-ci sont susceptibles d'absorber du rayonnement en journée et le restituer la nuit si leur nature le permet, ce qui sera souvent le cas avec des revêtements tels que l'asphalte des trottoirs ou le bitume des chaussées.

La date retenue pour le calcul est une date en été. Si on veut retenir le jour le plus pénalisant du point de vue de l'ensoleillement, on retiendra la date du solstice d'été (fin juin). Il est possible de raffiner cette approche en retenant pour le calcul solaire plusieurs dates, par exemple : fin juin, fin juillet et fin août car la course du soleil varie beaucoup en été, et parce que, statistiquement, l'occurrence de canicule³ est plus probable au milieu de l'été (mi-août) qu'au début (fin juin).

3 - Le réchauffement général de l'atmosphère dans l'hémisphère nord possède une certaine inertie, c'est pour cela qu'il y a un décalage entre les moments les plus ensoleillés (fin juin) et les moments les plus chauds qui surviennent généralement 1 mois après.

EXEMPLE DE PLAN D'ENSOLEILLEMENT CUMULÉ D'UN 15 AOÛT

////////////////////



Parc Monceau, Paris 17^e.



Sud du boulevard Vincent Auriol, Paris 13^e.

La trame rafraîchissante

Pour rendre compte du confort nocturne, il faut recenser parallèlement les entités qui ne stockent pas l'énergie solaire. Il s'agit des revêtements en stabilisé, des sols nus, des pelouses, des plans d'eau. On ajoute également les arbres qui font à la fois de l'ombre et de l'évapotranspiration le jour.

Les choix colorimétriques retenus dans l'échelle sont qualitatifs et arbitraires, dans notre représentation les pelouses apparaissent comme fraîches ce qui suppose qu'elles ne sont pas encore en

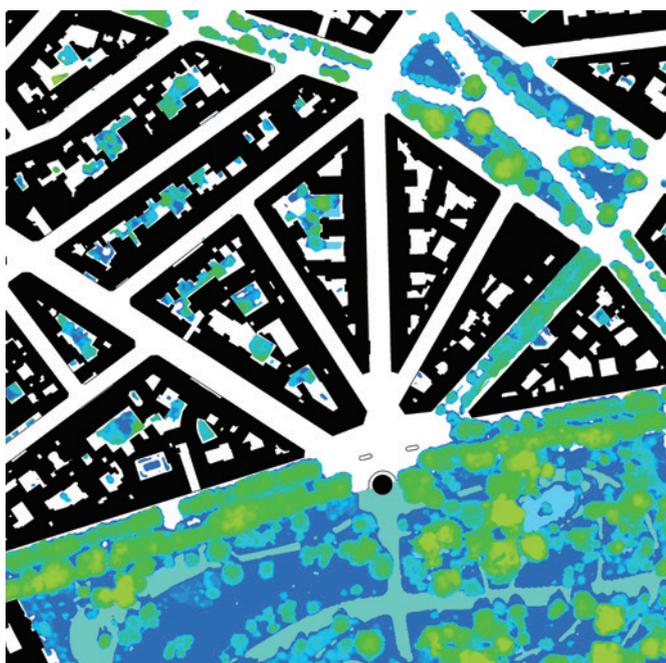
stress hydrique, les arbres quant à eux produisent des espaces, certes frais, mais un peu moins que les pelouses car leurs feuillages empêchent quelque peu le rafraîchissement nocturne radiatif sous le houppier. Tout comme dans une modélisation numérique plus sophistiquée les choix arbitraires en entrée conditionnent énormément les résultats, le but ici est de rendre compte d'un point de vue qualitatif des éléments qui ont un rôle plutôt rafraîchissant sur l'espace urbain qui a été ensoleillé.

TRAME RAFRAICHISSANTE : VÉGÉTATION, EAU ET SOLS PERMÉABLES

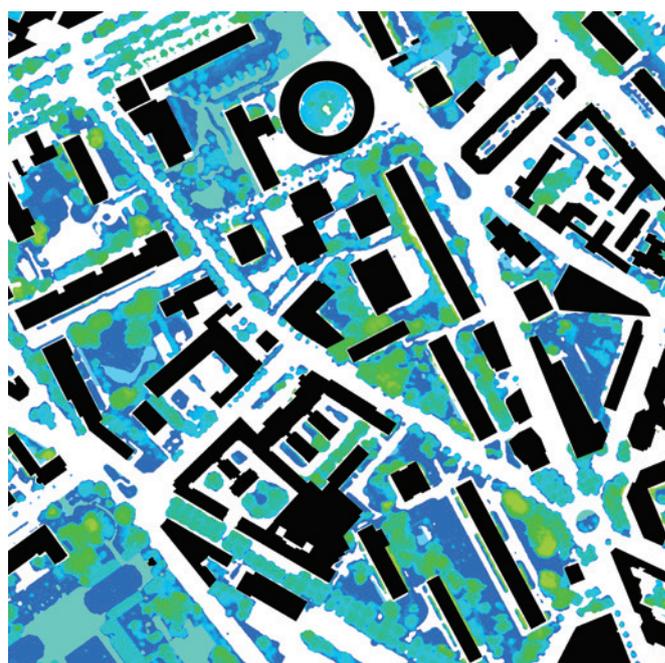


Échelle qualitative d'appréciation de la trame rafraîchissante

-  Lieux sous les arbres à grand développement
-  Plans d'eau, stabilisés
-  Pelouses
-  *frais* Forêts



Parc Monceau, Paris 17^e.



Sud du boulevard Vincent Auriol, Paris 13^e.

Production de la carte de synthèse du confort thermique nocturne

La carte de la trame rafraîchissante est ensuite superposée à la carte d'ensoleillement pour rendre compte du confort thermique nocturne. On notera que cette approche suppose que l'on considère en première approximation que l'effet rafraîchissant de la végétation est pratiquement cantonné à son emprise propre, c'est-à-dire qu'on ne constate pas ou peu d'effet rafraîchissant d'un parc à l'extérieur de ce dernier. Cette assertion est généralement vérifiée, même si les bâtiments qui jouxtent les parcs peuvent en effet bénéficier d'un apport de fraîcheur de la part du parc, cet effet s'estompe rapidement à mesure de l'éloignement.

les espaces verts mais aussi à la végétation diffuse des espaces non bâtis : arbres d'alignement, pelouses, végétation interstitielle en pieds d'immeuble, etc.

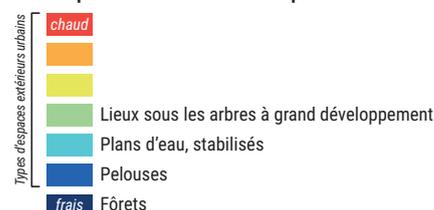
Cette approche permet de décrire en première approximation le confort urbain nocturne. Elle est généralement suffisante pour comprendre les principaux mécanismes en jeu dans les questions de climat urbain.

Néanmoins, cet exercice doit être complété le cas échéant par un recensement des sources de chaleur anthropique⁴. Les éléments rejetant du chaud tels les climatiseurs en rez-de-chaussée participent à la pollution thermique au niveau des piétons. Dans la nomenclature colorimétrique arbitraire précédemment employée, ils seront à faire figurer comme des halos « rouges » (c'est-à-dire le niveau de température le plus élevé).

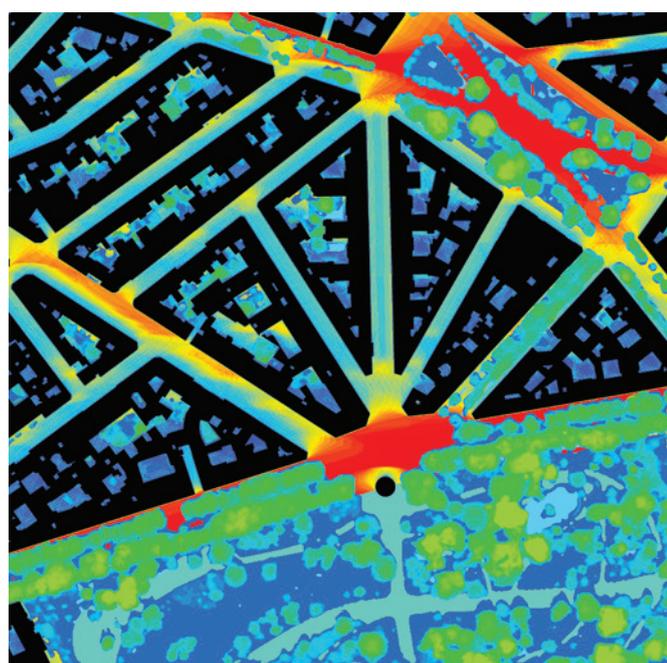
4 - La chaleur anthropique est la chaleur dégagée par la consommation d'énergie des activités humaines et qui participe à l'ICU.

Cette remarque incite donc les concepteurs à s'intéresser non seulement à la végétation présente dans

Échelle qualitative de confort thermique nocturne



REPRÉSENTATION SIMPLIFIÉE DU CONFORT THERMIQUE NOCTURNE



Parc Monceau, Paris 17^e.



Sud du boulevard Vincent Auriol, Paris 13^e.

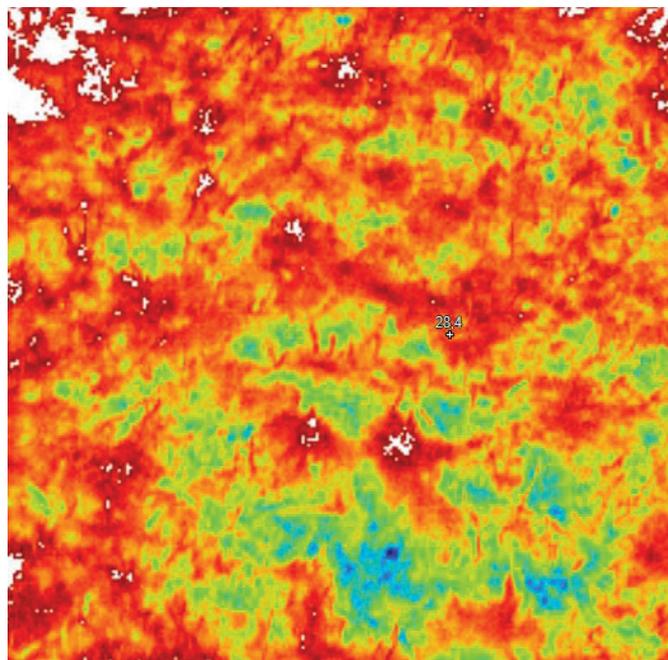
Il en sera, par exemple, de même des réseaux de chaleur mal calorifugés, des parcs de stationnement autocars, etc.

La méthode développée ici possède bien sûr quelques limites car elle ne rend pas compte de certains éléments comme les réflexions solaires sur les bâtiments, le taux d'humidité des sols, les mouvements d'air :

- les bâtiments qui sont réfléchissants, comme les bâtiments vitrés, modifient le plan d'ensoleillement ;
- l'humidité du sol conditionne le service écologique de rafraîchissement apporté par la végétation. Si le stress hydrique devient trop fort, la plus-value de rafraîchissement des végétaux baisse progressivement à mesure que le sol s'assèche. La représentation simplifiée précédente suppose un stress hydrique peu présent. Son accentuation est fortement conditionnée par la durée de la canicule et le niveau d'imperméabilisation général de la ville qui participe de l'assèchement des sols tout au long de l'année ;

• la question des mouvements d'air est relativement importante car elle peut influencer notablement le confort thermique dans certaines situations. Les mouvements d'air se manifestent généralement durant les canicules sous forme de brises thermiques, c'est-à-dire de vents locaux consécutifs de la géographie d'un site urbain (relief, présence de lacs, de fleuves, etc.). Ces brises peuvent améliorer le ressenti climatique sur l'espace public mais comme leur survenue est très aléatoire, elles ne peuvent pas être considérées comme référentes de la phase de conception. Cette recommandation n'est pas valable dans certaines situations où les brises sont récurrentes et prépondérantes par exemple dans le cas des villes côtières ou des villes situées en vallée de montagnes.

PELOUSE ET STRESS HYDRIQUE

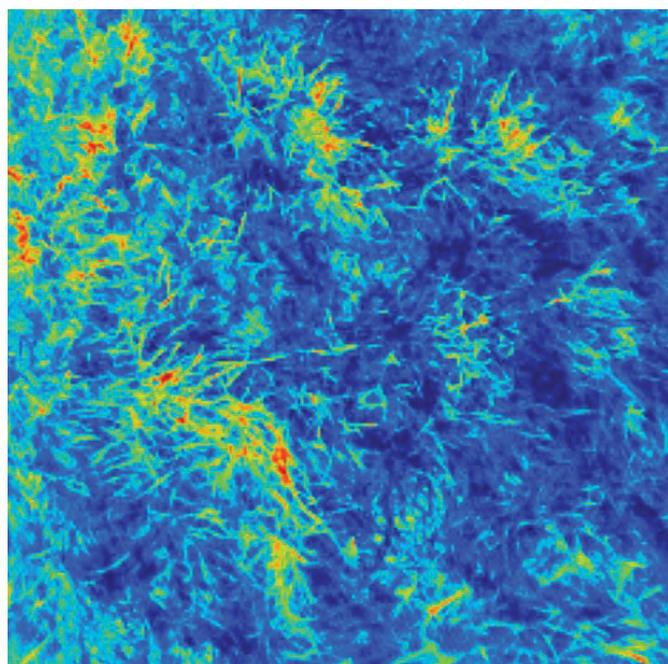


© Apur

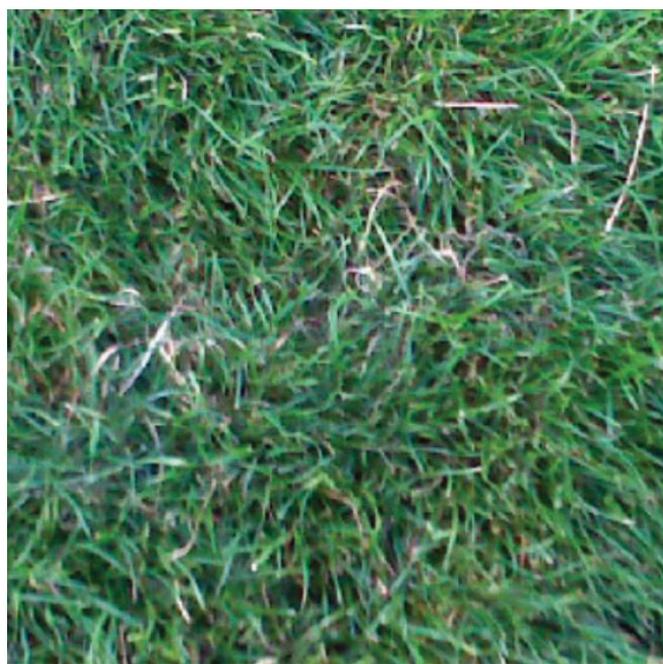


© Apur - Bertrand Guigou

Thermographie et photographie de pelouses en stress hydrique.



© Apur



© Apur - Julien Bigorgne

Thermographie et photographie de pelouses sans stress hydrique.

3.

Grammaire

Les stratégies d'adaptation climatique peuvent s'apparenter à une grammaire dans le sens où il n'existe pas de hiérarchie entre les solutions d'adaptation mais plutôt une adéquation à rechercher entre les usages de la ville (la ville est vue ici comme un espace « fonctionnel ») et les mesures d'évitement de la surchauffe. Tout le travail de l'aménageur repose sur la recherche permanente d'un compromis acceptable entre les deux.

Les stratégies ont été regroupées en quatre familles : la végétation, les sols, les bâtiments, la chaleur anthropique.

- **La végétation** a une double vertu. Elle crée des ombres et évapore de l'eau prélevée dans le sol. L'eau est donc un vecteur essentiel des mesures de

rafraîchissement. Elle doit être considérée comme une ressource rare, son économie et son cycle sont déterminants dans la résilience de villes ayant à subir des vagues de chaleur de plus en plus extrêmes.

- **Les sols** qui jouent un rôle dans le stockage de l'énergie solaire, mais aussi dans le cycle de l'eau.
- **La question du confort d'été des bâtiments** qui nous invite à nous interroger sur la notion même de performance énergétique et à remettre en cause certaines pratiques courantes encore observées aujourd'hui dans la conception des bâtiments.
- Enfin la **chaleur anthropique** qui nous invite à considérer le déficit de sobriété des usages de l'énergie comme facteur aggravant de l'ICU.

La végétation

Toutes les formes de végétation jouent un rôle dans le rafraîchissement et notamment les formes diffuses : arbres d'alignement, végétation spontanée, murs végétaux, etc. Si les parcs et jardins ont des caractéristiques communes avec certains espaces naturels et sont donc capables de constituer des îlots de fraîcheur en ville, leurs effets climatiques sont restreints et se limitent pour partie à leurs emprises propres.

Arbres

L'arbre permet de rendre deux services climatiques essentiels : la protection solaire et le rafraîchissement par évaporation de l'eau contenue dans le sol. Ces deux mécanismes sont actifs unique-

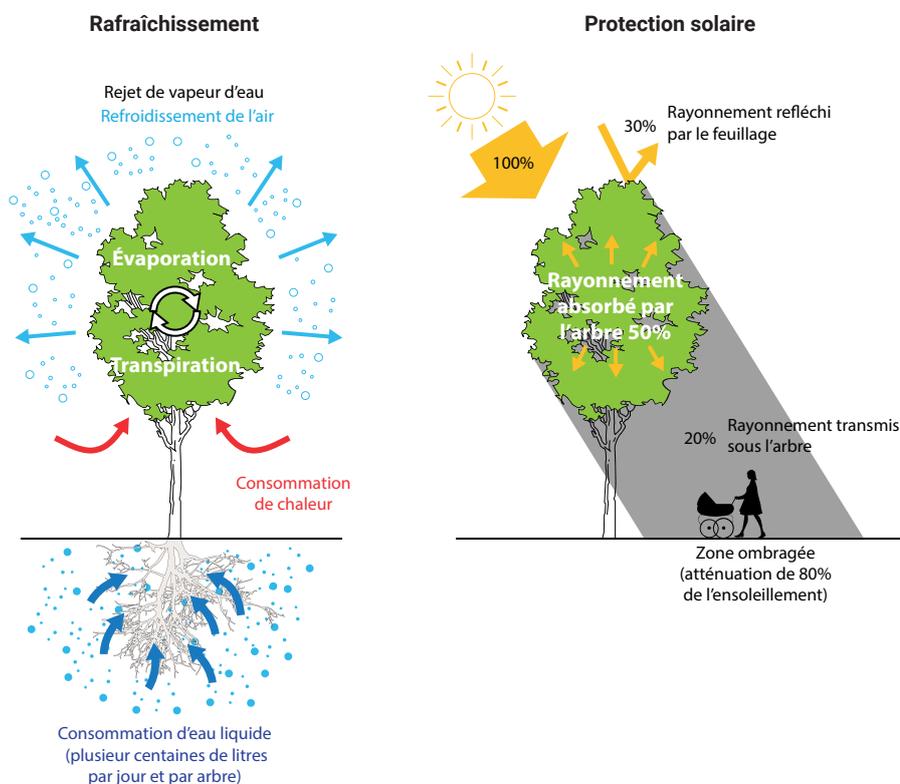
ment le jour mais leurs effets peuvent se ressentir la nuit de manière différée. Par exemple un arbre qui ombrage un revêtement minéral freinera le stockage journalier de l'énergie solaire dans le sol et donc son rayonnement différé la nuit.

Quelles essences d'arbres planter ?

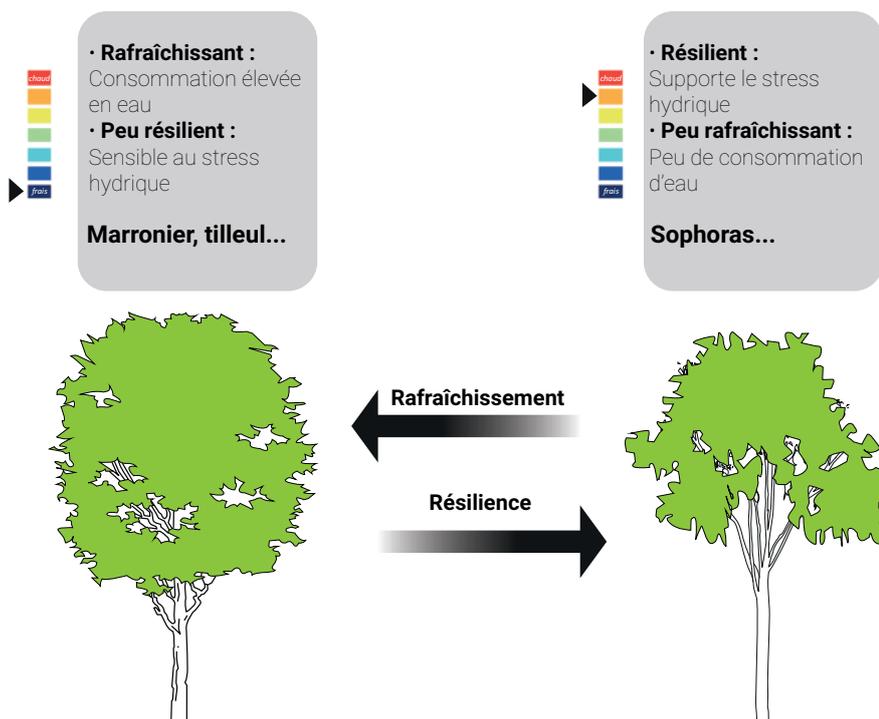
La question principale qui se pose à propos des plantations est de savoir sur quelles essences porter son choix.

- **La morphologie** : C'est la taille du houppier et la densité de feuillage qui permettent à l'arbre de prodiguer des ombres amples. Ainsi sont intéressants les arbres à grand développement qui ont de fortes densités de feuillage.
- **La consommation d'eau** : Pour rester efficace en période de canicule, l'arbre

EFFET MICROCLIMATIQUE DE L'ARBRE



ARBRES D'ALIGNEMENT



doit pouvoir supporter des périodes de stress hydrique. Un arbre consommant peu d'eau est généralement robuste au stress hydrique, et donc résilient. Mais un arbre consommant peu d'eau est aussi un arbre qui évaporerait peu et donc ne rafraîchirait pas vraiment l'air ambiant. « **Rafraîchissant** » et « **résilient** » apparaissent donc comme deux caractéristiques antinomiques dans le cas des arbres. Sur ce seul critère de la consommation d'eau, le concepteur devra rechercher un compromis, en excluant les essences trop consommatrices d'eau et celles qui n'en consomment pas du tout.

- **Anticiper le climat futur :** Outre le manque d'eau, le climat du futur est aussi un climat dans lequel d'autres risques apparaissent. Le risque accru de tempêtes, les variations rapides de température sont également des contraintes avec lesquelles les actuels modèles climatiques nous invitent à composer.

© Apur

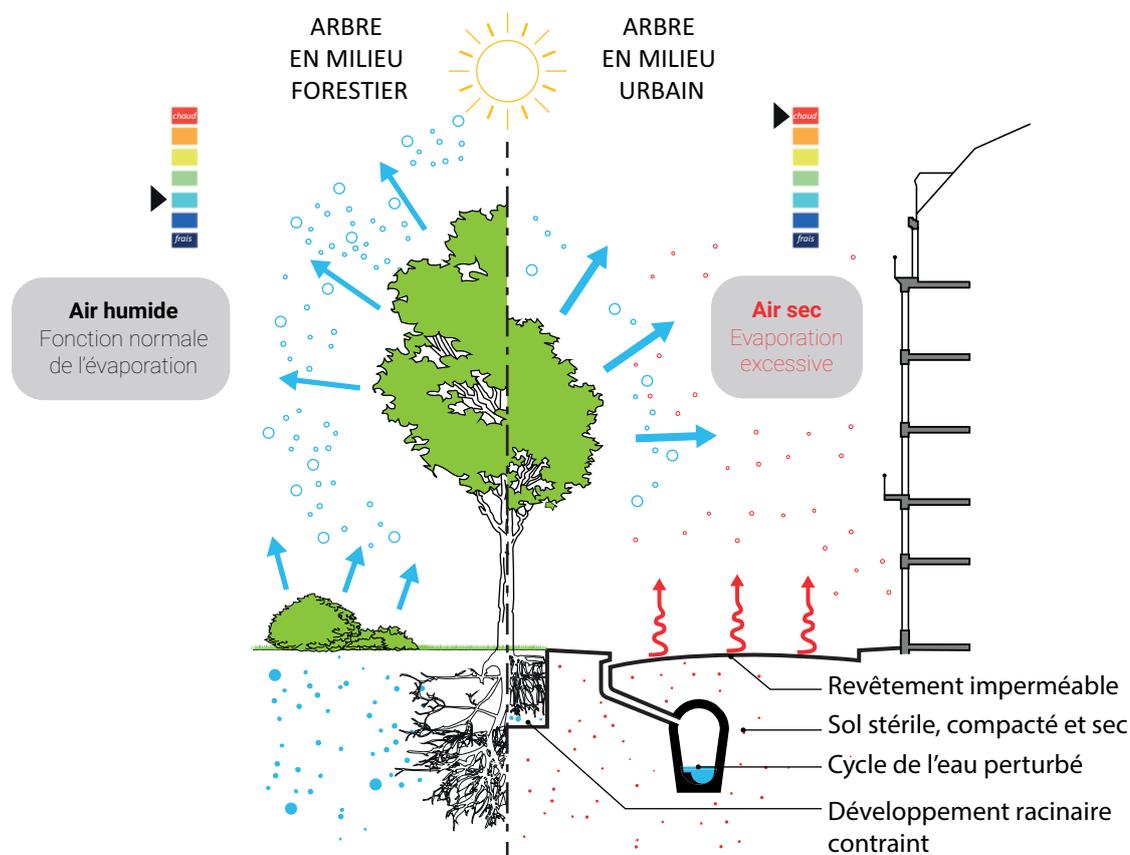
Si les critères de choix sont loin d'être évidents pour définir a priori des essences d'arbres qui apporteraient en ville un service climatique dans la recherche de l'adaptation, il semble utile de tout d'abord **identifier les arbres qui arrivent à s'acclimater d'ores et déjà au milieu urbain**, c'est-à-dire à ne pas trop dépérir tout en assurant le double service de rafraîchissement et d'ombrage. En effet les conditions de subsistance des arbres en ville sont particulièrement rudes, notamment en ce qui concerne les arbres d'alignement. Les arbres qui aujourd'hui arrivent à survivre en milieu urbain font déjà preuve d'exceptionnelles capacités d'adaptation.

Améliorer les conditions de subsistance des arbres en ville notamment les arbres d'alignement

La ville est un milieu contraint : en dehors des fosses de plantation, les racines de l'arbre d'alignement doivent prospérer dans des sols urbains souvent stériles qui proviennent généralement de remblais. À l'inverse des arbustes ou des herbacées, l'arbre en milieu urbain arrive à survivre dans des sols pauvres en sels minéraux et en matières organiques. Les éléments cruciaux à la

© Apur

INCIDENCES DU MICROCLIMAT URBAIN SUR LE DÉVELOPPEMENT DES ARBRES, COMPARAISON AVEC LE MILIEU FORESTIER, D'APRÈS F. FREYTET



© Apur

survie des arbres sont la disponibilité de l'eau et de l'insolation. Au-delà de tous ces critères, les arbres doivent bénéficier d'un sol relativement préservé du compactage. À ce titre les grilles d'arbres traditionnelles parisiennes en fonte offrent un mode de protection du compactage efficace. Cette protection est également bénéfique aux racines qui affleurent au pied de l'arbre et qui sont ainsi mécaniquement protégées.

En ville, l'arbre se comporte de façon très différente par rapport au milieu forestier. L'arbre urbain vit sous contrainte, le développement même des arbres en est l'expression puisque leurs hauteurs sont moindres en ville. L'arbre doit composer avec un sous-sol austère, et doit s'adapter en profitant des fuites des réseaux d'eau ou de vapeur pour trouver les éléments nécessaires à sa survie. Dans le cadre de l'adaptation au changement climatique il semble nécessaire de donner aux arbres encore plus de moyens de faire face à la

contrainte urbaine. Notamment grâce :

- à la **mycorhization** qui consiste à ré-introduire des champignons aptes à la symbiose avec les racines et devrait aider les arbres à mieux collecter l'eau et les sels minéraux du sol, et donc à mieux composer avec un environnement sous contrainte climatique de plus en plus exigeant ;
- au **débitumage des sols entre les arbres d'alignement**. Certaines pratiques de débitumage sont mises en œuvre pour créer des bandes perméables entre les arbres, si ces techniques peuvent être profitables, et notamment si les fosses entre les arbres sont continues sous la surface, il existe des points de vigilance à observer. Les arbres développent un tissu racinaire qui va bien au-delà de la fosse qui leur est réservée lors de la plantation. Ainsi les racines colonisent rapidement des lieux propices à la collecte de l'eau, en particulier juste sous les asphaltes qui sont des lieux chauds et humides. Le

débitumage est dans ce cas une opération délicate puisque le tissu racinaire peut être endommagé. De plus, si la désimperméabilisations entre les arbres procède d'une mise à nu du sol, il peut y avoir une tendance au compactage du sol à la suite du piétinement et in fine à la stérilisation du sol en surface, un sol ainsi mis à nu participerait plutôt à un assèchement du sous-sol et à une difficulté supplémentaire pour l'arbre. Les sols mis à nus entre les arbres doivent donc être protégés du compactage soit grâce à une végétalisation de surface mais qui rend ces espaces inaccessibles au piéton, soit par la mise en œuvre de sols poreux (cf. paragraphe suivant). **Si la création de fosses continues entre les arbres peut s'avérer une bonne idée, le sol entre les arbres ne doit pas être laissé nu ;**

- aux éventuelles plantations aux pieds des arbres d'alignement, à la condition qu'elles participent à la symbiose de l'arbre avec le sol et qu'elles soient protégées du piétinement.

Mixité d'essences dans les alignements d'arbres

Il est traditionnellement admis d'un point de vue paysager que les essences d'arbres doivent être employées à raison d'une espèce par tronçon de voie. De ce

fait, la mixité des essences au sein d'un même tronçon est une pratique peu répandue. Elle est pourtant intéressante du point de vue fonctionnel pour favoriser la biodiversité, pour limiter les risques de propagation des maladies et surtout pour limiter les répercussions d'événements extrêmes comme les inondations, les salages, les pollutions superficielles puisque toutes les essences n'ont pas la même sensibilité à ces événements. En cas d'essences allergisantes, la mixité permet aussi de limiter la concentration de pollens d'une seule espèce.

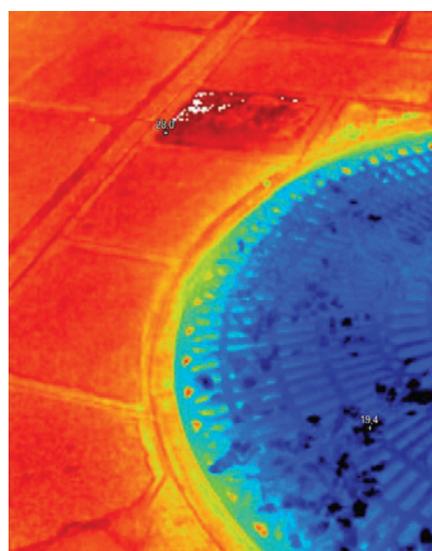
CE QU'IL FAUT RETENIR

Les arbres à grand développement et aux fortes densités de feuillages sont intéressants pour leur capacité à créer de l'ombrage.

Il faut éviter de porter son choix sur des essences d'arbres trop consommatrices d'eau car elles ne supporteront pas le stress hydrique qui accompagne les vagues de chaleur. À l'extrême inverse, il faut éviter les essences qui consomment très peu d'eau car leur plus-value en matière d'évaporation est négligeable.

La condition de vie des arbres en ville doit être améliorée avec l'augmentation de la porosité des sols, de la continuité des fosses et l'instauration de strates de végétation intermédiaires.

RAFRÂCHISSEMENT D'UN PIED D'ARBRE



Quai des Célestins, Paris 4^e.



ALIGNEMENT D'ARBRES



Bande perméable compactée par les piétinements : l'infiltration de l'eau n'est plus assurée.

Murs végétaux

La végétation sur les murs fait partie des solutions climatiques adaptées au bâti. À Paris on dénombre 30 ha de murs végétalisés, ce qui représente une part infime (0,3 %) des surfaces de murs des bâtiments. Ces murs concernent principalement les cœurs d'îlots à 96 %, les 4 % restant sont constitués de murs donnant sur l'espace public. La majorité de cette végétation est constituée de lierres ou de vignes vierges, dont on suppose la croissance spontanée. Les plantes profitent des défauts et des aspérités des sols pour s'enraciner, en général elles se satisfont de surfaces d'ancrage très réduites.

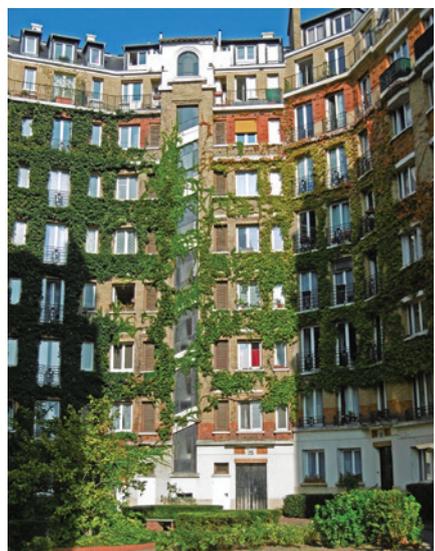
Végétalisation des cours/ des façades sur rue

La végétalisation des façades permet un rafraîchissement efficace de la rue et une protection thermique pour les logements, en particulier dans les étages élevés. Sur rue, la partie basse de la végétalisation verticale interagit directement avec le piéton, ce dernier chemine alors le long d'un mur dont la température est proche de la température ambiante grâce à la régulation thermique

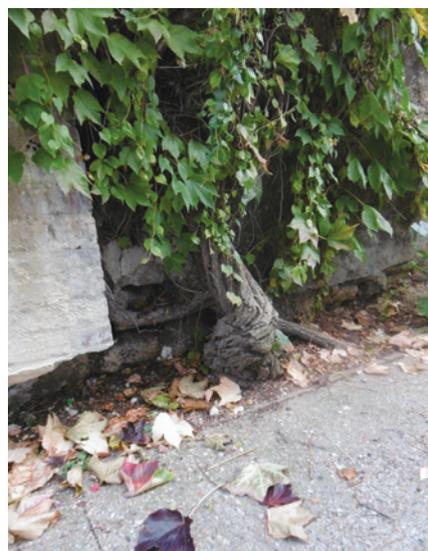
effectuée par la plante en journée. Dans le cas couramment rencontré où la végétation est absente des façades des immeubles, le piéton est contraint de déambuler le long d'un mur chaud irradié directement par le soleil (notamment pour les trottoirs orientés au sud dans les avenues est-ouest). Le piéton est alors exposé à la fois à l'insolation directe, à la chaleur dégagée par le mur irradié, et à la réflexion solaire directement réfléchi par le mur (d'autant plus forte que le mur du bâti est clair).

Lorsqu'une grimpante colonise spontanément la façade d'un bâtiment, les propriétaires ont à choisir entre garder ou couper la plante. L'effet de rafraîchissement est souvent revendiqué par les habitants comme motif pour conserver les plantes grimpantes même si leur entretien génère des coûts. Les aspects bénéfiques ressentis et revendiqués par les habitants sont que les plantes donnent à respirer un air « plus sain, moins sec, et plus frais ». Ces trois appréciations renvoient aux services écologiques rendus par les végétaux qui sont aujourd'hui bien documentés notamment : le piégeage des particules

LES MURS VÉGÉTAUX



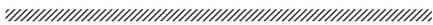
Végétalisation probablement spontanée d'une façade d'HBM.



Pied de vigne d'une cour HBM. Seule une bande de terre de 40 cm suffit pour l'enracinement d'une grimpante capable de coloniser toute une façade.



Démarrage d'une plante grimpante dans une cour suite à l'enlèvement d'un pavé (végétalisation non spontanée).

SYSTÈMES SUR NAPPES – RUE DE L'EST, PARIS 10^e

© Apur - Julien Bigorgne

fines, l'humidification de l'air par évaporation (particulièrement sensible dans les petites cours ou courettes), et sa conséquence en termes de rafraîchissement urbain. La végétalisation sur rue est beaucoup plus rare dans les tissus existants, car les pieds d'immeubles sont presque toujours minéralisés.

Bilan environnemental du mur végétalisé

Si les plantes grimpantes spontanées sont les plus représentées à Paris, il existe des techniques de végétalisation plus ambitieuses (végétalisation sur nappe ou modulaire) qui proposent une plus grande variété d'essences non nécessairement grimpantes au sein du mur. Ces dispositifs sont en général coûteux en entretien et leur bilan écologique doit être étudié précisément car trop souvent défavorable étant donné les contraintes d'alimentation en eau et en nutriments. La question de la résilience est également posée par ces

nouveaux dispositifs puisque les végétaux qui s'y développent sont généralement moins résistants aux périodes de sécheresse.

Lorsqu'un aménageur a le choix des modes de végétalisation de la façade d'un bâtiment, il est donc recommandé de se tourner vers des plantes grimpantes en pleine terre. Les plantes en pleine terre ont de bien meilleures capacités de résilience que les plantes en bac, elles supportent beaucoup mieux le stress hydrique. Si la vigne vierge et le lierre sont très employés du fait de leur très bonne adéquation avec le bâti, il peut être intéressant d'introduire une mixité d'essences au sein d'un même mur en misant sur des essences qui ont de fortes capacités évaporatives comme le houblon. Cette stratégie possède un risque qui est celui de voir la plante dépérir en cas de sécheresse, mais elle n'est pas réellement pénalisante tant que la mixité d'essence est employée.

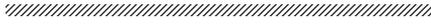
CE QU'IL FAUT RETENIR

La végétalisation verticale permet d'assurer le rafraîchissement par évaporation dans des espaces urbains tels, les cours, courettes et même les rues. Elle apporte également du rafraîchissement pour les logements, notamment ceux des étages élevés.

La vigne et le lierre, qui sont des plantes spontanées parmi les plus représentées à Paris, sont très adaptées au milieu urbain, elles ne nécessitent presque pas de surface pour s'implanter en pleine terre

Les murs modulaires ou sur nappe nécessitent des irrigations en nutriments et en eau pour subsister. Ces dispositifs s'avèrent coûteux en énergie et encore trop peu résilients.

HERBACÉES ÉMERGEANT DANS LES ANFRACTUOSITÉS DES SOLS URBAINS



Rue Dupaty, Bordeaux.

© Apur - Julien Bigorgne



Rue Ella Fitzgerald, Pantin.

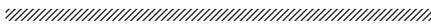
© Apur - Julien Bigorgne



Rue Compans, Paris 19e.

© Apur - Julien Bigorgne

VIGNE AYANT COLONISÉ UNE FAÇADE SUR RUE ET UN CŒUR D'ÎLOT – RUE BELZUNCE, PARIS 10e



© 2019 Google



© 2019 Google

CE QU'IL FAUT RETENIR

Alors qu'elle participe au rafraîchissement des villes, la végétation spontanée est encore trop souvent perçue comme nuisible et inesthétique. Les politiques d'entretien des villes et de gestion des copropriétés doivent évoluer pour prendre en compte ce potentiel.

Végétation interstitielle spontanée

La végétation interstitielle et spontanée est cette végétation qui est non prévue, qui émerge dans les défauts, les aspérités, les recoins. Elle est historiquement considérée comme symptomatique d'une ville sale, elle incarne le manque d'entretien. Son émergence est anarchique et rompt avec l'ordre paysager des villes dans lequel le végétal est assigné à résidence : plantations d'alignement, jardinières, espaces verts, etc.

Au-delà de ces considérations qui renvoient à la perception hygiéniste de la ville, l'émergence d'une flore spontanée montre les qualités d'adaptation de certaines essences au milieu urbain. Certaines essences, souvent invasives, arrivent à profiter de très peu pour émerger. Parfois un simple défaut dans un revêtement en asphalte qui occasionne une légère perméabilité à l'eau suffit. Dans le cas des plantes grimpantes, quelques centimètres carrés suffisent à la colonisation d'une façade entière.

Toutes ces formes de végétation sont intéressantes car leur émergence dénote une adaptation à des conditions

microclimatiques très contraintes. Leur présence actuelle nous amène à nous interroger sur les pratiques urbaines d'entretiens de l'espace public qui considèrent trop souvent les plantes spontanées comme indésirables.

Le phénomène de l'ICU incite les aménageurs à se questionner sur les mesures à mettre en œuvre pour faire face à la surchauffe estivale des villes. Le caractère totalement imprévisible du changement climatique et les capacités d'adaptation de la nature en ville nous invitent à ne pas policer l'espace urbain dans son entièreté, à laisser à la biodiversité urbaine des opportunités d'émergence sans à priori, c'est-à-dire sans volonté de planification. Il s'agit ainsi de laisser une place à l'aléatoire et au hasard car la biodiversité qui émerge là où on ne l'attend pas révèle des conditions suffisantes pour qu'un service écologique de rafraîchissement même infime puisse avoir lieu. Libre à l'aménageur dans la phase de conception et aux villes dans leur politiques de gestion de donner une place à cette forme de diversité généralement inattendue.

Jardins, végétation en cœur d'îlot

Les jardins et les cœurs d'îlots se prêtent à une végétalisation beaucoup moins subordonnée aux contraintes d'usages telles qu'on les rencontre sur les chaussées et les trottoirs de l'espace public. En matière de rafraîchissement, l'optimum climatique est l'écosystème forestier avec ses multiples strates. C'est cet écosystème qui recycle le mieux l'eau de pluie et qui résiste le mieux au stress hydrique.

La qualité des sols joue un rôle très important dans le service écologique de rafraîchissement et de recyclage de l'eau. C'est bien le caractère « vivant » du sol qui permet aux services écologiques de

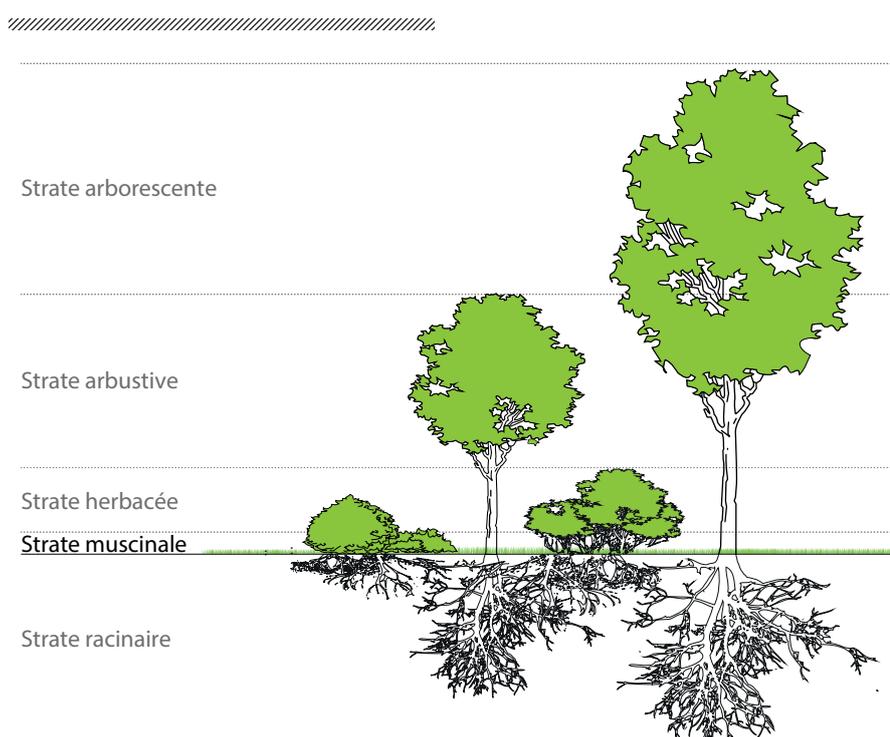
jouer leur rôle ⁵. Ce caractère se rencontre quand les sols sont peu compactés, riches en matière organique, et lorsque des interactions existent entre espèces végétales et animales. Avec de tels sols, l'eau de ruissellement est très bien recyclée par l'écosystème, la part d'infiltration est réduite à son minimum, et la pollution de l'eau est idéalement filtrée par le sol. À l'inverse quand l'infiltration s'effectue de façon plus directe (puits ou tranchées d'infiltration) dans un sol de remblai sans qualité écologique, les volumes infiltrés ne servent aucun cycle écologique, n'humidifient que trop ponctuellement le sol sous la surface, et l'eau infiltrée ne bénéficie pas d'une épuration phytosanitaire.

CE QU'IL FAUT RETENIR

Les jardins et les cœurs d'îlot se prêtent à une végétalisation particulièrement efficace du point de vue climatique. Pour cela, il est utile :

- de produire des sols possédant des qualités biologiques ;
- de gérer les implantations des constructions en minimisant les emprises bâties au sol ;
- de créer des jardins susceptibles d'accueillir toutes les strates végétales, ce qui implique de penser l'implantation des bâtiments pour créer des espaces libres suffisamment vastes.

ÉCOSYSTÈME FORESTIER - MODÈLE À REPRODUIRE EN CŒUR D'ÎLOT



Echelle qualitative du confort thermique



5 - Aujourd'hui le service écologique des sols riches en biodiversité n'est pas valorisé d'un point de vue réglementaire. Dans les Plans Locaux d'Urbanisme une surface minimum de pleine terre est souvent exigée comme garante de la qualité écologique des espaces. Mais dans sa définition actuelle, la « pleine terre » correspond à un sous-sol qui ne serait pas occupé par un ouvrage souterrain (tel un parking) gênant l'infiltration dans la nappe. Dans un tel cadre, un sol totalement imperméabilisé en surface et fait de remblai en profondeur peut répondre à la définition de la pleine terre. Il est aisé d'imaginer que de simples jardins sur dalles pourraient rendre des services écologiques bien meilleurs.

© Apur

Les revêtements de sol

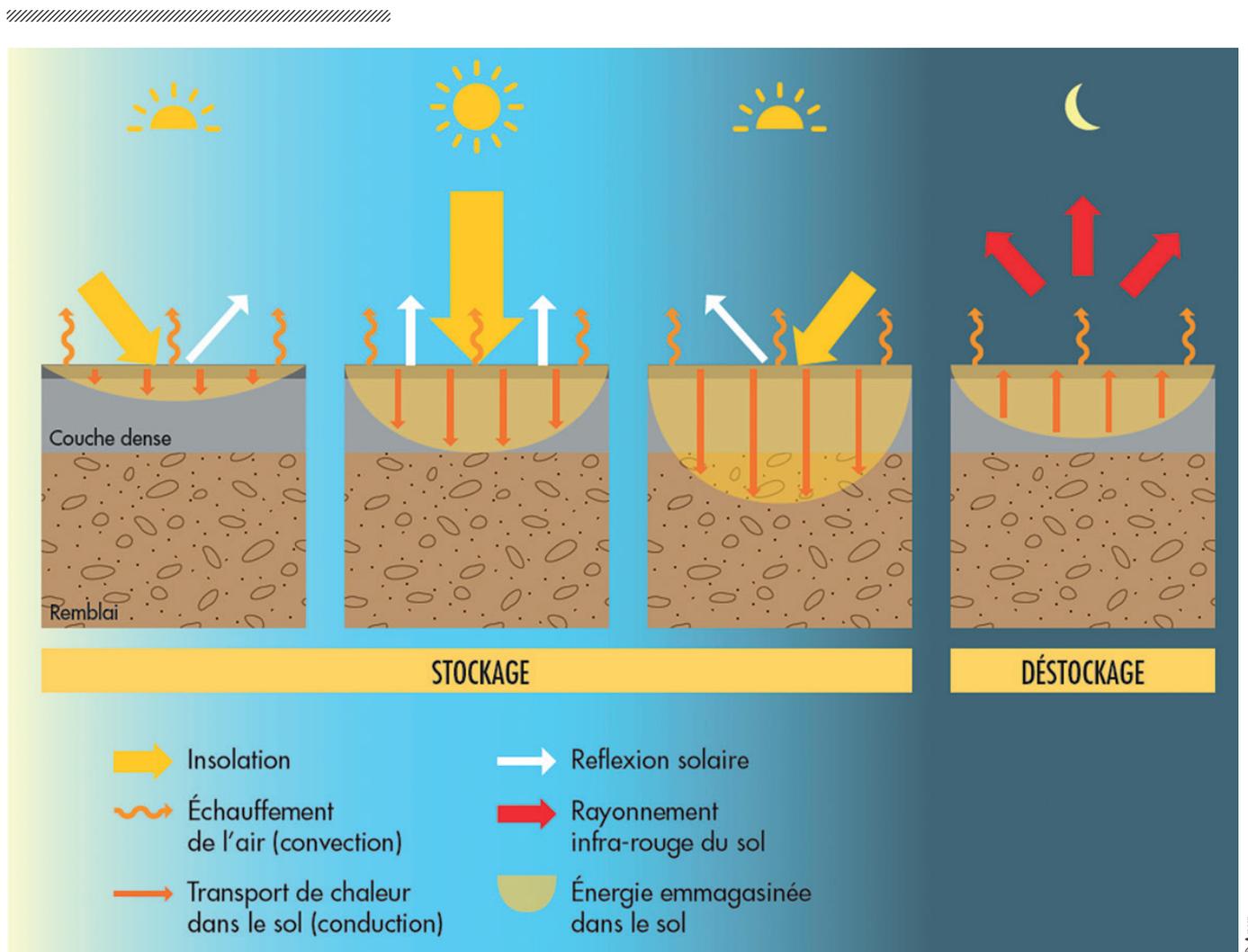
La nature des revêtements de sols est déterminante dans l'expression du phénomène d'ICU. L'usage de revêtements minéraux (comme les granits) ou à base de liants (comme les asphaltes ou bitumes) participe de façon essentielle à la formation des ICU. En journée, la couche superficielle se comporte comme un capteur solaire qui transmet efficacement l'énergie solaire dans les sous-couches qui stockent l'énergie et la restituent quand le refroidissement nocturne est amorcé. Ces types de sols jouent un double rôle : celui de résister aux sollicitations mécaniques des usages de l'es-

pace public (véhicules, poussettes, vélo, piétons, etc.) et d'imperméabiliser les sols afin de rediriger les eaux de surface dans les réseaux d'égouts.

Poser la question de la modération des ICU revient dans le même temps à poser les questions :

- De l'évolution des usages de l'espace public dans un contexte d'évolution de la mobilité ;
- De la désimperméabilisation dans un contexte où l'infiltration des eaux pluviales doit être favorisée pour soulager les réseaux existants.

CYCLE DE STOCKAGE ET DÉSTOCKAGE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE PAR LES REVÊTEMENT DE SOL



Faut-il choisir des matériaux clairs ?

Dans les débats actuels sur l'adaptation des villes, l'albédo⁶ est exagérément porté comme enjeu majeur de la conception. La clarté de matériaux est souvent invoquée comme un bienfait dans la lutte contre les ICU. Dans la pratique la validité de cet a priori dépend surtout des attentes en matière d'usage. Les matériaux clairs ont la capacité de réfléchir le rayonnement solaire, ce qui bien sûr préserve les couches profondes de la transmission de chaleur et de son éventuel stockage, le confort nocturne est dans ce cas plutôt préservé. Néanmoins les désagréments des matériaux clairs se ressentent en journée : éblouissement, inconfort thermique. Une trop grande clarté du sol rend l'es-

pace public presque invivable en journée pour les piétons, et pour les jeunes arbres il existe des risques de brûlures (« échaudures »). Un espace public qui aura pour vocation un usage diurne et nocturne, ce qui est généralement le cas, incitera le concepteur au compromis, à simplement éviter les teintes trop sombres ou trop claires et à ne pas faire de l'albédo⁴, l'enjeu principal de la conception climatique. De plus, la sollicitation des modes de déplacements (piéton, voitures, vélo, etc.) a un impact colorimétrique sur les teintes des revêtements de sol. Toutes les teintes ont tendance à évoluer au fil du temps avec l'usage, et tendent à s'homogénéiser. Ainsi les teintes foncées s'éclaircissent avec le temps et les teintes claires s'assombrissent.

6 - L'albédo est le facteur de réflexion de l'insolation, il est proche de 1 pour les matériaux clairs et proche de 0 pour les matériaux sombres.

REVÊTEMENT DES SOLS, LA QUESTION DE L'ALBÉDO



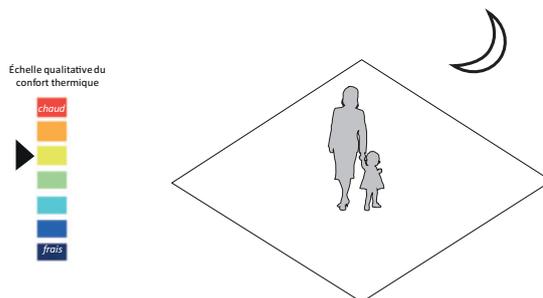
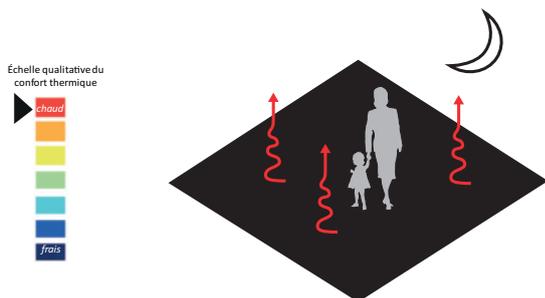
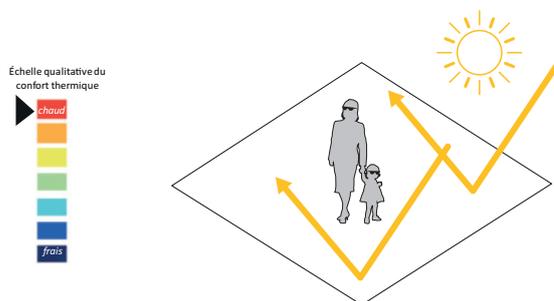
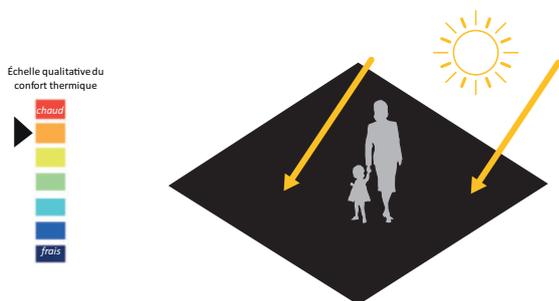
Sols sombres

- **Bon en journée :** peu de réflexion solaire
- **Mauvais la nuit :** déstockage de l'énergie emmagasinée



Sols clairs

- **Mauvais en journée :** éblouissement, sensation de chaleur exacerbée
- **Bon la nuit :** peu d'énergie emmagasinée le jour





Création d'un sol non compactable à l'aide d'un mélange terre/pierre avant recouvrement par un sol en béton poreux, Aubervilliers.
Projet de Tierce Forêt, MOE : Fieldworks.



Exemple de sol poreux (15 % de vide) après désactivation.

Porosité

La porosité des sols est un critère essentiel du fonctionnement climatique des sols pour le concepteur. La porosité c'est la quantité de « vides » au sein du matériau. Ces « vides » ou pores sont occupés par de l'air. Plus le matériau est poreux et moins le matériau a une capacité à transmettre et stocker la chaleur. Un exemple qui illustre bien cette caractéristique est le sable en bord de mer. En pleine journée, quelqu'un qui marche pieds nus sur du sable sec et ensoleillé a la sensation d'un sol chaud voire brûlant. En revanche dès que le soleil se couche, le sable devient instantanément froid. La raison est que le sable est essentiellement fait de vides d'air, la chaleur n'est ni transmise ni stockée. **La question de l'albédo est une question secondaire ici, c'est la porosité qui commande principalement la physique du phénomène.**

Dans la ville existante, il existe des phénomènes analogues à ce qui vient d'être décrit :

- une toiture engravillonnée est un exemple de couche poreuse, son stockage de chaleur est nul, la nuit la toiture est fraîche dès le coucher du soleil ;
- une allée de jardin en stabilisée est également poreuse (uniquement en surface), elle est immédiatement fraîche au coucher du soleil.

Outre la plus-value thermique des sols poreux, le second intérêt de ces sols réside dans leur capacité à infiltrer efficacement l'eau de pluie, il faut pour cela que la couche poreuse soit épaisse, par exemple de quelques centimètres. Les revêtements étanches comme les bitumes ou les asphaltes rejettent directement l'eau de ruissellement à l'égout. Les sols poreux quant à eux permettent l'infiltration. Cette infiltration est bénéfique dans la logique d'une meilleure gestion des eaux pluviales puisqu'elle permet d'éviter le rejet à l'égout, mais aussi parce que l'eau infiltrée permet une humification durable du sol en pro-

fondeur qui servira à l'évapotranspiration des arbres et donc au rafraîchissement de l'air ambiant.

Les sols poreux, par exemple les bétons poreux, sont bien sûr conciliables avec des arbres d'alignement. La porosité traite le problème du manque d'eau dans les sols urbains due à l'étanchéification quasi systématique des espaces publics qui met artificiellement les arbres en stress hydrique. En dessous de la couche poreuse, il est utile d'employer une matière hétérogène non compactable pour tenter de donner au sol urbain une qualité biologique plus profitable que les remblais stériles rencontrés habituellement en ville. On peut par exemple employer pour cette couche hétérogène un mé-

lange de terre et de pierre agrémenté de compost. La pierre peut être aussi remplacée par des déchets de déconstruction comme des résidus de blocs de béton.

Les bétons poreux ont un inconvénient qui est leur faible résistance mécanique à la sollicitation des véhicules motorisés. Les bétons poreux sont à cet égard réservés aux trottoirs et aux voiries empruntées occasionnellement par des poids lourds ou véhicules pompiers.

Les évolutions des mobilités impliquent des évolutions des revêtements et de leurs sous-couches. Ces évolutions permettent une meilleure porosité des sols et une diminution des effets d'ICU.

CE QU'IL FAUT RETENIR

- l'albédo est une question secondaire;
- la composition du sol est le premier critère important du point de vue climatique. Lorsqu'elle est compatible avec les futurs usages de l'espace public, une certaine porosité est bénéfique;
- allié à un sol poreux, un sous-sol non compactable comportant des matières organiques est apte à redonner une qualité écologique aux sols urbains ordinaires ce qui aura des conséquences bénéfiques sur le microclimat urbain en réactivant le cycle de l'eau.

ÉVOLUTION DES REVÊTEMENTS DE SOLS EN IMPERMÉABLES



Trottoir asphalte, chaussée bitume

- Participent aux ICU

(stockage/déstockage de l'énergie solaire)

- Pas d'infiltration de l'eau

- Compatible avec la circulation automobile

(selon le dimensionnement de la sous-couche)

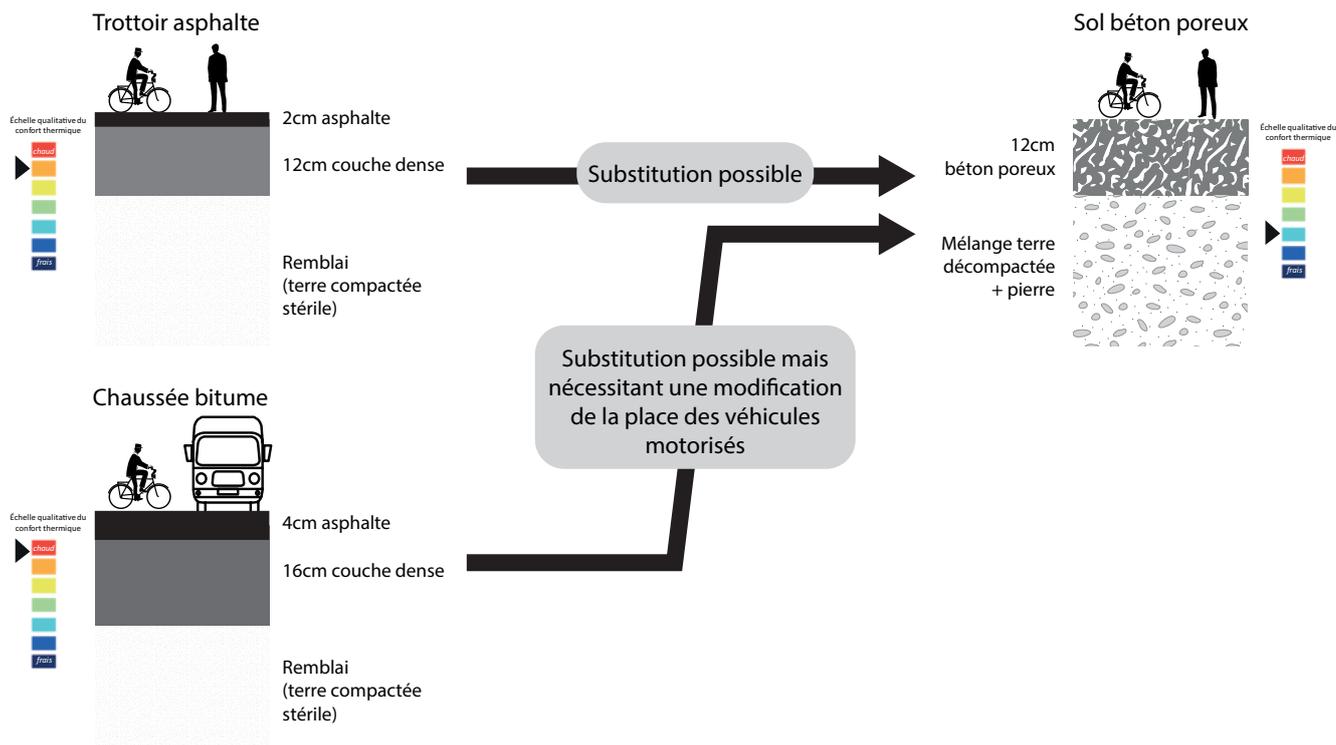
Sol en béton poreux

- Bons pour la lutte contre les ICU

(pas de stockage/déstockage de l'énergie solaire)

- Capacité d'infiltration de l'eau

- Incompatible avec la circulation automobile



L'arrosage

Arrosage des sols

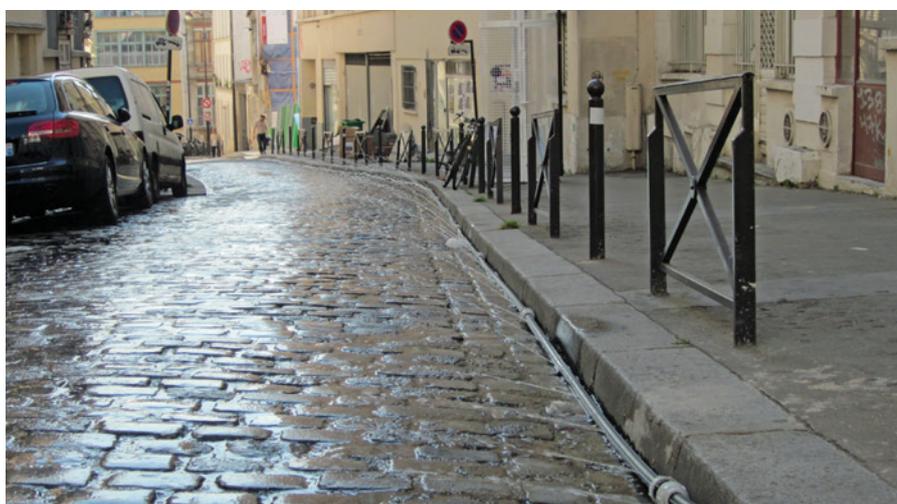
S'il est climatiquement intéressant d'utiliser des matériaux de sols perméables, il existe des situations où la sollicitation des espaces urbains est tellement forte qu'il est presque impossible de se passer de revêtements imperméables. Il s'agit des lieux à la fréquentation très élevée comme les parvis de gare, les places, mais aussi les chaussées très empruntées par des véhicules motorisés. Ces matériaux de sols imperméables sont problématiques au regard du climat. S'ils sont ensoleillés, ils chauffent en journée et restituent la chaleur la nuit. Une solution possible pour éviter cette surchauffe est de les arroser lorsqu'ils sont en plein soleil. La projection de l'eau sur une surface chaude entraîne une baisse très rapide de la température de l'air ambiant car l'eau projetée est généralement fraîche puisqu'elle provient du réseau mais aussi grâce au phénomène d'évaporation.

L'arrosage direct de surfaces à des fins d'évaporation est **une technique très consommatrice d'eau car l'évaporation se fait de façon directe**. Cette technique s'oppose à l'évaporation via les arbres qui est, elle, indirecte, et qui repose sur une bonne gestion du cycle de l'eau tout au long de l'année permet-

tant l'humidification des sols en profondeur et permettant aux arbres d'évaporer en été quand il fait chaud. Dans ce cas, ce sont les arbres qui évaporent en fonction de leurs besoins ce qui rend le mécanisme d'évaporation optimal du point de vue de la gestion de la ressource en eau.

L'arrosage direct de surfaces imperméables doit si possible se baser sur des solutions d'arrosage intégrées aux revêtements de sol. L'arrosage via des bennes de lavage est évidemment à proscrire pour deux raisons principales : le moteur de la benne participe à l'échauffement de l'air ambiant ce qui est paradoxal lorsqu'on emploie une benne afin de rafraîchir l'espace public, de plus il est très compliqué de contrôler les débits d'eau projetés ce qui signifie que les surplus d'eau partent à l'égout sans avoir été évaporés.

L'arrosage direct permet de créer temporairement des lieux frais ou « îlots de fraîcheur » lors d'épisodes particulièrement chauds. Cette solution est ultra-consommatrice d'eau ce qui ne la rend pas applicable à l'intégralité d'une ville en période de canicule. Il convient donc de choisir les lieux et les moments où cette mesure va être activée de façon exceptionnelle. De façon prospective on peut imaginer que des stations météo implantées sur le territoire pourraient permettre de suivre en temps réel une canicule et permettre le déclenchement de solutions d'arrosage aux lieux et moments opportuns. Le jour on peut penser à des zones très exposées comme les parvis, et la nuit on pourrait arroser de cette façon les rues les plus propices à l'évaporation comme par exemple celles parcourues par des vents légers (« brises thermiques ») qui seraient identifiés via les stations météo déployées dans les rues. Ces vents sont intéressants, car cumulés à un arrosage



© Apur - Julien Bigorgne

Rue Lesage, Paris 20^e : exemple d'expérimentation d'arrosage climatique d'une chaussée pavée imperméable. Le dispositif testé emploie un tuyau percé le long des caniveaux, il permet d'éviter le recourt aux bennes le lavage pour la projection de l'eau.

du sol, ils sont capables d'exacerber la sensation de fraîcheur. De telles rues pourraient ainsi être connues des habitants d'une ville via les panneaux d'informations municipaux numériques, qui peuvent rendre compte en temps réel des mesures ponctuelles de rafraîchissement. Un premier préalable est la connaissance des températures d'une ville en temps réel avec le déploiement de stations météo sur l'espace public par exemple en association avec des mobiliers urbains.

L'autre difficulté posée par l'arrosage climatique est la consommation d'eau qui est une ressource précieuse; en période de crise cela suppose que le niveau général de sécheresse permette encore l'arrosage. Afin d'économiser au mieux la ressource, il est utile de baser cet arrosage sur de l'eau non potable qui est une eau moins transformée et donc moins précieuse que l'eau potable. Certaines villes, comme Paris, possèdent des réseaux d'eau non potable qu'il convient de valoriser et d'entretenir pour développer les usages climatiques de l'eau. Notons que, lorsque ces réseaux existent encore, il est courant de constater que les copropriétés ne sont plus clientes du réseau alors qu'elles l'étaient toutes avant-guerre, à une époque où le réseau était en parfait état de fonctionnement et dans un contexte où la ressource en eau était vécue comme précieuse. Aujourd'hui, le réseau d'eau non potable devrait à nouveau apporter des solutions climatiques à l'attention des copropriétés: tant pour l'arrosage à des fins d'évaporation en été que pour le nettoyage des sols ou l'irrigation des végétaux tout au long de l'année.



Brumisateurs à Paris Plage

© Apur - Emmanuel Pinard

Brumisateurs

La brumisation est également une solution employable pour le rafraîchissement. Elle a l'avantage de mettre les individus au cœur même du processus d'évaporation et donc la sensation de fraîcheur est particulièrement prononcée. Néanmoins la brumisation suppose un usage exclusif d'eau potable pour des raisons sanitaires, ce qui bien sûr pose la question de l'usage d'une ressource précieuse et potentiellement limitée en période de stress hydrique.

CE QU'IL FAUT RETENIR

L'arrosage direct des sols imperméables peut permettre ponctuellement de rafraîchir une série de lieux préalablement choisis.

Cette mesure est coûteuse en ressource, elle doit donc cibler un petit nombre de lieux et à des moments précis. À cet égard le déploiement de stations météo dans la ville peut permettre l'activation de telles mesures d'arrosage.

Afin d'économiser la ressource en eau, l'eau nécessaire à l'arrosage devrait provenir d'un réseau d'eau non potable s'il existe sur le territoire.

La brumisation peut être employée comme mesure ponctuelle de rafraîchissement, elle est très consommatrice d'eau potable.

L'entretien, la bonne gestion et l'augmentation des fontaines et bassins sur l'espace public jouent également un rôle de rafraîchissement dans la ville.

Le confort d'été dans les bâtiments

Parallèlement aux notions de confort thermique des espaces extérieurs précédemment développées, le concepteur doit également s'interroger sur la question du confort des espaces intérieurs aux bâtiments. La **qualité de conception des bâtiments** aura des répercussions sur le confort intérieur des locaux (en été et en hiver), sur les consommations d'énergie nécessaires au maintien des températures acceptables pour les occupants, mais aussi sur le confort thermique ressenti sur les espaces extérieurs jouxtant le bâtiment, notamment si le bâtiment occasionne des réflexions solaires et si le bâtiment rejette de la chaleur car climatisé.

Bâtiments neufs

Appliquer le bio climatisme à la construction neuve

Le confort d'été est une notion très mal prise en compte dans la conception des bâtiments neufs. La réglementation thermique actuelle, comme toutes ses prédécessrices, n'inclut pas ou peu le confort d'été. La conséquence est que les bâtiments neufs sont pensés pour le confort d'hiver et peuvent se révéler mal adaptés au confort d'été et aux épisodes de canicules.

En vigueur depuis les années 2000, les labellisations « basse consommation » ont poussé les concepteurs à abonder dans le sens de la « performance » avec de forts niveaux d'isolation, d'étanchéification de l'enveloppe avec des débits de ventilation faibles et une profusion d'équipements technologiques parfois mal maîtrisés. On a ainsi vu apparaître une série de bâtiments soi-disant « performants » qui se sont révélés être très fragiles en été. De nombreux retours d'expérience existent aujourd'hui, et la sensibilité des bâtiments récents à la surchauffe est connue. Les principales raisons relevées sont : une incapacité du bâtiment à gérer les apports solaires et une incapacité à évacuer la chaleur

accumulée provenant des usages intérieurs au bâtiment.

Il est possible d'énumérer quelques principes basiques de conception estivale et pourtant encore peu respectés :

- Les protections solaires doivent permettre une occultation parfaite du rayonnement solaire. **Les protections solaires doivent impérativement être extérieures.** Aujourd'hui trop de projets sont encore conçus avec des protections solaires intérieures pour des raisons esthétiques. Ce parti pris architectural qui condamne catégoriquement le confort intérieur des locaux est inconséquent bien que rendu possible par la réglementation thermique. La question des protections solaires est tout à fait élémentaire dans la conception bioclimatique, et il est regrettable de voir des projets très aboutis dans l'intégration des matériaux biosourcés ou des énergies renouvelables continuer à proposer des protections intérieures qui obligeront les occupants à vivre dans l'inconfort et à climatiser in fine.
- Ne pas employer de matériaux réfléchissants. **Les façades des bâtiments ne doivent pas être réfléchissantes.** La réflexion solaire crée de l'éblouissement pour les usagers de l'espace public, aggrave le confort thermique des piétons (comme quand les revêtements de sol sont clairs). Ces désagréments se constatent aussi sur les bâtiments environnants qui subissent les réflexions solaires induites par des bâtiments voisins trop réfléchissants. Notons qu'aucune façade de bâtiment ne devrait comporter de matériaux réfléchissants, y compris les façades nord. En été, même les façades nord sont sujettes à insolation (par le nord-est le matin et le nord-ouest le soir).
- La ventilation mécanique (simple ou double flux) ne peut se substituer à un travail du concepteur sur l'aération des locaux qui elle-même relève de choix morphologiques sur le bâti.

La technologie a eu sur ce point un effet désastreux, elle a relégué au statut de question annexe la question de la ventilation naturelle du bâti. Or, **en été, c'est bien la ventilation naturelle qui est le premier mode de rafraîchissement du bâti**. La double exposition permet une ventilation par tirage thermique naturel. L'usage de courettes et de puits de lumière dans des typologies épaisses ou contraintes permet également une ventilation par tirage thermique naturel. Si des solutions actives de rafraîchissement comme la climatisation devront peut-être être instaurées à l'avenir lors des pics de canicule, la climatisation ne doit pas devenir la règle dans l'habitat, surtout si elle est consécutive d'une méconnaissance en termes de conception estivale du bâti.

En conséquence on peut noter que les bâtiments présentant des façades entièrement vitrées sans ouvrants sont des non-sens climatiques. Ces bâtiments, outre leur impact énergétique, sont non résilients. La moindre coupure d'électricité les rend immédiatement insalubres puisque, sans renouvellement d'air et dépourvus d'ouvrants, de tels bâtiments ne peuvent se ventiler. Ces bâtiments sont inadaptables, dans un monde où justement il est nécessaire d'anticiper l'adaptation

La neutralité carbone, un changement de paradigme des bâtiments (et en particulier dans l'habitat)

Les déboires récents face aux surchauffes estivales sont dus à la fois à la non-application des quelques principes de base du bio climatisme (rappelés succinctement ci-dessus) mais aussi à une philosophie de la construction beaucoup trop performancielle et trop peu résiliente. La normalisation et la réglementation se basent sur la seule performance thermique. C'est généralement l'indicateur en « kWh/m²/an » qui guide la conception. Cette logique a conduit à orienter le monde du bâtiment vers



Bâtiment recevant la réflexion solaire d'un IGH paré de vitres sans tain - Bagnolet

© Apur - Julien Bigorgne

des matériaux de synthèse (comme les polystyrènes ou les laines minérales) ou vers des solutions techniques sophistiquées comme la ventilation double flux. Alliée à l'usage du béton armé toute cette ingénierie du bâtiment a produit des bâtiments « ultra-performants ». Les retours d'expérience nous montrent que ces bâtiments sont fragiles, dès que les usagers n'utilisent pas les bâtiments au mieux (ou du moins tels que les ingénieurs les ont pensés), les dérives énergétiques sont rapides. En fait ces bâtiments se révèlent peu adaptés aux dérives d'usages, mais surtout peu adaptables à un monde qui climatique-

CE QU'IL FAUT RETENIR

Dans la conception des bâtiments neufs, pour faire face aux canicules sans débauche énergétique, il est nécessaire d'adopter quelques principes de bio climatisme avec notamment :

- un travail sur la ventilation naturelle via la forme bâtie;
- l'utilisation exclusive de protections solaires extérieures;
- l'abandon de la conception de façades 100 % vitrées..

Des solutions actives de rafraîchissement doivent être étudiées tels les puits canadiens, et autres dispositifs permettant d'éviter un recours à la climatisation dans les années à venir.

ment change. Le bâti « performant » est la réponse technique la plus appréciée au monde tel qu'il est aujourd'hui, mais le problème c'est que ce monde a un climat qui change et on ne sait pas comment. **Le bâtiment neuf doit être adaptable plutôt que performant.** Ces bâtiments doivent pouvoir encaisser des vagues de chaleur, des coupures de courant tout en restant vivables. Tout ceci nous invite à nous réinterroger sur la façon conventionnelle de faire des bâtiments. Les exigences de neutralité carbone qui sont requises depuis peu mettent à mal les concepts de la construction telle que pratiquée aujourd'hui et issue des 30 glorieuses.

L'idée ancienne selon laquelle la qualité de l'habitat serait un problème à 1 paramètre, celui de la performance technique mesurée en kWh/m²/an, est remise en question par l'exercice de la comptabilité carbone dans la construction. Dans ce contexte, la conception bioclimatique a tout son rôle à jouer, les matériaux biosourcés comme par exemple le bois pour les structures et le chanvre pour l'isolation apportent des réponses concrètes aux enjeux climatiques, et sont parmi les seules solutions à proposer des bilans carbonés acceptables. La conception bas carbone n'est pas une simple substitution entre matériaux, ce n'est pas juste le remplacement du béton par du bois ou des laines synthétiques par du chanvre. Il s'agit d'un changement de paradigme qui suppose de repenser complètement la philosophie du bâtiment, qui suppose de se dégager de l'idée reçue selon laquelle toujours plus de technologie embarquée dans le bâtiment est à même de résoudre la question du climat. Le bâtiment décarboné du futur est vrai-

semblablement aux antipodes de tout cela, et la recherche de frugalité dans le secteur du bâtiment pose d'ores et déjà la contradiction portée par la réglementation du bâtiment qui est que la seule exigence d'une performance en kWh/m²/an est incompatible avec la production de bâtiments neutres en carbone.

Faut-il rafraîchir les bâtiments neufs ?

Si les bâtiments neufs doivent être conçus pour limiter l'impact des vagues de chaleur sur la qualité de l'habitat : stores extérieures, possibilité offerte aux habitants de ventiler naturellement, etc. Il est également intéressant dès la construction d'intégrer des solutions de rafraîchissement qui permettront au bâtiment de faire face aux épisodes de fortes chaleurs. Pour cela il existe des solutions multiples, notamment en utilisant la fraîcheur du sous-sol grâce aux puits canadien ou à la géothermie. À l'inverse d'une pompe à chaleur classique qui rejette de l'air chaud sur les espaces extérieurs, le puits canadien, par exemple, permet d'emmagasiner dans le sol la chaleur estivale sans aggravation de l'ICU. Ces solutions de rafraîchissement ne sont pas systématiquement mises en œuvre sur le bâti neuf, car non contraintes d'un point de vue réglementaire. Les scénarios actuels sur les effets du changement climatique laissent penser que les solutions traditionnelles de rafraîchissement passives seront insuffisantes lors des canicules du futur. Il semble opportun aujourd'hui d'anticiper ces questions de surchauffe en prévoyant des systèmes actifs tels les puits canadiens lorsque les conditions techniques des projets le permettent.

Bâtiments existants

La question estivale dans le bâti existant

Dans le bâti existant la question estivale se pose de façon très différente selon les époques de construction. Dans les bâtiments d'avant 1945, on retrouve généralement des caractéristiques techniques constructives qui confèrent aux bâtiments certaines qualités estivales. Les murs peuvent être épais et donc offrir de l'inertie au logement ce qui permet d'être à l'abri de la chaleur pendant les premiers moments d'une canicule. Les protections solaires tels les volets permettent de se protéger du soleil et la configuration traversante des logements permet généralement une ventilation naturelle efficace. Après-guerre, les logements appliquent les préceptes de la pensée moderne et notamment avec l'intention de capter le plus possible d'énergie solaire. Les baies vitrées se développent et, avec elles, tous les problèmes d'inconfort en hiver comme en été, heureusement les protections solaires sont encore partie intégrante des bâtiments. À partir des années 80, le modèle est le bâtiment isolé thermiquement par l'intérieur. Cette isolation compromet nettement les qualités d'inertie des murs en béton armé. Les protections solaires extérieures sont très souvent absentes, l'architecte laissant le soin aux habitants

de gérer par eux-mêmes la pénétration du soleil dans le logement grâce à des rideaux ou des stores intérieurs.

Réhabilitation thermique et confort d'été

La réhabilitation thermique, qui motive actuellement nombre de travaux dans l'habitat se fait souvent en prenant en compte le confort d'hiver, et peu ou pas le confort d'été. Des solutions simples peuvent souvent permettre d'améliorer grandement le confort d'été.

- Notamment en restaurant les protections solaires si elles ont disparu. La protection solaire doit être parfaitement opaque aux rayonnements. Elle doit impérativement être extérieure car sinon, déportée à l'intérieur, elle participera à l'échauffement de l'habitat. Le dispositif le plus efficace est le store extérieur qui permet de réaliser une lame d'air immobile entre le store et le vitrage. Ce dispositif permet un calfeutrement total de l'habitat aux heures les plus chaudes. Les volets et persiennes métalliques sont des protections extérieures intéressantes également mais légèrement moins efficaces puisque l'air circule entre la protection et le vitrage.
- Les bâtiments anciens des centres urbains denses (avant 1914) sont souvent mitoyens et construits entre cour et

rue. Cette configuration favorise naturellement la **ventilation** par simple ouverture des fenêtres ce qui permet un rafraîchissement efficace des locaux et permet aux parois intérieures de se recharger en fraîcheur la nuit. **Les opérations de réhabilitation devraient toujours veiller à préserver les courettes** qui sont malheureusement régulièrement mises à mal par les opérations d'optimisation foncières. Les courettes permettent le tirage thermique naturel à travers les logements. Il s'agit d'un mode de rafraîchissement passif de l'habitat qui est parfois destabilisé par l'introduction de climatiseurs dans les cours (voir coupes page suivante). Aujourd'hui les opérations de réhabilitations dans l'ancien valorisent peu les qualités intrinsèques des bâtiments. Les cheminées et autres conduits de fumées pourraient permettre de nouveaux modes de rafraîchissement qui pourraient notamment voir le jour grâce à la valorisation de la fraîcheur des caves. Les innovations techniques utilisant les dispositifs existant de l'habitat sont peu courantes, et les politiques de réhabilitation mettent souvent l'accent sur la généralisation de la ventilation mécanique sans réelle réflexion sur la ventilation naturelle, qui est la seule apte à proposer des débits importants en été.

PROTECTION SOLAIRES



Stores extérieurs réalisant une lame d'air étanche face aux ouvrants



© Apur - Julien Bigorgne

Volets extérieurs, persiennes métalliques (extérieures) réalisant une lame d'air ventilée face aux ouvrants



© Apur - Julien Bigorgne

Rideaux et stores intérieurs



© Apur - Julien Bigorgne

CE QU'IL FAUT RETENIR

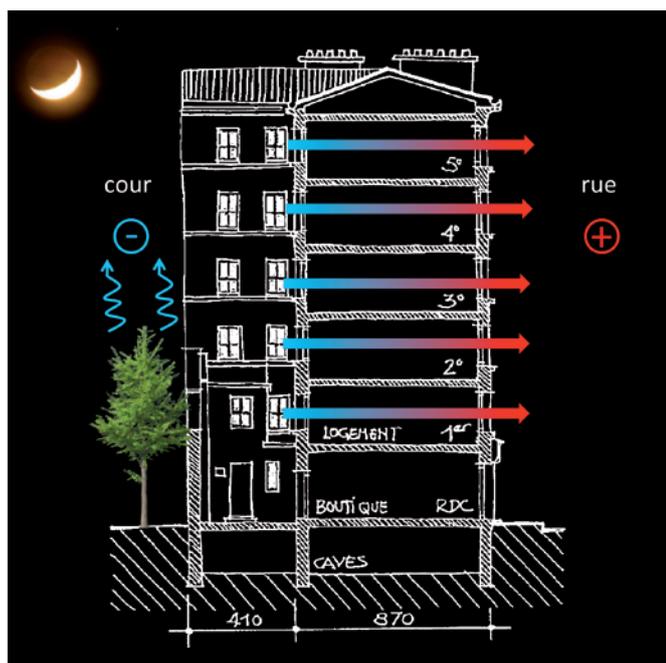
Les bâtiments anciens (avant 1914) possèdent des caractéristiques intéressantes vis-à-vis du confort d'été. Il est utile dans les opérations de réhabilitation de les valoriser, et, a minima, de ne pas les compromettre.

Des pistes d'innovation existent dans le bâti ancien pour viser un rafraîchissement sans climatisation, on peut penser pour cela à l'aération via les cheminées, et la valorisation de la fraîcheur des caves.

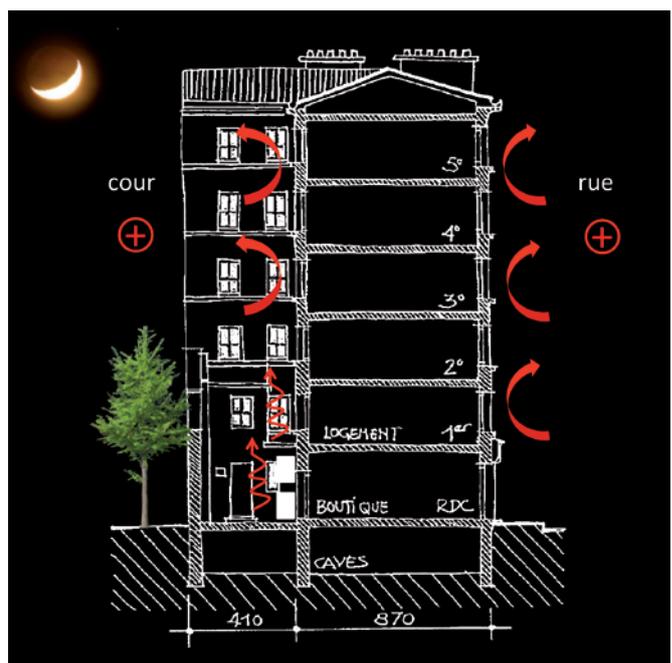
Les matériaux biosourcés peuvent apporter une réponse climatique intéressante dans les travaux d'isolation grâce à leur comportement hygrothermique très spécifique.

- Pour les villes qui, comme Paris, possèdent **un réseau d'eau non potable**, il est possible d'envisager des solutions de rafraîchissement climatique des bâtiments utilisant la fraîcheur de l'eau de réseau. De telles solutions sont envisageables dans le cas de réhabilitations dans lesquelles le système de chauffage et de refroidissement d'un bâtiment est entièrement revu.
- Dans la réhabilitation des bâtiments anciens, les **matériaux d'isolation naturels** tel le bois ou le chanvre ont de réelles possibilités d'amélioration du confort estival. Trop souvent, les opérations des années passées ont favorisé la performance thermique sans se soucier de la forte incompatibilité qui existe entre les matériaux de synthèse (polystyrène, laine minérale, etc.) et les structures des bâtiments anciens, surtout quand il s'agit de structures en bois, qui sont très sensibles à l'humidité. L'usage des matériaux biosourcés permet une réelle amélioration des qualités thermiques des bâtis anciens. Sous toiture, la laine de bois permet aux logements d'accéder à un très bon confort d'été grâce à l'inertie du bois

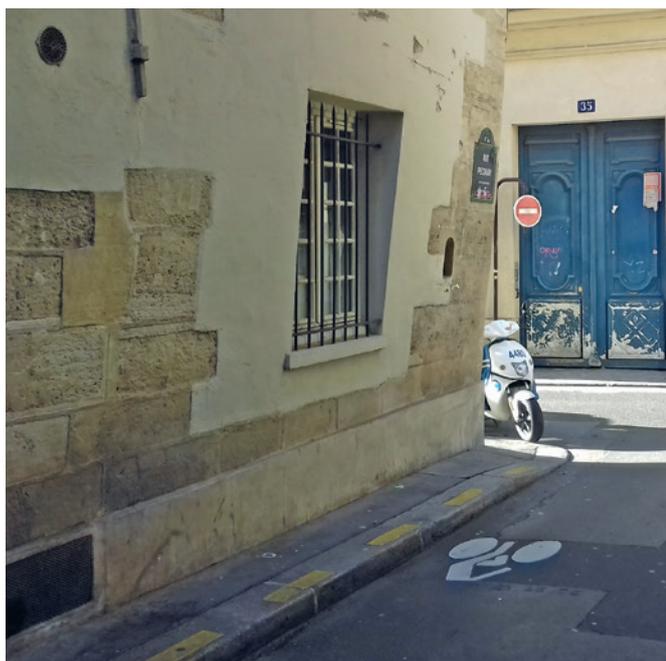
qui permet des déphasages importants que l'on n'aura pas avec des isolants classiques. Les enduits à base chanvre permettent des isolations intérieures ou extérieures très intéressantes. En intérieur, le chanvre a la capacité de stocker et déstocker l'humidité de l'air ce qui rend l'habitat très agréable à vivre, cette qualité est totalement absente des logements isolés avec des matériaux inertes de synthèse. En été le chanvre a tendance à relâcher dans l'ambiance intérieure l'humidité accumulée dans l'année, ce qui permet un rafraîchissement intérieur par évaporation. Si toutes ces solutions existent, elles sont encore peu mises en œuvre dans l'habitat. La réglementation actuelle a plutôt tendance à compliquer la mise œuvre de ces matériaux qui répondent de façon très différente à la qualité thermique de l'habitat. Pourtant les bilans carbone globaux sont sans appel lorsque sont comptabilisées toutes les émissions de carbone de ces matériaux rapportées à leur durée de vie.



Ventilation nocturne naturelle d'une cour du XIX^e siècle permettant un rafraîchissement efficace des appartements. La ventilation est amorcée grâce à une différence de température entre la cour et la rue.

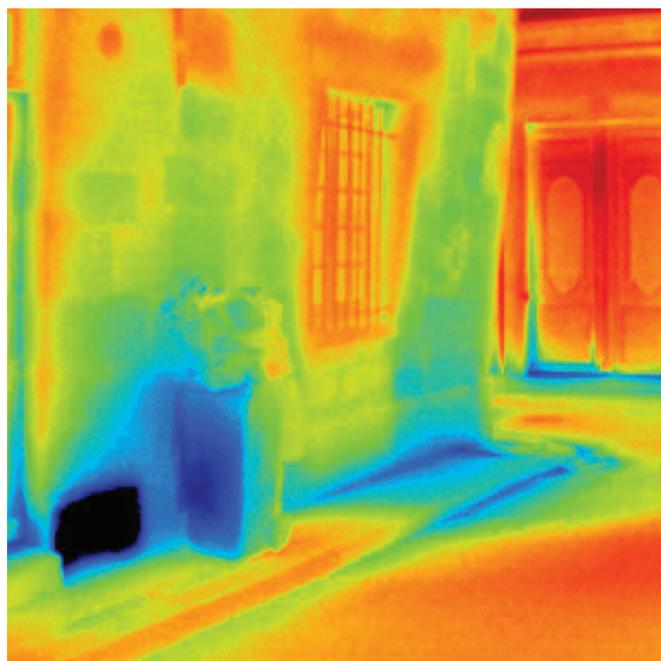


L'ajout de climatiseurs sur la cour par la boutique compromet, voire annule, cette ventilation car la différence de température entre la cour et la rue disparaît.



Rue Pecquay, Paris 4e

© Apur - Julien Bigorgne



Rue Pecquay, Paris 4e : la fraîcheur des caves, qui apparaît à travers les soupiraux, n'est pas valorisée. Elle pourrait permettre le rafraîchissement des locaux lors d'opérations de réhabilitation.

© Apur

IMMEUBLE DE 1912 – AVENUE VICTOR HUGO, PARIS 16e



La réhabilitation de l'édifice a permis la mise en place d'un système d'échange thermique avec le réseau d'eau non potable de la Ville de Paris.

© Apur - Julien Bigorgne



Les locaux sont équipés d'émetteurs aérauliques froid et chaud.

© Apur - Julien Bigorgne



La machine à absorption permet de valoriser la fraîcheur de l'eau non potable sans tours de refroidissement.

© Apur - Julien Bigorgne



Courette d'immeuble de faubourg – rue Max Dormoy, Paris 18^e

© Apur - Julien Bigorgne

La chaleur anthropique

Les activités humaines sont consommatrices d'énergie. Cette énergie, quelle qu'en soit l'origine, se transforme en chaleur lors de son usage. Il existe en ville des rejets massifs de chaleur sur l'espace public qui participent à l'élévation de température de la ville :

- **Les climatiseurs** en sont un exemple, bien que peu visibles sur l'espace public. Ils sont pourtant très présents en ville, généralement intégrés de façon discrète aux façades des commerces, ou intégrés sur cours ou en toiture.
- **Les déplacements motorisés** puisque les moteurs (thermiques ou électriques) dégagent de la chaleur directement à la hauteur des piétons sur les voiries urbaines.
- **Les réseaux de chauffage urbain** qui fonctionnent en été pour la production de l'eau chaude sanitaire des bâtiments. Ces derniers contribuent à l'échauffement des trottoirs et participent au maintien d'une température élevée des sols de certaines artères.
- **Les éclairages nocturnes** de mise en valeur des monuments.
- Etc.

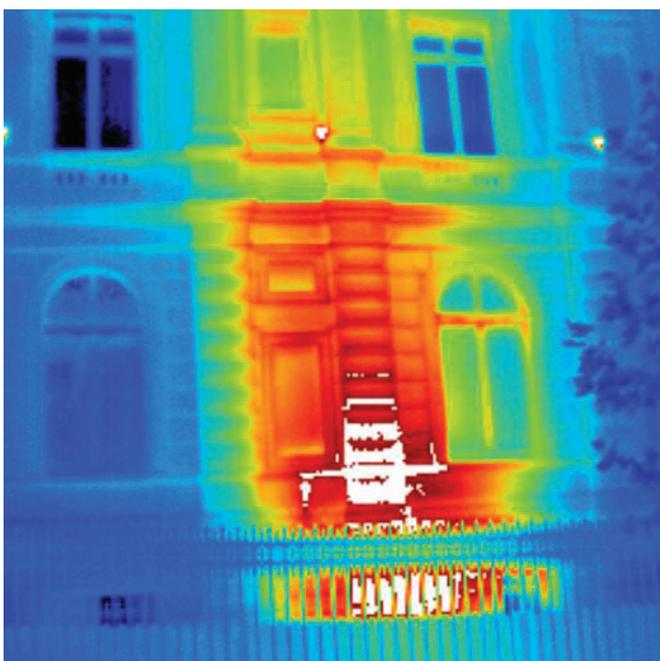
Si l'ensoleillement est la cause directe de l'ICU, la chaleur anthropique participe également à la montée en température de la ville et sa modération, via des politiques de sobriété, fait également partie des solutions d'adaptation climatique des villes.

Lors de la conception de programmes neufs, il est important d'anticiper les rejets de chaleur (par ventilation ou climatisation) et de les placer préférentiellement en toiture s'ils ne peuvent être évités.

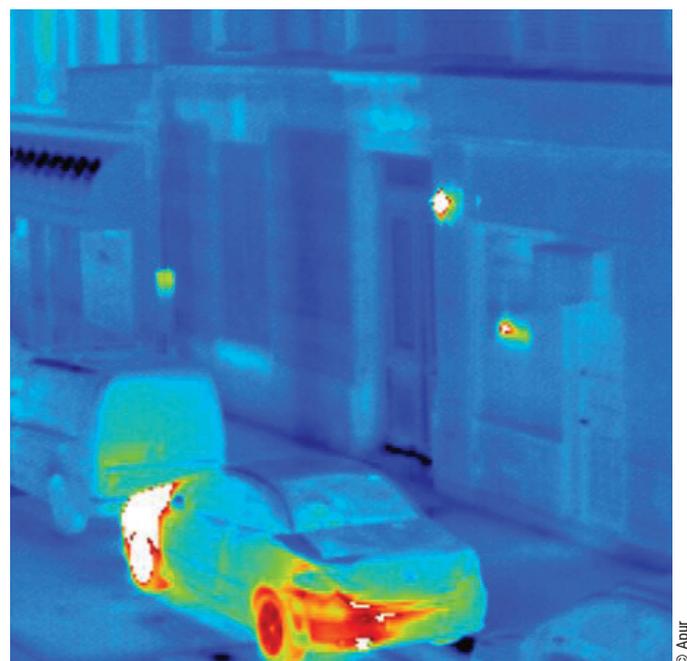
CE QU'IL FAUT RETENIR

La sobriété des usages de l'énergie en été participe à la lutte contre les ICU.

Les rejets de chaleurs doivent être reportés le plus loin possible des espaces pratiqués par les piétons et ne pas polluer thermiquement les courtes.



Émanation de chaleur d'un groupe froid installé dans une cour anglaise – avenue Carnot, Paris 8°.



Moteur encore chaud d'un véhicule à l'arrêt, le temps de refroidissement du moteur participe à l'échauffement de la rue pendant plusieurs heures.



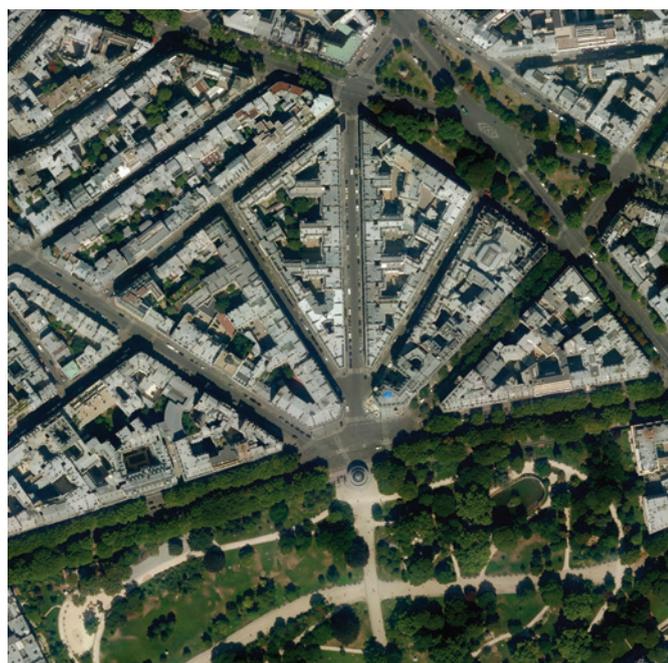
© Apur - Julien Bigorgne

Groupe de climatiseurs obstruant une ancienne cour.
Ilot situé entre les rues Nicolas Flamel et Saint-Martin, Paris 4^e.

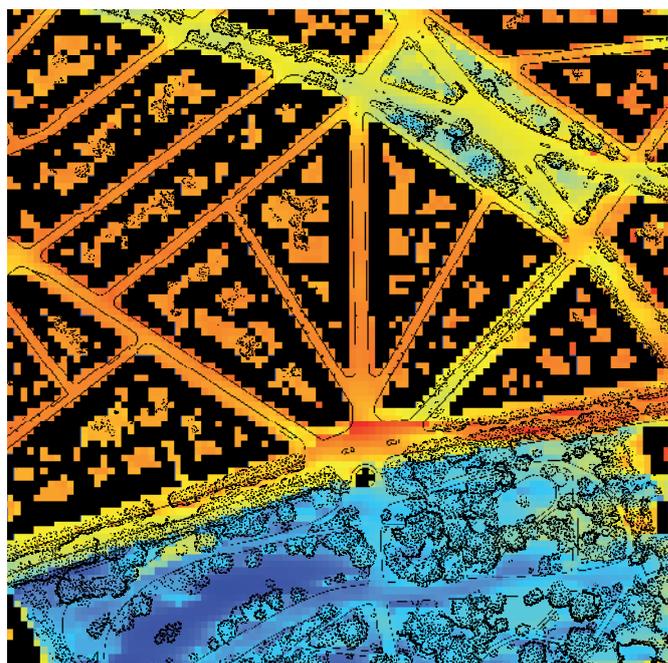
ANNEXE

Modèles numériques

Il existe aujourd'hui nombre de modèles informatiques qui permettent de réaliser de la simulation climatique. Néanmoins l'interprétation des résultats nécessite une réelle expertise qui rend le processus de modélisation trop opaque pour le concepteur. Le modèle agit comme une boîte noire avec laquelle il est très difficile d'être critique. La modélisation a tendance à mettre de la distance entre la question climatique et l'aménageur, ce dernier se trouvant dans une position où il est « sorti » de l'expertise, devant appliquer le résultat d'un calcul sans trop pouvoir juger de sa pertinence.



© InterAtlas



© Apur

Exemple de modélisation climatique du confort nocturne un 18 août à 2 h du matin (UTCI) réalisé par le logiciel EnviMet – parc Monceau, Paris 17^e

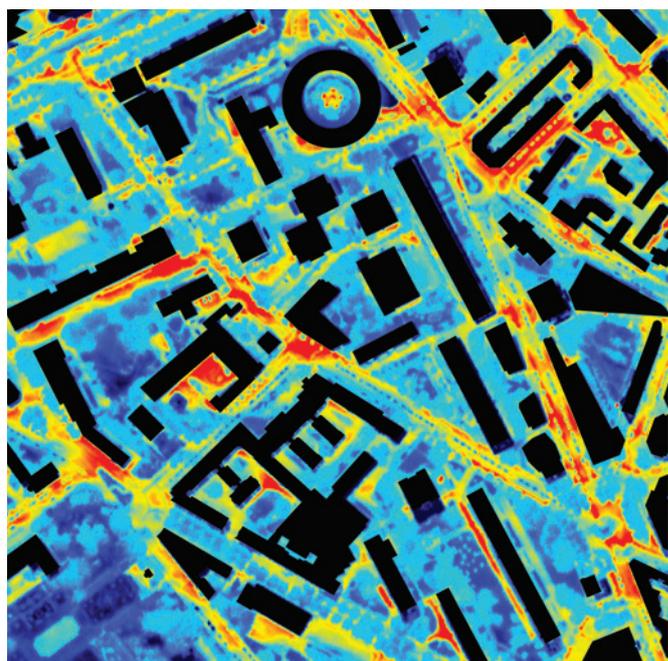
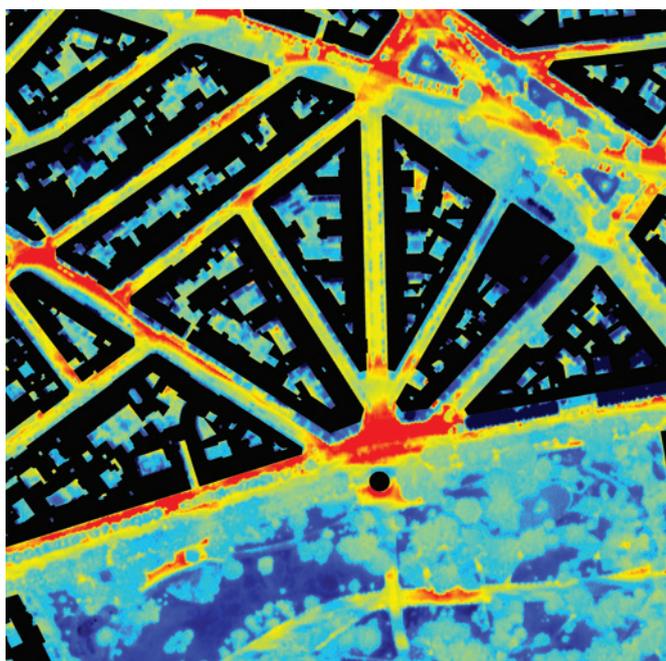
Thermographies aériennes

Il existe également des cartes de thermographie aérienne nocturne estivale qui sont parfois réalisées par les collectivités et qui sont transmises aux aménageurs, notamment dans le cas de projets dans les tissus existants. À l'inverse des modèles numériques qui supposent beaucoup d'ingénierie en amont, les thermographies sont à disposition de tous sans effort sur des territoires parfois vastes, ces cartes sont attractives car très colorées, mais malheureusement leur interprétation est très complexe, et doit être réservée au contexte de la recherche, mais pas à l'aménagement. Pourquoi doit-on éviter d'utiliser des clichés thermographies dans la conception urbaine ? :

- La thermographie donne une photographie du rayonnement infrarouge de surface à un instant donné, ce n'est qu'un instantané alors que l'ICU est un phénomène extrêmement dynamique. Des endroits apparemment « très chauds » pendant la prise de vue peuvent rapidement se rafraîchir, alors que d'autres, à peine « chauds » peuvent se révéler encore chauds plusieurs heures après la prise de vue et donc être symptomatiques d'une situation critique. Cette question est problématique car la prise

de vue qui porte généralement sur un vaste territoire prend du temps, et donc il est nécessaire, a posteriori, de recalculer les températures pour éviter que les zones les plus tardivement observées ne semblent plus froides que les autres sur un même cliché. Le problème de ce recalage est qu'il est linéaire et qu'il ne tient pas compte de l'inertie et donc de la dynamique propre à chaque matériau décrite précédemment ce qui peut conduire à des clichés presque impossibles à interpréter.

- À ceci s'ajoute la question de l'émissivité infrarouge des matériaux figurant sur la photo qui suppose une parfaite connaissance du terrain; ainsi, par exemple, des granits polis utilisés en revêtements de sol peuvent apparaître comme « frais » en thermographie alors que leur température réelle s'approche des asphaltes les plus chauds du cliché.
- Enfin, la thermographie propose une température de surface qui n'est pas exactement corrélée avec les indicateurs de confort couramment utilisés, comme l'UTCI (Universal Thermal Climate Index), qui rend compte d'une composition subtile entre différents paramètres influençant le confort thermique : température de l'air, humidité relative, vitesse du vent, etc.



Exemple de thermographies nocturnes en août 2016 - parc Monceau, Paris 17^e et sud du boulevard Vincent Auriol, Paris 13^e.

Appréciation de l'ICU : compléter les outils de calcul de l'ensoleillement journalier par la prise en compte de la vue sur le ciel

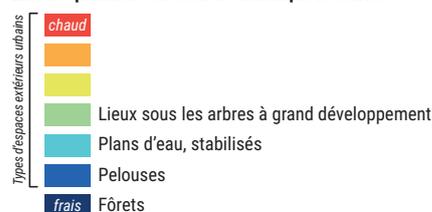
Le travail présenté dans cette étude s'appuie sur des plans d'ensoleillement complétés d'une cartographie de la trame rafraîchissante. Cette approche a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre. Pour aller plus loin il est possible de rajouter à cette représentation une subtilité qui consiste à prendre en compte la vue sur le ciel. Cette étape est facultative, elle est montrée ici uniquement à titre illustratif car elle permet de s'approcher de ce que pourrait donner une thermographie sans les biais observationnels (principalement liés à l'émissivité des matériaux) et aux biais de calage thermique. La vue sur le ciel est la part de ciel observable par un piéton depuis un lieu donné. Elle est intéressante à quantifier car elle rend compte du mécanisme de rafraîchissement nocturne qui est en jeu la nuit grâce à la voûte céleste. Plus la vue sur le ciel est dégagée, plus le rafraîchissement nocturne est efficace. Néanmoins plus la vue sur le ciel est dégagée et plus l'insolation journalière est susceptible d'être importante. Il y a là deux effets antinomiques qui jouent de façon non triviale dans le cas des ruelles, des cours et courettes.

Pour prendre en compte ce phénomène, il est nécessaire de calculer préalablement le facteur de vue du ciel et pondérer par ce dernier l'ensoleillement reçu. La carte finale est une nouvelle fois obtenue en superposant les éléments rafraîchissants au précédent calcul. Là encore, une appréciation qualitative de l'échelle de couleur est proposée. Cette fois-ci des espaces confinés sont jugés plus chauds qu'auparavant, on est alors dans une situation où les murs des bâtiments sont considérés comme chauds, même si les espaces n'ont pas été ensoleillés. Dans le cas de la ville ancienne (avant 1914), cela correspond à une situation où une canicule est installée depuis plusieurs jours au moins et dans laquelle toute la fraîcheur contenue dans les murs a été « vidée » par la chaleur ambiante persistante. Dans le cas d'un projet où on aurait des bâtiments isolés par l'extérieur cela correspond à la situation immédiatement constatée d'une nuit d'été car les bardages ou enduits recouvrant les murs des bâtiments isolés par l'extérieur sont sans inertie.

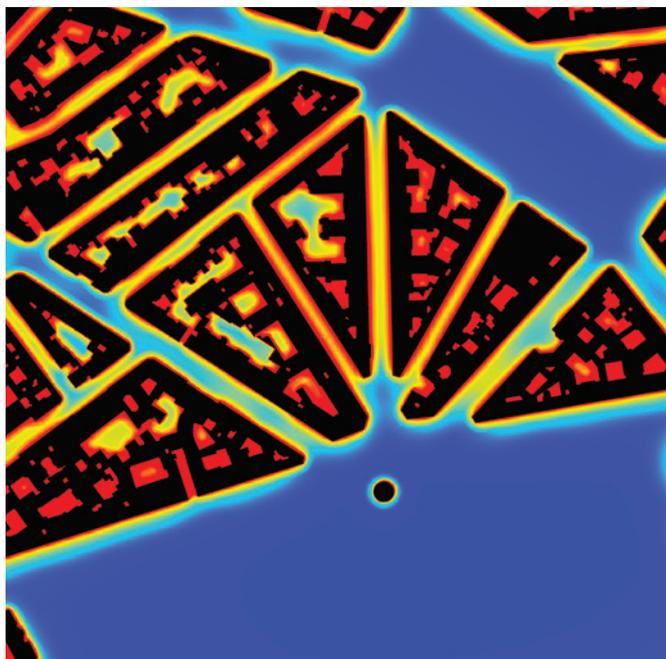
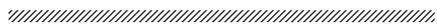
Facteur de vue du ciel



Échelle qualitative de confort thermique nocturne

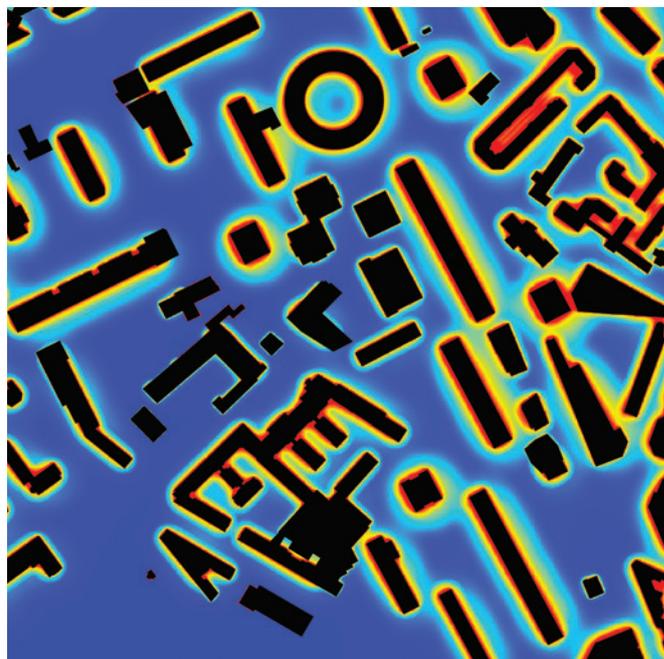


FACTEUR DE VUE DU CIEL



Parc Monceau, Paris 17^e

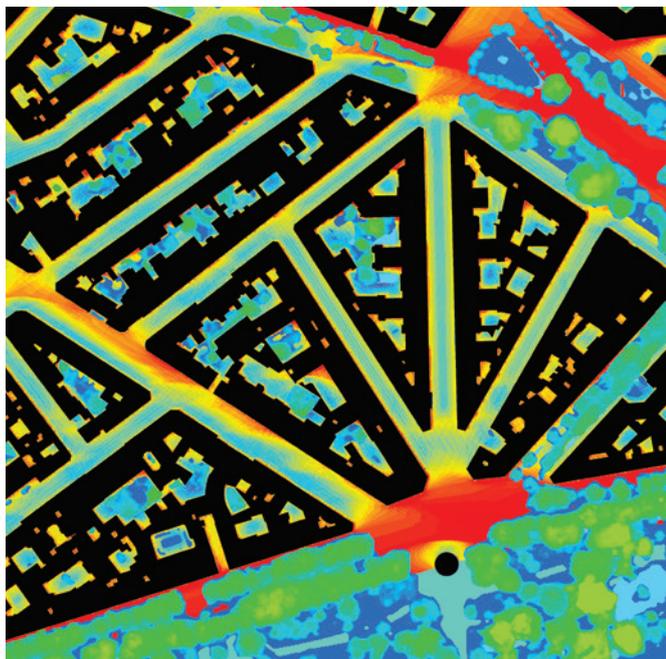
© Apur



Sud du boulevard Vincent Auriol, Paris 13^e

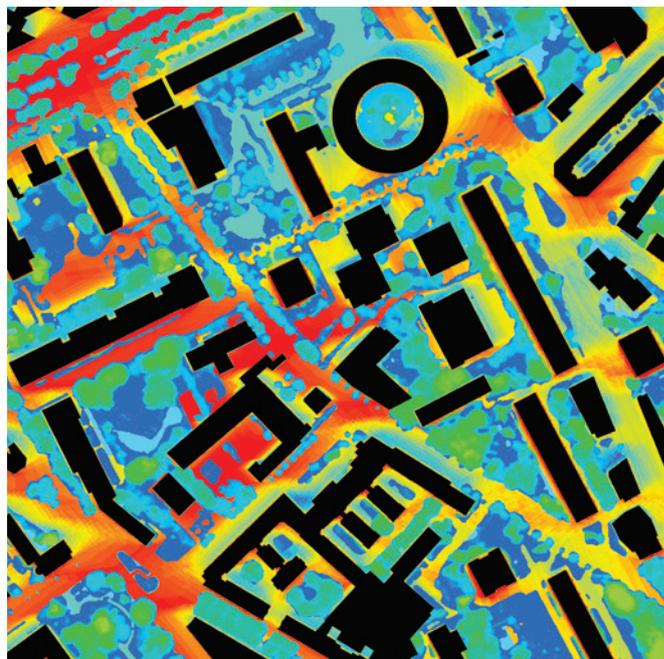
© Apur

REPRÉSENTATION SIMPLIFIÉE DU CONFORT THERMIQUE NOCTURNE AVEC PRISE EN COMPTE DU FACTEUR DE VUE DU CIEL



Parc Monceau, Paris 17^e

© Apur



Sud du boulevard Vincent Auriol, Paris 13^e

© Apur

BIBLIOGRAPHIE

Apur – *Les îlots de chaleur urbains à Paris – Cahier n° 1*

<https://www.apur.org/fr/nos-travaux/ilots-chaleur-urbains-paris-cahier-1>

Apur – *Les îlots de chaleur urbains à Paris – Cahier n° 2: simulations climatiques de trois formes urbaines parisiennes et enseignements*

<https://www.apur.org/fr/nos-travaux/ilots-chaleur-urbains-paris-cahier-ndeg2-simulations-climatiques-trois-formes-urbaines>

Apur – *Les îlots de chaleur urbains du cœur de l'agglomération parisienne – Cahier n° 3: brises thermiques*

<https://www.apur.org/fr/nos-travaux/ilots-chaleur-urbains-coeur-agglomeration-parisienne-cahier-ndeg3-brises-thermiques>

Apur – *Les îlots de chaleur urbains à Paris – Cahier n° 4: influence climatique des revêtements de sol à Paris*

<https://www.apur.org/fr/nos-travaux/ilots-chaleur-urbains-paris-cahier-ndeg4-influence-climatique-revetements-sol-paris>

Apur – *Parcours et îlots de fraîcheur à Paris*

<https://www.apur.org/fr/nos-travaux/parcours-ilots-fraicheur-paris>

Fieldwork – *Lisière d'une tierce forêt*

<https://www.tierceforet.com/>

M. Hendel – *Pavement-Watering in Cities for Urban Heat Island Mitigation and Climate Change Adaptation: A Study of its Cooling Effects and Water Consumption in Paris*

ANR, *La biodiversité en ville dense – Nouveaux regards, nouveaux dispositifs « Du bord du toit au caniveau »*

https://www.plante-et-cite.fr/ressource/fiche/473/la_biodiversite_en_ville_dense_nouveaux_regards_nouveaux_dispositifs_du_bord_du_toit_au_caniveau

Atténuer les îlots de chaleur urbains

CAHIER #5 : MÉTHODES ET OUTILS DE CONCEPTION DES PROJETS

Depuis l'adoption du premier Plan Climat de la Ville de Paris en 2007, et, afin d'accompagner les politiques parisiennes et métropolitaines, l'Apur a engagé une série de travaux afin d'identifier les potentiels d'adaptation des tissus urbains au regard des évolutions climatiques en cours.

Dans ce cadre, l'Apur a réalisé quatre cahiers traitant spécifiquement de la question des îlots de chaleur :

- Cahier #1 : les îlots de chaleur urbains à Paris ;
- Cahier #2 : simulations climatiques de trois formes urbaines parisiennes et enseignements ;
- Cahier #3 : brises thermiques ;
- Cahier #4 : influence climatique des revêtements de sol à Paris.

Ce cinquième cahier traite de la prise en compte des îlots de chaleur urbains (ICU) lors des phases de conception du projet urbain. Ce document, qui s'appuie sur les quatre cahiers précédents, propose une base méthodologique permettant d'explicitier quelques outils de conception relatifs à la question des ICU. Il tente d'apporter aux architectes, urbanistes et à leurs maîtrises d'ouvrage des pistes d'intégration de la question climatique dès les premières esquisses du projet. Il faut néanmoins se garder de l'idée qu'il existerait une doctrine de conception qui édicterait ce que serait une ville climatiquement vertueuse.

Ce cahier est une aide à la conception et un garde-fou face aux erreurs aujourd'hui couramment constatées.

L'Apur, Atelier parisien d'urbanisme, est une association loi 1901 qui réunit autour de ses membres fondateurs, la Ville de Paris et l'État, les acteurs de la Métropole du Grand Paris. Ses partenaires sont :

