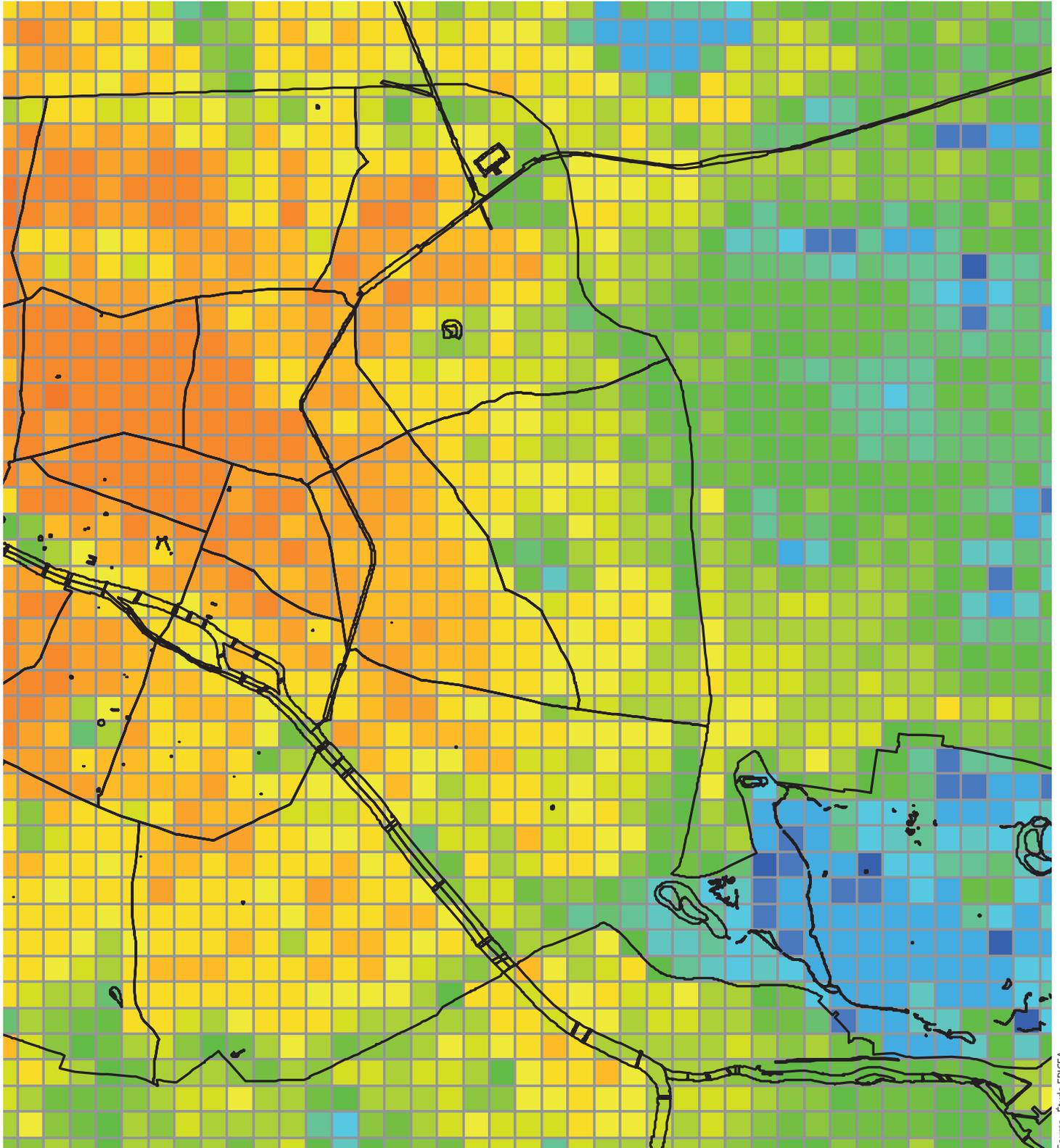


# Les Îlots de Chaleur Urbains à Paris

## Cahier#1



Source : Étude EPICEA

Directrice de la publication : Dominique Alba  
Étude réalisée par : Julien Bigorgne  
Sous la direction de : Christiane Blancot  
Photos et illustrations : Apur sauf mention contraire  
Maquette : Apur  
[www.apur.org](http://www.apur.org)

# Sommaire

Contexte .....	1
Préambule .....	2
Guide de lecture.....	4
Généralités.....	5
<b>1 – Compréhension de l'ICU parisien : les grands facteurs d'influence du climat.....</b>	<b>11</b>
1.1 L'eau.....	11
1.2 La végétation .....	14
1.3 Les revêtements de l'espace public.....	17
1.4 Les matériaux employés dans les bâtiments .....	19
1.5 La forme urbaine .....	21
1.6 Les activités humaines .....	25
<b>2 – Premières mesures d'adaptation .....</b>	<b>28</b>
2.1 Réduire la « pollution thermique » .....	28
2.2 Créer des îlots de fraîcheur .....	29
2.3 Modifier les revêtements.....	30
2.4 Mettre à profit la fraîcheur du sous-sol .....	31
2.5 Une réglementation thermique du bâtiment très incertaine sur le confort d'été.....	33
Conclusion et perspectives.....	34
Bibliographie.....	35



## Contexte

La Ville de Paris a voté en 2007 le Plan Climat de la Ville de Paris qui recense les mesures d'atténuation à mettre en œuvre à Paris afin de réduire la part de responsabilité de Paris dans le changement climatique global. En accord avec l'objectif de la réduction par 4 des émissions de CO<sub>2</sub> à l'échelle nationale d'ici 2050, la Ville de Paris s'est fixée comme objectif intermédiaire une réduction de 25 % de ses émissions d'ici 2020 ainsi qu'une réduction de 25 % de ses consommations d'énergies et une participation de 25 % des énergies renouvelables à l'approvisionnement énergétique de Paris.

Le changement climatique est compris ici comme un phénomène engagé. L'incertitude que nous avons à propos de ce phénomène porte sur son ampleur. La question n'est plus de savoir si « oui » ou « non » nous aurons à faire face à un changement climatique, mais de combien de degrés ce changement impactera nos sociétés : 3 °C, 5 °C ou plus pour la fin du XXI<sup>e</sup> siècle ? La réponse à cette question tient dans les mesures d'**atténuation** que nous prendrons. Et surtout il convient de poser la question de l'**adaptation**, qui doit faire partie intégrante des choix urbains entrepris en ville et des évolutions de l'existant.

La Ville de Paris a financé en 2007 un projet de recherche portant sur les impacts du changement climatique à l'échelle de l'agglomération parisienne. Ce projet, appelé EPICEA (Étude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Échelle de l'Agglomération Parisienne) a été l'occasion d'une collaboration entre Météo-France, le CSTB et l'Apur. Ce projet, clôturé en 2012, a posé les premiers jalons de la compréhension des phénomènes microclimatiques de Paris, et les premières bases de l'évaluation de la portée des dispositifs d'adaptation à Paris.

Si cet exercice offre une connaissance à grande échelle, cette connaissance doit être affinée afin d'aboutir à la définition d'une politique d'adaptation pour Paris. Il a donc été proposé dans le cadre du programme partenarial de l'Apur d'engager des travaux en 2012 et 2013 qui permettront d'identifier des mesures d'adaptations propres au tissu urbain parisien. **La première phase**, l'objet de ce document, présente les **enseignements « urbains »** que l'on peut tirer d'un projet comme EPICEA, les complète et les affine par des séries de mesures de températures réalisées à Paris durant les étés 2011 et 2012. Brièvement introduit dans ce document, **la seconde phase**, à paraître en 2013, présentera l'étude de 6 fragments urbains à Paris qui feront l'objet de modélisations climatiques permettant d'appréhender la question du confort thermique urbain à l'échelle de l'îlot et ses possibilités d'amélioration. Cette étude permettra de **quantifier l'impact des mesures d'adaptation** à Paris afin d'accompagner la Ville de Paris dans la mise en œuvre d'une politique d'adaptation sur son territoire.

# Préambule

## Historique du rapport entre ville et consommation d'énergie

La manière de concevoir les villes a énormément évolué tout au long de l'histoire de l'humanité, si de nombreux facteurs peuvent expliquer cette évolution la question de l'énergie est l'une des plus intéressantes à documenter. Pourquoi ? Lorsque l'homme modifie le milieu dans lequel il vit, l'énergie est le meilleur indicateur pour décrire le champ des possibles qui s'offre à lui. Sans énergie autre que le bois, l'homme a bâti les édifices qui composent les villes les plus anciennes, et ce, pierre par pierre en se contentant de la seule traction animale pour ses échanges commerciaux. Dans ce contexte, les chantiers d'envergure comme ceux des cathédrales ont pu prendre des siècles. À l'inverse dans un monde où l'accès à l'énergie est sans limite, les bâtiments peuvent être conçus de façon industrielle et livrés très rapidement, les flux physiques sur lesquels reposent les échanges commerciaux ne connaissent pas de limites géographiques. **La conception et le dimensionnement des villes ont été grandement conditionnés par la disponibilité de l'énergie.**

De façon schématique ce rapport entre énergie et climat peut se résumer en 3 grandes phases. La première phase démarre avec l'apparition des premières villes et s'achève à l'aube de la

révolution industrielle. Durant cette phase de développement, l'accès à l'énergie est très restreint (bois, traction animale, etc.), l'urbanisme procède donc d'une adaptation parfaite aux climats locaux : les bâtiments sont dimensionnés selon la spécificité climatique propre à chaque latitude, de plus les formes urbaines qu'ils composent sont très denses du fait de l'absence de moyen de transport efficace. Dans ce monde le climat est vécu comme une contrainte structurelle à laquelle il faut s'adapter coûte que coûte. La seconde période, qui s'amorce avec la révolution industrielle, atteint son paroxysme durant les Trente Glorieuses. Grâce à une énergie quasi gratuite et illimitée, l'urbanisation de l'après-guerre n'est plus obligée de composer avec le climat, elle peut même en faire totalement abstraction, et se développer partout sur la planète selon le même modèle. Les villes s'affranchissent de la densité et s'étendent, les déplacements basés sur un pétrole bon marché le permettent. Les constructions dévient le climat, en proposant des structures de plus en plus légères orientées sans logique par rapport à la course du soleil et largement percées d'ouvertures. Les modes de chauffage et de climatisation qui se généralisent partout dans le monde ont permis cette évolution du bâtiment. Selon cette logique, la consommation mondiale d'énergie qui accompagne le passage d'un urbanisme préindustriel à un urbanisme « moderne » est multipliée par 30.

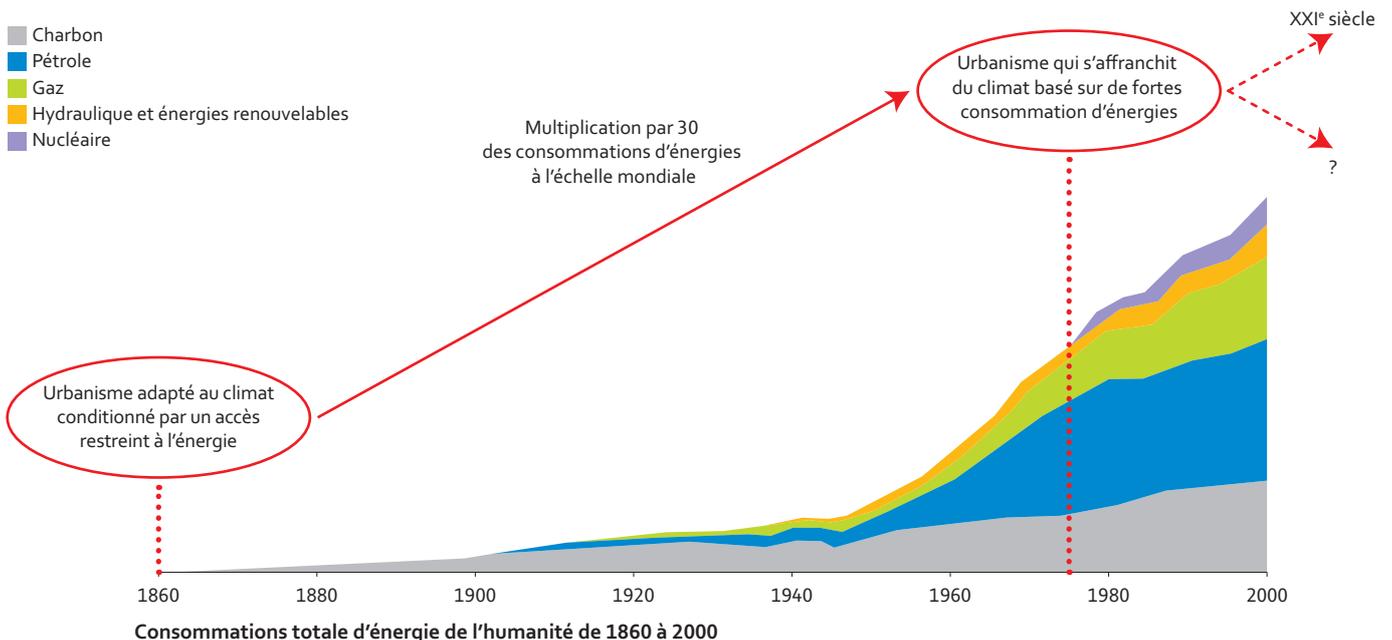


Pré-révolution industrielle



Trente glorieuses

FIGURE 1 – URBANISME ET CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE



La période actuelle doit être comprise comme un réel déficit, elle interroge les aménageurs à plusieurs titres.

**Comment pourrions-nous rénover les tissus urbains des 50 dernières années souvent conçus en parfaite contradiction avec leur climat ? Saurons-nous concevoir à temps ces villes de demain nécessairement adaptées à un climat changeant dont la robustesse sera tributaire de leur faible impact climatique ? Comme il sera démontré dans ce document, la compréhension des phénomènes d'îlots de chaleur urbains est fondamentale pour mener à bien ces deux missions.**

## Vers un urbanisme climatique

L'illusion d'un monde qui vit sans se soucier d'énergie a duré pendant trente ans, entre la fin de la Seconde Guerre mondiale et le choc pétrolier de 1974. La perspective du changement climatique et de la pénurie énergétique nous ont fait basculer dans un monde où la sobriété énergétique est l'un des impératifs du bon fonctionnement des villes de demain. Dans ce contexte, concevoir « avec le climat » et non « en faisant abstraction du climat » redevient l'un des impératifs de l'aménagement urbain.

Néanmoins deux problèmes totalement inédits dans l'histoire de la conception des villes viennent compliquer la situation. Le premier est lié au changement climatique global. L'aménagement urbain se fait dans un contexte de modification rapide du climat. Si l'échelle de temps à laquelle les urbanistes modifient la ville se compte en dizaines d'années, c'est aussi l'échelle de temps à laquelle le climat que nous connaissons actuellement va profondément se modifier. Les décisions que nous prenons aujourd'hui ne doivent pas seulement être comprises comme le meilleur compromis trouvé « à un moment donné » mais devront rester pertinentes au fil du temps dans un climat qui évolue. Si le climat de Paris à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle ressemble à celui de Bastia, alors la construction de bâtiments doit se faire en intégrant la modification au fil des ans du contexte climatique parisien. Le second problème touche au microclimat spécifique des villes. Ce phénomène appelé îlot de chaleur urbain (ICU dans la suite du document) est connu depuis des décennies comme une conséquence directe de l'urbanisation. Il correspond au réchauffement que nous rencontrons en ville par rapport aux zones rurales environnantes. Cette « anomalie » climatique est la conséquence de la modification du milieu naturel par l'homme.

Ainsi, tout aménagement urbain a pour corollaire direct une modification locale du climat. Si la transformation des lieux est une compétence explicite de l'urbanisme, la transformation du climat associé à ces lieux est rarement comprise comme telle. Elle l'est pourtant systématiquement. **L'aménagement urbain c'est transformer de façon simultanée des lieux et leur climat.**

Le changement climatique, qui relève de l'évolution du climat à l'échelle planétaire, aura vraisemblablement un effet amplificateur sur les phénomènes d'îlots de chaleur urbains (ICU). Tout projet d'aménagement urbain se doit de quantifier la part de responsabilité qui lui incombe dans l'expression du climat local. Si cette part n'est pas quantifiée alors cela revient à confier au hasard la viabilité des espaces urbains que nous concevons.

**Chaque ville a une conception unique, chaque climat urbain l'est tout autant. L'objet de cette étude est de proposer des éléments de compréhension du climat parisien, d'expliquer aux professionnels de l'urbanisme et de la construction la relation qui existe entre ville et climat à Paris dans un contexte de réchauffement climatique global.**

À la lecture de ce document on se gardera de généraliser ses enseignements à d'autres latitudes. Si une partie du discours développé ici pourra servir à d'autres villes de France métropolitaine, aucune extrapolation ne pourra être faite sous d'autres latitudes (pays tropicaux, etc.) ou d'autres formes urbaines.

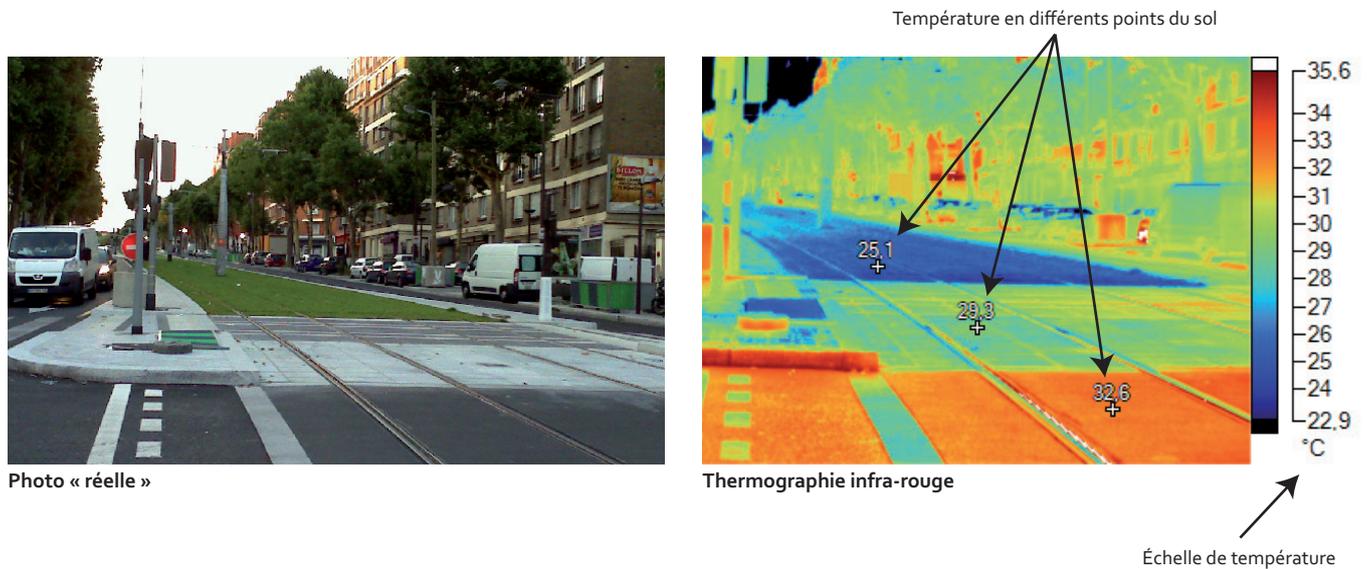
# Guide de lecture

Le confort ressenti sur l'espace public est une donnée subjective. Quand certains souffrent de la chaleur ambiante, d'autres ne ressentent pas de gêne. Il n'en reste pas moins que la construction d'indicateurs permettant d'apprécier le niveau de confort thermique urbain est essentielle. On retiendra simplement qu'au-delà des critères quantifiables que nous adopterons et qui serviront à évaluer le confort, il existe une variable d'ajustement purement sociologique non abordée ici.

L'indicateur le plus connu et le plus employé pour qualifier le confort est la **température de l'air**. C'est la température que mesure le thermomètre à 2 mètres du sol. Un second indicateur, tout aussi

important pour qualifier la notion de confort, est la **température des objets qui nous entourent** comme la température du sol ou des bâtiments proches de nous. La température de tous les éléments qui composent notre champ de vision interviendra dans la qualification du confort. Une façon assez simple de représenter la température de notre environnement proche est d'utiliser la technique de la thermographie infrarouge. Dans ce document de nombreux clichés s'appuient sur cette technique, leur lecture se fait selon une échelle de couleur représentant des niveaux de température. Les clichés thermographiques seront souvent accompagnés de photos « réelles », c'est-à-dire prises avec un appareil photo traditionnel.

FIGURE 2 – EXEMPLES DE CLICHÉS PRIS SUR L'AMÉNAGEMENT DU TRAMWAY T3, BOULEVARD MORTIER



# Généralités

## Qu'est-ce qu'un ICU?

Le terme d'îlots de chaleur urbain (ICU) est employé pour décrire la spécificité climatique des villes par rapport aux zones rurales ou péri-urbaines avoisinantes. Les Villes de par leur caractère totalement artificiel sont le lieu de phénomènes de surchauffes notables qui peuvent s'avérer problématiques lorsque surviennent des épisodes caniculaires, c'est le caractère « amplificateur » de la ville qui rendra ces épisodes plus difficilement supportables et qui pose des questions sanitaires qui appellent des mesures d'adaptation du territoire.

## Quand apparaît l'ICU?

L'ICU parisien est un phénomène épisodique. Il n'est pas présent tout au long de l'année, son apparition nécessite la conjonction d'un certain nombre de paramètres météorologiques que l'on retrouvera durant les épisodes anticycloniques caractérisés par un vent faible (2 à 3 m/s au maximum) et un ciel dégagé. « Une période très favorable pour l'apparition de l'îlot de chaleur est juillet-août, c'est-à-dire quand l'anticyclone subtropical remonte aux latitudes moyennes et apporte sa subsidence. Cette période débute quelquefois dès le printemps et se prolonge parfois jusqu'au début de l'automne

(le mois de septembre est très fréquemment favorable). Inversement, de novembre à janvier, les conditions sont généralement très défavorables à l'apparition de l'îlot de chaleur en raison de l'activité dominante des perturbations liée aux influences subpolaires océaniques »<sup>(1)</sup>.

## Combien de degrés d'écart entre Paris et les zones rurales les plus proches?

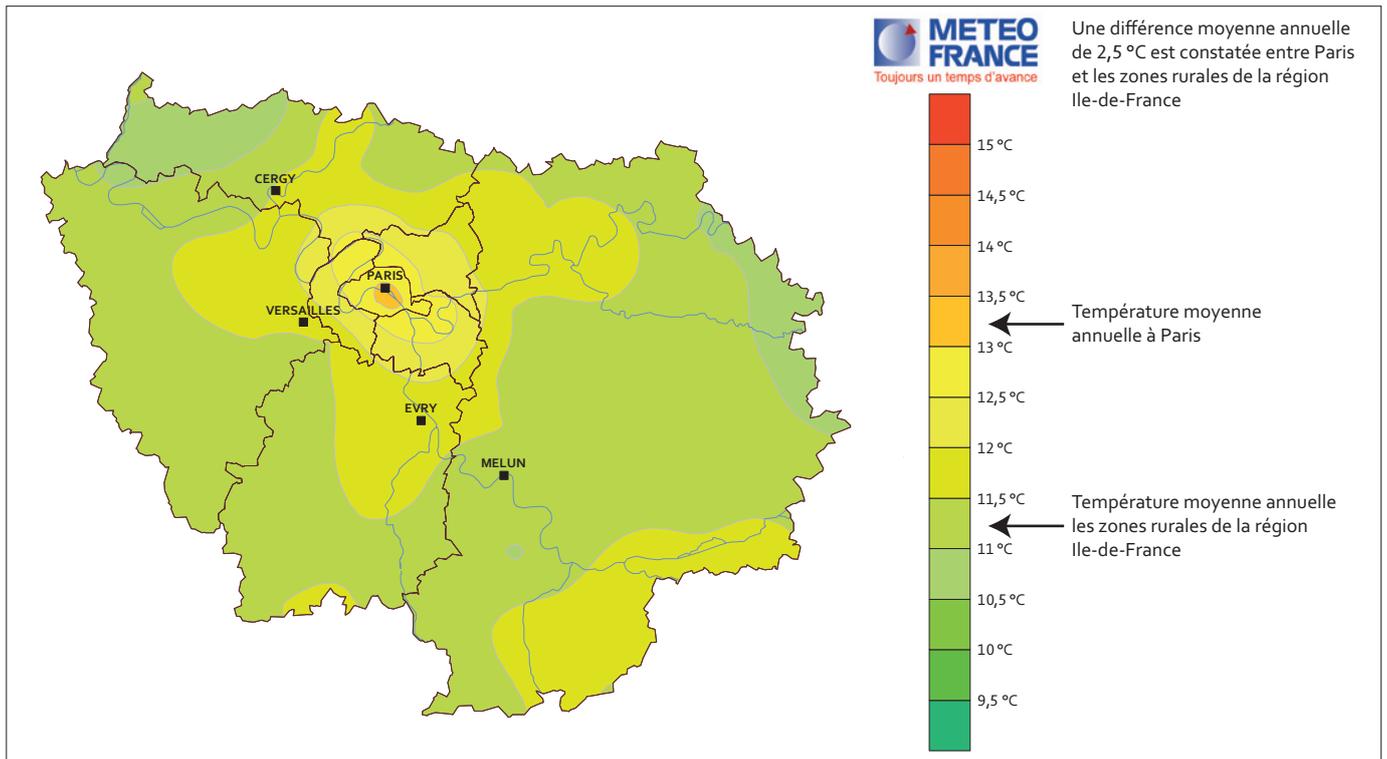
Il est courant de présenter le climat parisien comme étant en moyenne plus chaud d'environ 2,5 °C par rapport aux zones rurales périphériques de l'Ile-de-France (figure 3).

Cette présentation, qui est souvent employée en première approche, est source de confusions auprès du grand public. Une différence de 2,5 °C est généralement comprise comme étant un phénomène mineur, n'importe qui vous dira que 2,5 °C c'est une différence faible de température, à peine perceptible, ce qui est un contresens dans le cas présent.

Pourquoi? L'explication tient dans le fait que cette valeur de 2,5 °C est une donnée climatique, c'est une différence **moyenne**, cette moyenne est

(1) – Cantat O. (2004). *L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps*. Norois n° 191, 2004/2, p. 75-102.

Figure 3 – Températures moyennes de 1995 à 2004 en Ile-de-France



Source : Météo France - DIRIC

FIGURE 4 – QUAND APPARAISSENT LES ICU ?



Conditions défavorables à l'apparition de l'ICU :  
vent fort, couverture nuageuse



Conditions favorables à l'apparition de l'ICU :  
absence de vent, ciel dégagé

une construction mathématique sur plusieurs années, cette moyenne est inaccessible aux sens, personne ne perçoit une température moyenne, cette donnée ne donne aucune indication pour la question du confort urbain. Le confort urbain sera tributaire de la température **instantanée**, c'est-à-dire la température perçue par un individu à instant donné dans un lieu donné.

Une illustration (figure 5) est proposée au cours d'un épisode caniculaire survenu du 18 au 20 août 2012 en Ile-de-France. On compare ici trois stations météo : boulevard de Sébastopol (75001), parc de Montsouris (75014) et Melun (77). La différence de température entre les stations varie au cours du temps, elle est au plus de 8,4 °C à 1h du matin (23h UTC) le 18 août entre le centre de Paris et Melun. C'est bien cette différence de 8,4 °C qui sera utilisée pour qualifier le confort urbain car c'est elle qui est ressentie sur l'espace public et non la donnée de température moyenne (qui vaut ici, après calcul, 3 °C). Cet exemple permet d'illustrer aussi comment varie l'ICU au fil du temps. Aux heures les plus chaudes de la journée, l'ICU est quasiment absent. En période de fortes chaleurs, il n'existe quasiment pas de différence de température, en journée, entre les zones urbaines et rurales, c'est par contre la nuit que les principales différences apparaissent. En ville le refroidissement nocturne sera moindre, ce qui impactera lourdement le confort des habitants ainsi privés de récupération après une journée caniculaire.

## L'ICU : un phénomène encore mal mesuré

L'ICU parisien est mal connu tout d'abord parce qu'il n'est pas suivi en temps réel par des mesures météorologiques. Aujourd'hui 2 stations (Montsouris et Belleville) permettent à Météo-France de suivre heure par heure la température

de Paris, c'est trop peu. La station de Montsouris répond à un protocole de normalisation qui vise à la mettre à l'abri de l'« anomalie climatique » urbaine : elle est placée sous abri, dans un parc et en hauteur ; de fait, elle « voit » assez mal l'ICU, car elle en est protégée. La courbe figure 5 montre bien que la station de Montsouris est prise dans un « entre-deux » climatique, elle n'est ni représentative de la situation urbaine, ni de la situation rurale.

## Comment documenter précisément l'ICU parisien

L'ICU est un phénomène extrêmement local : d'une rue à l'autre, en l'espace de quelques dizaines de mètres, la température peut varier de quelques degrés. C'est ce type de variations spatiales qu'il faut pouvoir renseigner si l'on veut traiter la question de l'adaptabilité de la Ville. Pour pallier à ce déficit d'instrumentation, de nouvelles stratégies de mesure devront voir le jour. Aujourd'hui beaucoup d'institutions et de météorologues « amateurs » possèdent des équipements de mesures à Paris, un effort de partage et de mutualisation de ces données doit être envisagé. **Une institution devrait être officiellement mandatée pour suivre la température du territoire parisien, et proposer une vigilance accrue vis-à-vis des phénomènes caniculaires.** Si une cartographie exhaustive de l'ICU parisien est aujourd'hui impossible à l'aide de mesures, plusieurs méthodes peuvent être employées pour pallier à ce déficit d'information.

### Modéliser

La première stratégie à adopter pour comprendre la déclinaison de l'ICU parisien est la simulation informatique. Le projet de recherche EPICEA<sup>(2)</sup> (2007-2012) a ainsi permis de modéliser Paris selon un maillage de 250 m par 250 m. Dans

(2) – EPICEA : Étude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Échelle de l'Agglomération Parisienne. EPICEA est un projet de recherche commun entre Météo-France, le CSTB et l'Apur pour le compte de la Ville de Paris.

cet exercice de modélisation, chaque maille est renseignée par des paramètres qui permettent de représenter les quartiers qui leurs sont associés. Ces paramètres recensent tous les facteurs déterminant de l'ICU comme : la couverture végétale, la hauteur des bâtiments, les matériaux de toitures, le type de revêtement sur l'espace public, etc. Cet exercice de modélisation, dont la validité a été testée sur la canicule de 2003, permet de mieux comprendre la déclinaison de l'ICU à l'échelle de l'agglomération parisienne. Les principaux enseignements de ce programme seront présentés ici.

Cet exercice possède des avantages et des inconvénients. L'un des avantages est qu'un territoire très vaste peut être étudié, l'autre est que les grands leviers urbains susceptibles d'atténuer l'ICU peuvent être simulés afin d'en tester la portée. Ces principaux leviers sont l'augmentation des surfaces végétales, l'arrosage des chaussées et la modification des propriétés radiatives des matériaux composant l'espace public. Mais cet exercice a aussi des faiblesses qu'il convient de rappeler sans quoi l'interprétation de certains résultats serait abusive. Mailler le territoire en carrés de 250 m permet de comprendre tous les fondamentaux urbains qui sont de l'ordre de grandeur de la maille : la Seine, les bois, les parcs, les cimetières, etc. Par contre tous les éléments dont la taille est inférieure à 250 m seront « dilués » dans une moyenne spatiale qui aura parfois peu de sens.

Un exemple figure 6 est donné sur la trame végétale. On retiendra que si des enseignements globaux peuvent être tirés d'EPICEA, on pourra rarement les transcrire en un mode opératoire local d'adaptation du territoire tant le phénomène d'ICU possède une déclinaison fine sur le territoire dont l'ordre de grandeur sera au plus la dizaine de mètres. **Le travail réalisé avec EPICEA permet de comprendre quelles sont les grandes mesures à mettre en œuvre mais ne dit pas comment.** Or c'est justement la réponse à cette question qui intéresse les aménageurs et les décideurs pour la mise en place de politiques d'adaptation du territoire au changement climatique.

## Mesurer

Une autre stratégie consiste à réaliser des campagnes de mesures ponctuelles dans certains fragments de ville et d'essayer d'en tirer des enseignements généraux. La difficulté de cette démarche peut être énoncée comme suit : comment peut-on faire d'une situation urbaine particulière une matière alimentant un discours plus général sur la Ville et ses influences climatiques ? Dans les chapitres qui vont suivre nous présenterons des mesures réalisées par l'Apur au cours des étés 2011 et 2012. Nous verrons comment les deux démarches que nous venons de décrire à savoir la modélisation et la mesure sont indissociables et doivent être menées en parallèle afin d'éviter les contresens inhérents à chacune des deux méthodes.

Figure 5 – Températures relevées du 18 au 20 août 2012, sur les stations du boulevard Sébastopol (75 001), parc Montsouris (75 014) et de Melun (77)

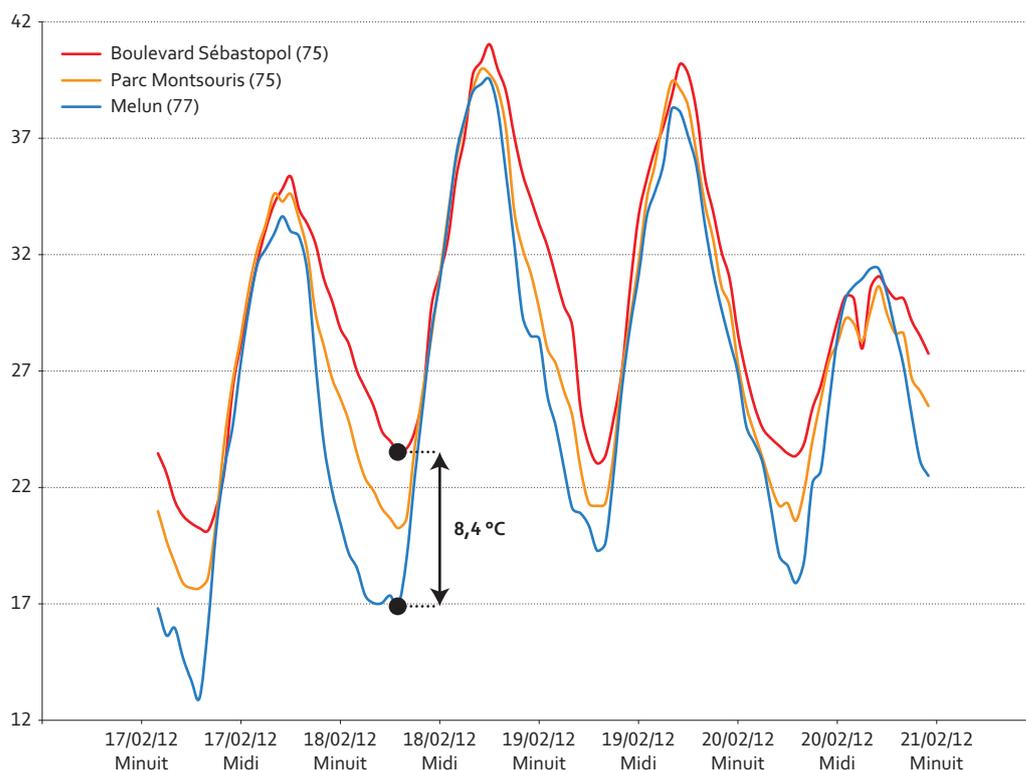
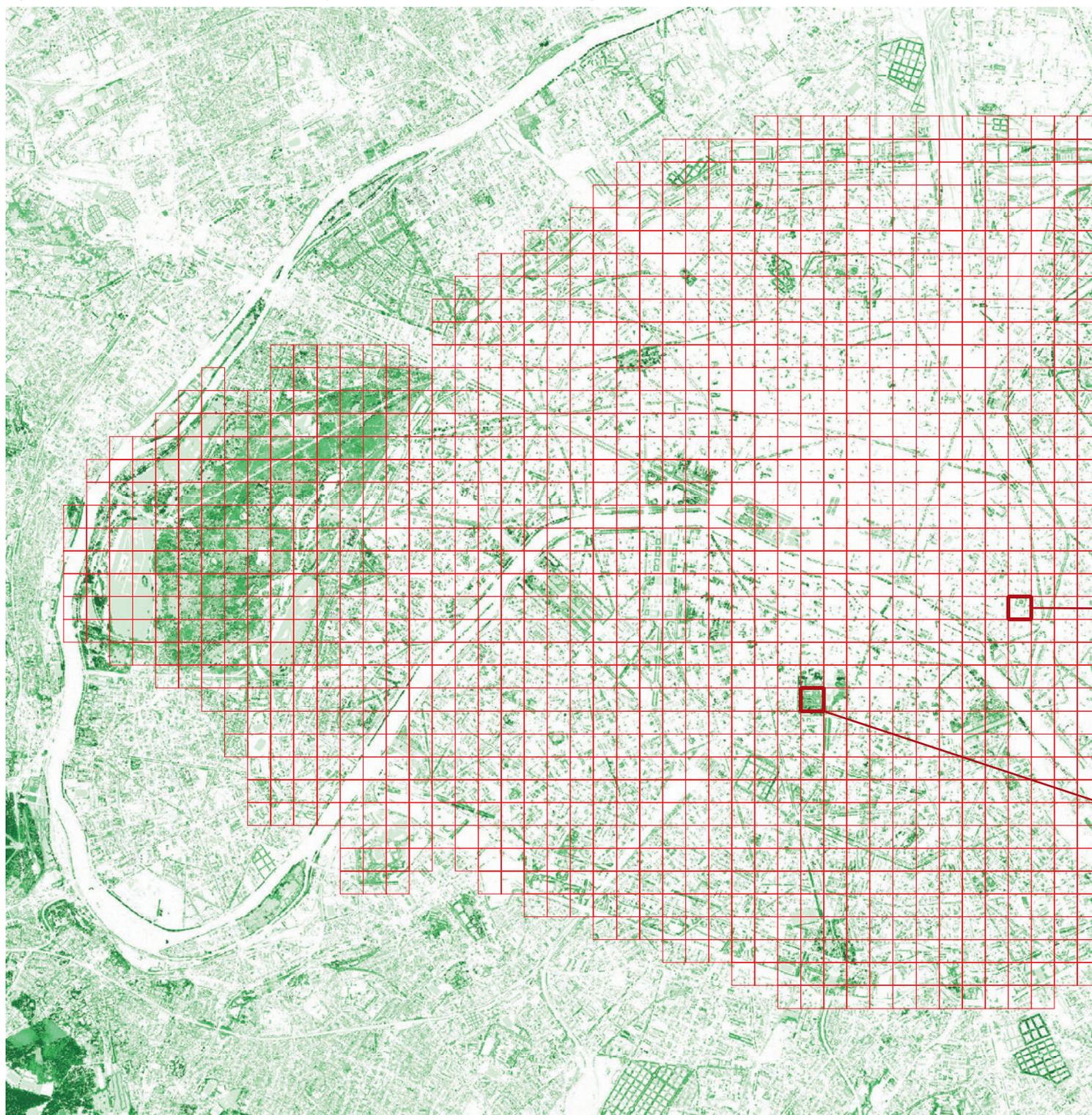
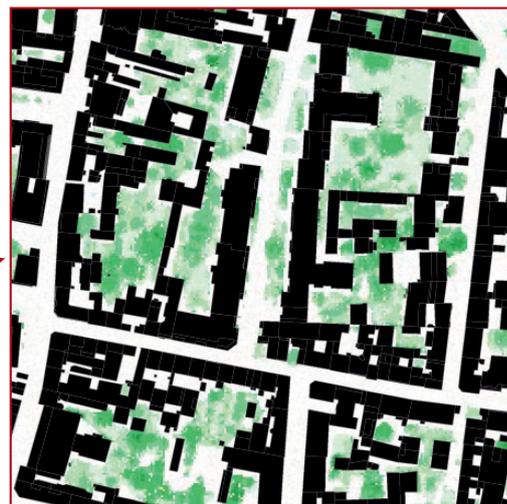
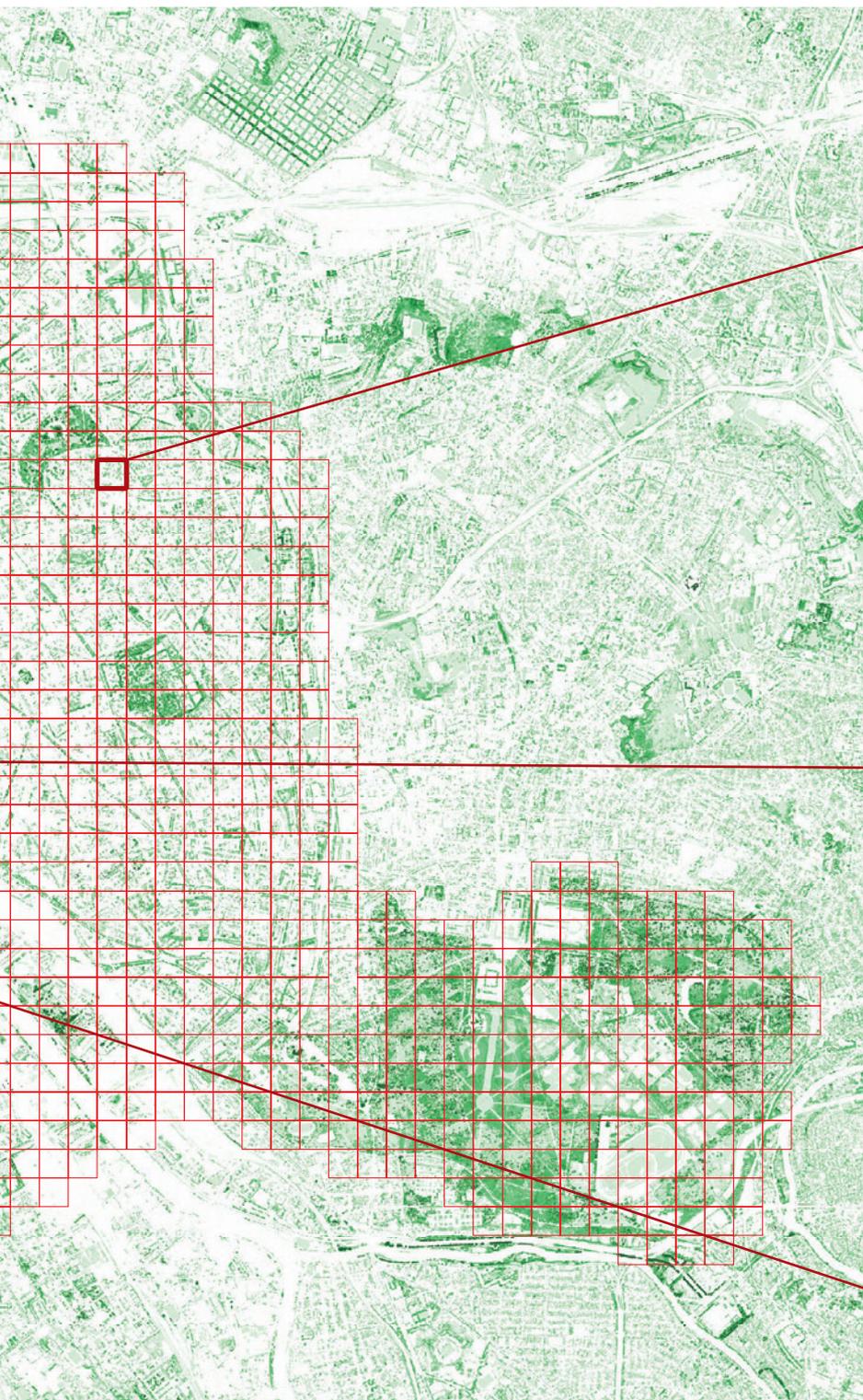


Figure 6 – Illustration de l'une des limites du projet EPICEA : la prise en compte de la végétation

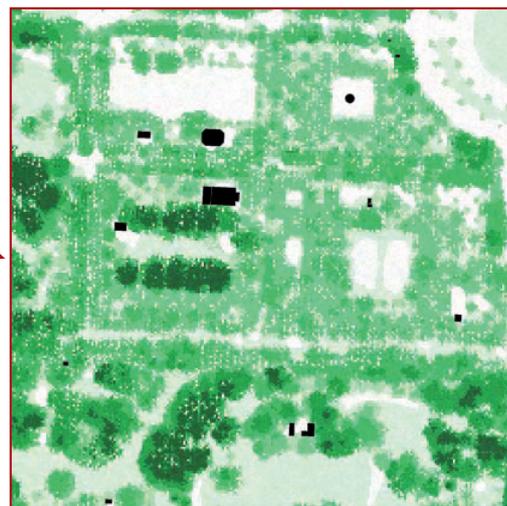




La végétation est également répartie sur le secteur, cette forme urbaine sera bien comprise par la modélisation



La végétation est très inégalement répartie sur le secteur, cette forme urbaine sera mal interprétée par la modélisation



La végétation occupe un secteur plus vaste que le carré de 250 m x 250 m, cette couverture végétale sera bien comprise par la modélisation



# 1 – Compréhension de l'ICU parisien : les grands facteurs d'influence du climat

En modifiant la topographie, en créant des volumes bâtis, en minéralisant les espaces, l'homme façonne la Ville et modifie dans le même temps le climat local. Les grands facteurs d'influence du climat de Paris sont : la présence de l'eau, de la végétation, le choix des revêtements du sol, des murs et des toits, la forme urbaine.

La Ville est aussi un lieu d'échanges et d'activités. Dans ce cadre, la Ville est grande consommatrice d'énergie. Cette énergie, une fois consommée, se dégradera sous forme de chaleur et participera aussi à la surchauffe urbaine.

On évaluera comment ces consommations d'énergie participe à l'ICU et comment leurs évolutions risquent d'impacter l'ICU.

## 1.1 L'eau

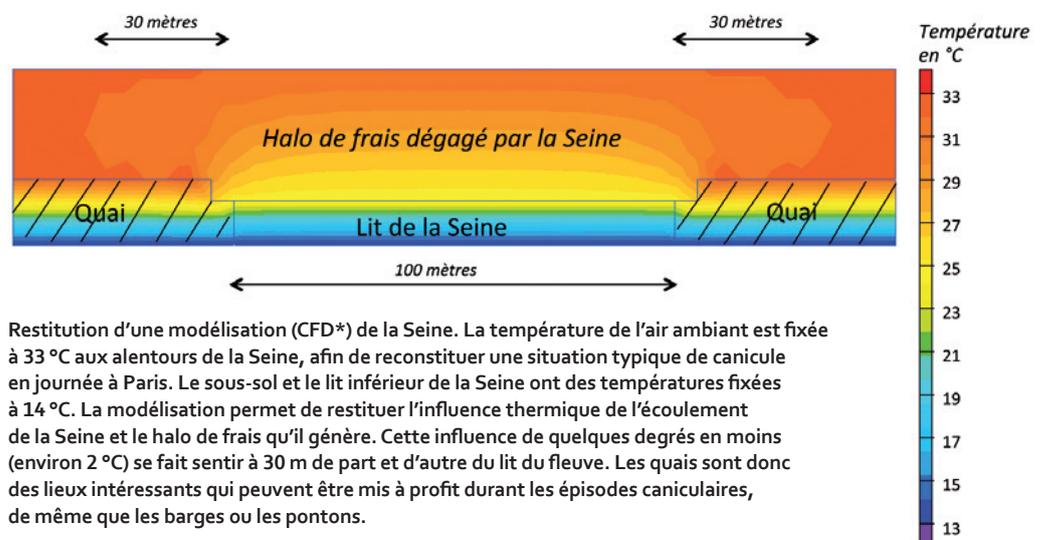
L'eau est omniprésente dans la ville. Elle est d'abord représentée par la Seine et les canaux, et puis de façon plus diffuse par les lacs et les rivières artificiels, les fontaines et les bassins. L'eau des canaux parisiens et de la Seine, via le réseau d'eau non potable de la Ville de Paris, est aussi utilisée pour arroser l'espace public et les végétaux de certains parcs et jardins. L'eau non

potable est utilisée de plus pour le nettoyage des voies publiques, par coulage de caniveau et engins mécanisés.

La Seine joue un rôle particulier dans le climat parisien. La scission géographique qu'elle opère sur le territoire a aussi une portée climatique. La Seine a un rôle de régulateur thermique de petite échelle. Dans les périodes les plus froides de l'année, elle sera plus chaude que l'air, dans les périodes les plus chaudes sa température sera plus basse que l'air. Ce phénomène est qualifié d'inertie thermique. Lorsque surviennent des épisodes caniculaires, la Seine qui est plus fraîche prélève de la chaleur à l'atmosphère. La zone de fraîcheur induite par l'écoulement de la Seine est très localisée, elle se fera sentir quelques dizaines de mètres de part et d'autre du fleuve, et donc principalement sur les quais hauts et bas. Le schéma figure 7 représente en coupe l'écoulement de la Seine un après-midi de canicule à Paris, on a représenté le halo de frais induit par l'écoulement du fleuve.

Lors des périodes caniculaires, si la différence de température nocturne est flagrante entre Paris et sa périphérie, en revanche la journée, aux heures les plus chaudes, cette différence est très modérée. La Seine est le seul lieu qui participe significativement au refroidissement de l'air en

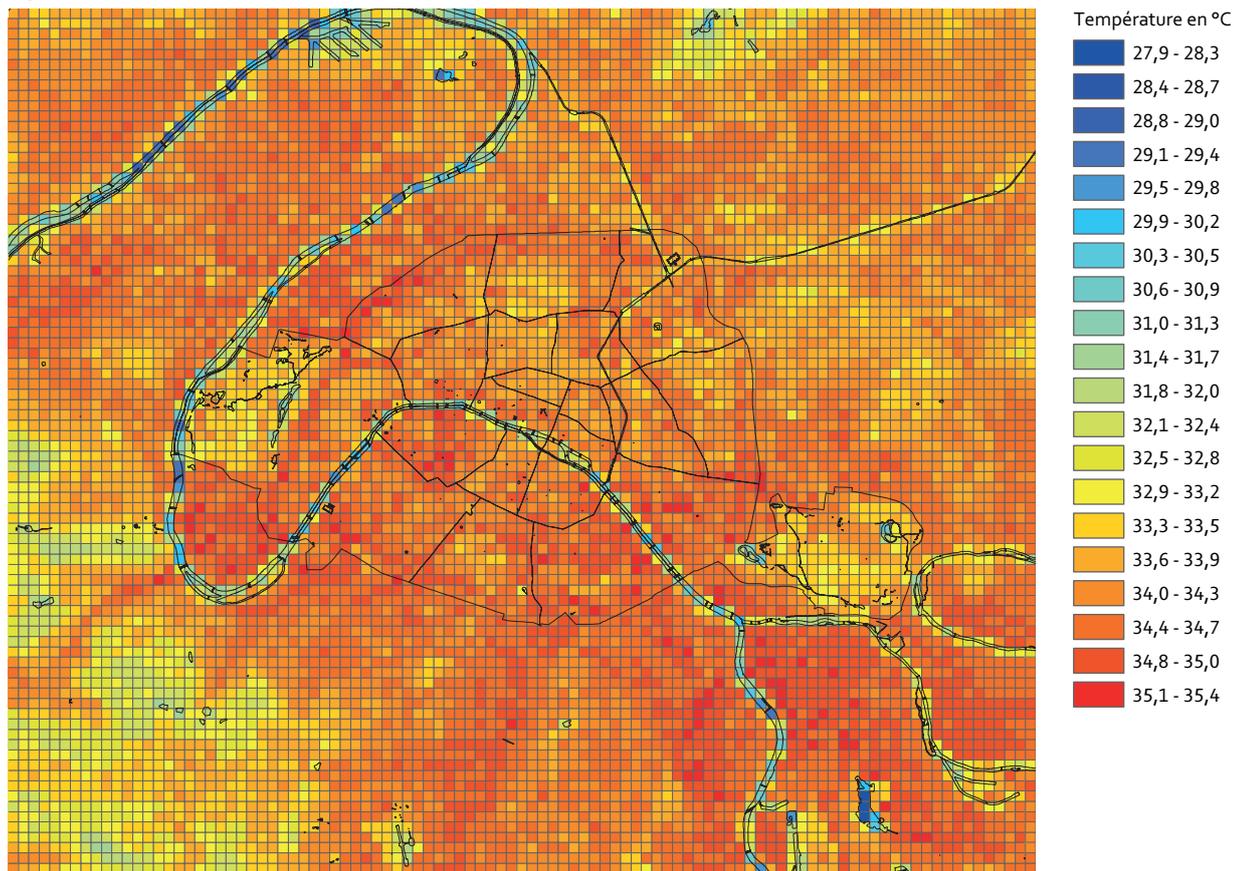
Figure 7 – Températures d'une vue en coupe de l'écoulement de la Seine



Restitution d'une modélisation (CFD\*) de la Seine. La température de l'air ambiant est fixée à 33 °C aux alentours de la Seine, afin de reconstituer une situation typique de canicule en journée à Paris. Le sous-sol et le lit inférieur de la Seine ont des températures fixées à 14 °C. La modélisation permet de restituer l'influence thermique de l'écoulement de la Seine et le halo de frais qu'il génère. Cette influence de quelques degrés en moins (environ 2 °C) se fait sentir à 30 m de part et d'autre du lit du fleuve. Les quais sont donc des lieux intéressants qui peuvent être mis à profit durant les épisodes caniculaires, de même que les barges ou les pontons.

\* CFD : Computational Fluid Dynamics

Figure 8 – Moyenne diurne de la température de l'air à 2 m du sol du 9 au 12 août 2003



Source : Étude EPICEA (2012)

journee, ce refroidissement est certes très localisé mais relativement efficace comme le montre la simulation figure 8 réalisée pendant la canicule 2003. **La Seine de par son écoulement et sa température agit un peu comme un circuit de refroidissement au cœur de la Ville : la Seine est capable de stocker de la chaleur prélevée à l'air ambiant et de l'évacuer.**

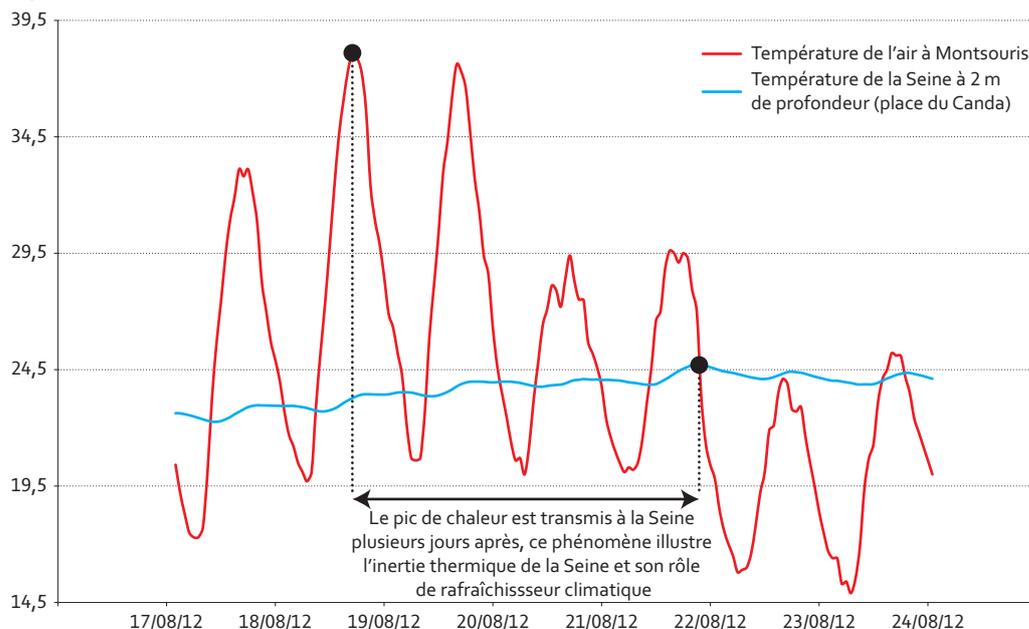
Lorsque Paris traverse un événement caniculaire ponctuel, la Seine de par son inertie mettra du temps à se réchauffer ce qui sera un atout pour le confort thermique des espaces publics environnants. La courbe de température figure 9 illustre la réaction thermique de la Seine au pic de chaleur rencontré du 18 et 20 août 2012; lorsque survient l'événement caniculaire, la surchauffe est transférée dans les basses couches de la Seine avec un fort amortissement et un décalage dans le temps.

Lorsque surviennent les canicules, de nuit la Seine continue à jouer son rôle de refroidisseur climatique et participe à la mise en route de « brises thermiques », ces vents qui apparaissent en Ville de façon très localisée la nuit lors du refroidissement nocturne. Leur organisation, certes très chaotique, s'articule autour de l'axe de la Seine, selon une logique difficile à définir tant elle est tributaire des conditions météorologiques propres à chaque événement caniculaire.

L'influence des canaux sur le climat local est beaucoup moins marquée que celle de la Seine, d'abord parce que leurs gabarits ont de faibles dimensions par rapport à celui de la Seine, mais aussi parce que l'eau ne s'y écoule quasiment pas, de ce fait il n'y pas de réel contraste thermique entre l'eau des canaux et l'air ambiant, on ne retrouvera pas ce phénomène de « pompe » à calories qui prévaut avec l'écoulement de la Seine.

L'autre rôle de l'eau dans la Ville est de participer au refroidissement de l'air par évaporation. L'évaporation est le phénomène physique de transformation de l'eau liquide en vapeur d'eau, l'évaporation consomme de l'énergie et donc prélève de la chaleur dans l'environnement. **L'effet induit de refroidissement se constate dès qu'il y a aspersion d'eau sur l'espace public (figure 11 et 12).**

Figure 9 – Comparaison entre la température de l'air et de l'eau de la Seine à 2 m de profondeur



Sources : Climatespace, Météo France (2012)

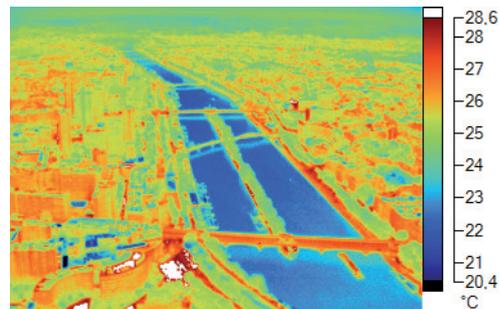


Figure 10 – Vue aérienne de la Seine, mettant en évidence la fraîcheur apportée par l'écoulement de la masse d'eau. Clichés du 2 août 2011 à 21h30 (19h30 UTC).

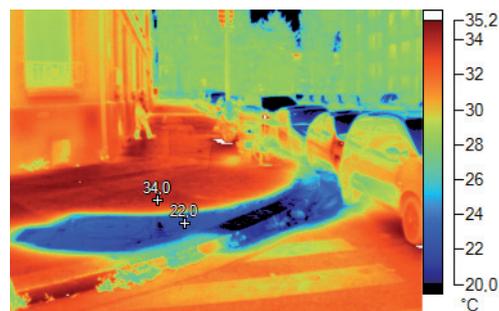


Figure 11 – Porte de Bagnolet le 25 juillet 2012 à 21h30 : effet de refroidissement induit par l'écoulement d'une bouche de lavage (refroidissement dû à l'écoulement et à l'évaporation). La zone arrosée est 12 °C plus fraîche que le restant du trottoir.

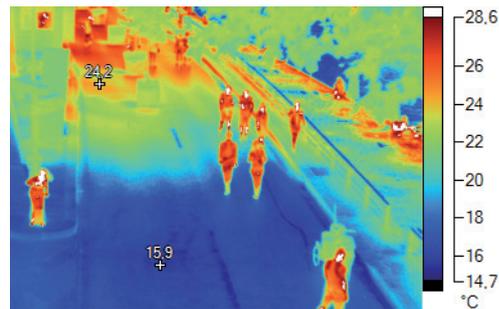
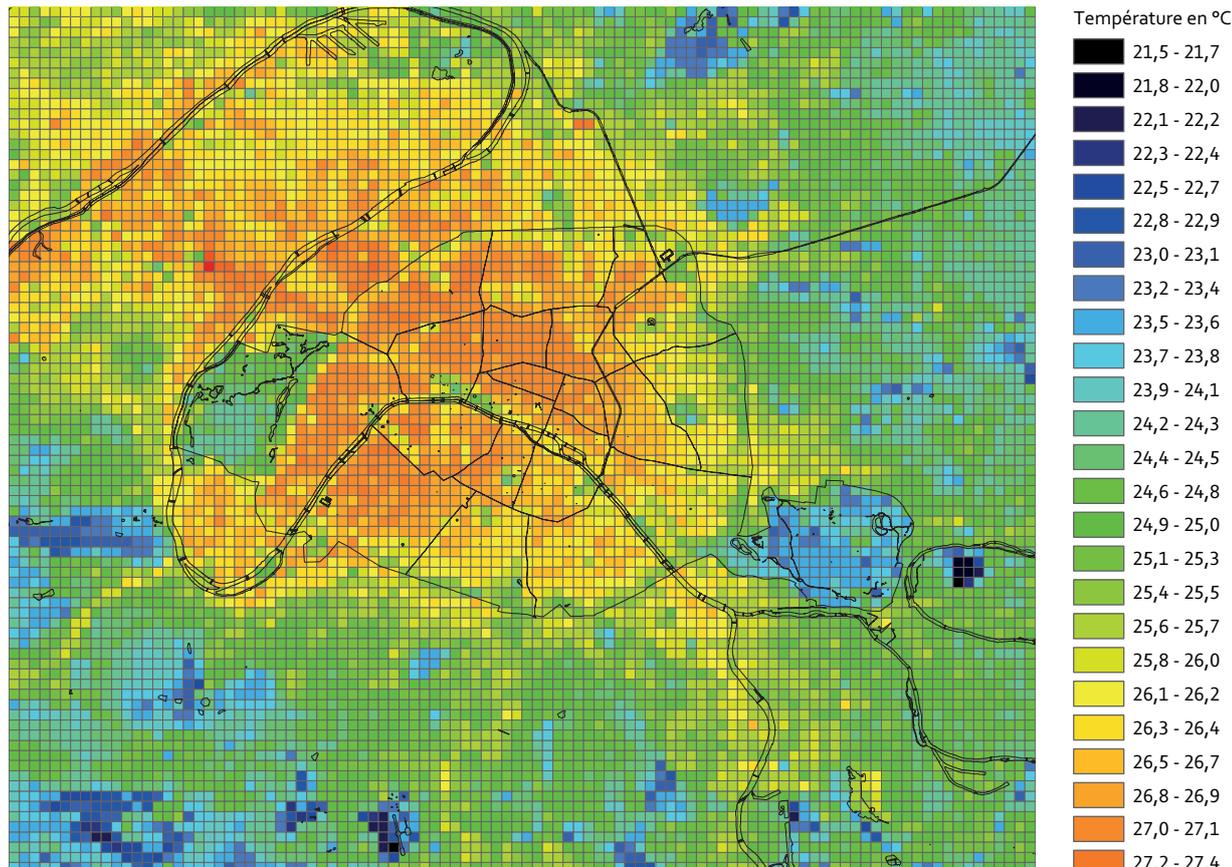


Figure 12 – Port des Célestins le 31 juillet 2011 à 21h30 : effet de refroidissement après aspersion de la chaussée. La température de la chaussée chute d'une dizaine de degrés.

Figure 13 – Température de l'air à 2 m du sol le 10 août 2003 à 6 h du matin (4h UTC).  
 Les zones les plus fraîches sont les plus végétalisées, on notera qu'à ce moment l'ICU se décale vers le Nord-Est en raison du vent thermique dominant.



Source : Étude EPICEA (2012)

## 1.2 La végétation

Tout comme l'eau, la végétation possède un impact important sur le climat urbain. On le constate durant les nuits de canicule, comme le montre la simulation réalisée durant la nuit du 10 août à 6h du matin (4h UTC), les zones les plus fraîches sont bien celles où la végétation est omniprésente (figure 13).

Plusieurs phénomènes sont en jeu avec la végétation. Le premier est l'évapotranspiration, elle concerne tous les types de végétaux : pelouses, arbustes, arbres à grand développement, etc. L'évapotranspiration qualifie la transformation d'eau liquide en vapeur d'eau qui a lieu lors de la photosynthèse ou lors de la régulation thermique des tissus de la plante. Cette évapotranspiration consomme de l'eau liquide qui est prélevée dans le sol et qui sera diffusée grâce à la plante dans l'air ambiant sous forme de vapeur d'eau. Ce processus consomme de l'énergie, cette dernière sera prélevée dans l'environnement et participera à son refroidissement. **Le végétal se comporte dans l'espace urbain un peu comme un climatiseur passif (figure 14-A).**

Le deuxième phénomène est lié à la volumétrie de la végétation. **Les arbres sont capables de**

**créer des ombres et donc des zones de confort sur l'espace public (figure 14-B).** La qualité de l'ombre sera tributaire de la densité foliaire. L'impact de cet ombrage se constatera aussi la nuit de façon différée, en effet les portions de l'espace public qui ont bénéficié d'un bon niveau d'ombrage pendant la journée ne s'échaufferont pas et ne stockeront pas d'énergie solaire, le soir ces espaces resteront froids et ne participeront pas à l'ICU.

Figure 14-A

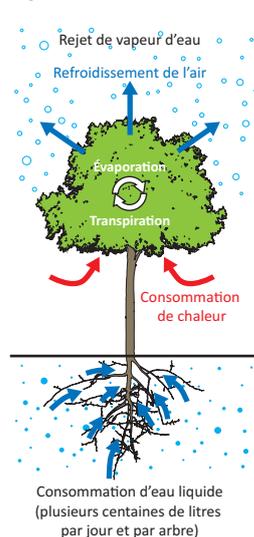


Figure 14-B

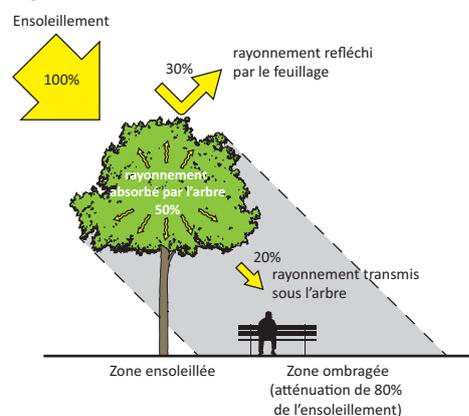
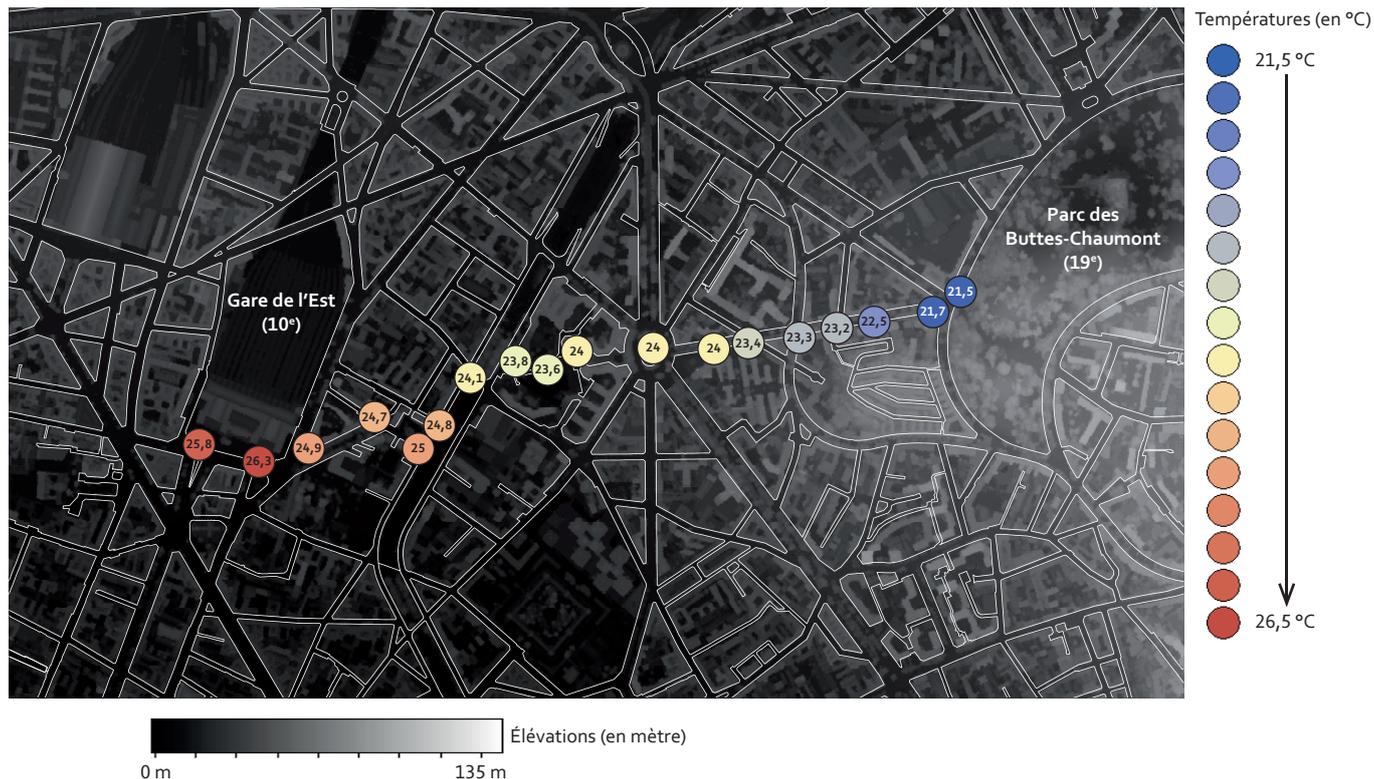


Figure 15 – Mesures de températures de l'air relevées entre la gare de l'Est et le parc des Buttes-Chaumont le 1<sup>er</sup> août 2011 vers 22h (20h UTC)



Dans une ville dense comme Paris, la végétation fera apparaître des contrastes climatiques importants. D'un quartier à l'autre, en l'espace de quelques dizaines de mètres, la température de l'air ambiant peut varier de quelques degrés. Un exemple (figure 15) est présenté entre la gare de l'Est et le parc des Buttes-Chaumont. Ce parcours, effectué à pied, dans la nuit du 1<sup>er</sup> août 2011 vers 22h (20h UTC), est réalisé durant environ 30 minutes afin que les conditions météorologiques n'évoluent pas trop entre le début du reportage

et sa fin. Sur le parcours, une différence de 4 °C est constatée entre le parvis de la gare de l'Est et l'entrée des Buttes-Chaumont. La présence du parc ainsi que le relief expliquent cette différence de température. À la lecture de ces données, un autre constat s'impose, l'influence du parc est extrêmement localisée, c'est dans les derniers mètres à l'approche du parc que la chute de température est la plus brutale. Comme mentionné précédemment l'influence du canal n'a pu être mesurée lors de ce parcours.

Le halo de frais généré par les grands espaces verts, et leur caractère extrêmement « local » peut être visualisé en thermographie infrarouge. Une vue aérienne (figure 16) du Champs de Mars permet de mettre en évidence le contraste thermique entre les pelouses et zones bâties avoisinantes. Les espaces dédiés aux piétons et à la circulation automobiles apparaissent nettement plus chauds. Ces clichés ont été pris le 2 août 2011 vers 20h (18h UTC) c'est-à-dire juste après le coucher du soleil.

Les grands espaces verts sont, tout comme la Seine, des générateurs de brises thermiques

urbaines. Le halo de froid qu'ils génèrent la nuit crée un contraste thermique suffisamment fort avec leur proche environnement urbain que l'air est appelé à s'écouler et à former une ventilation urbaine radiale bien particulière. Ces phénomènes sont très peu documentés aujourd'hui, ils jouent pourtant un rôle essentiel dans l'expression du confort thermique urbain. Ils jouent de plus un rôle dans la répartition de la pollution atmosphérique sur le territoire parisien lors des périodes anticycloniques sans vent, et rendent certaines zones plus sensibles que d'autres.

Figure 16 – Vues aériennes du champs-de-Mars prises le 2 août 2011 vers 20h (18 UTC) peu après le coucher du soleil

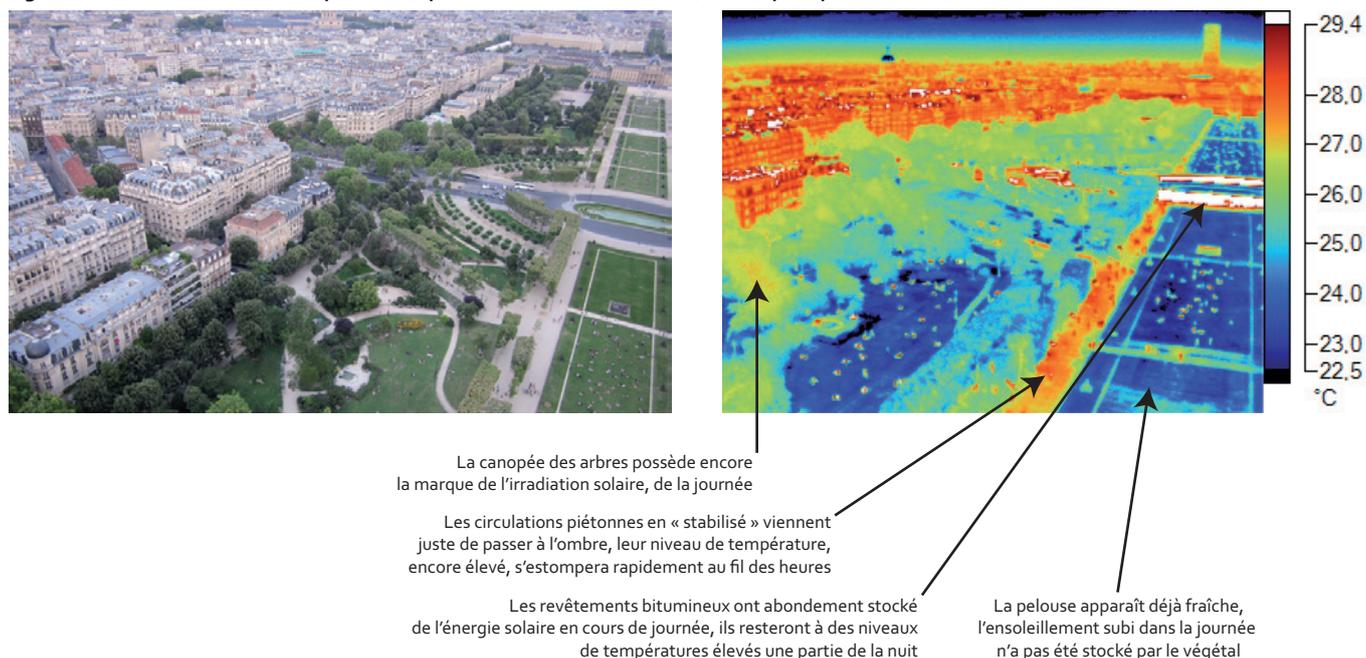
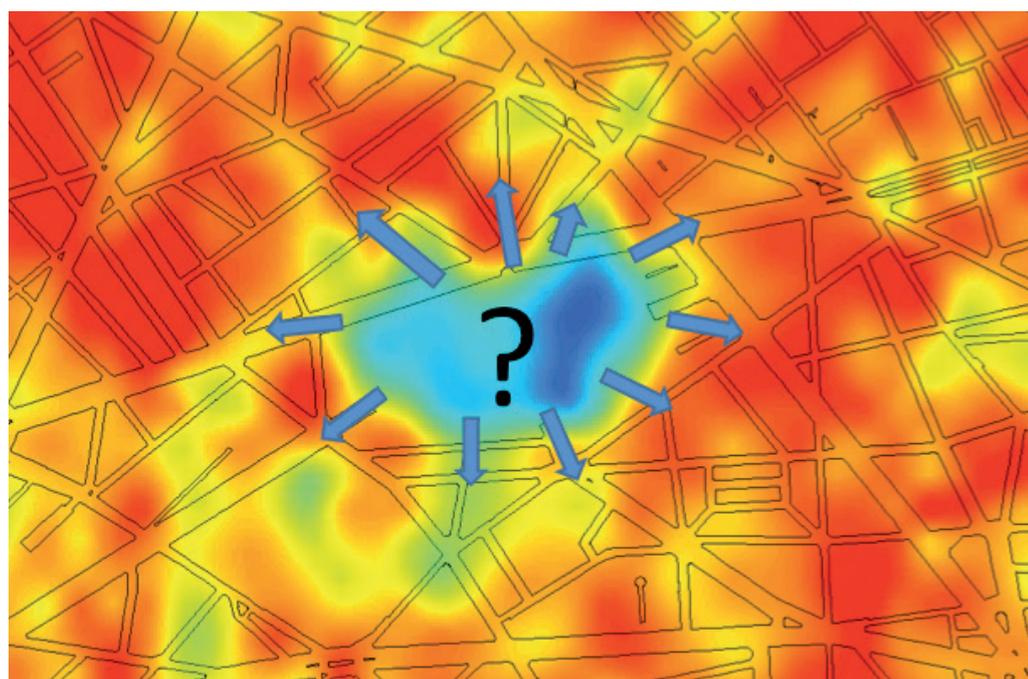


Figure 17 – Schématisation du phénomène de brise thermique dans un parc urbain : si le principe de ventilation radiale est connu, sa déclinaison locale reste encore insuffisamment documentée



### 1.3 Les revêtements de l'espace public

Le type de matériaux employé sur l'espace public a un impact direct sur la température des espaces urbains. Les surfaces minérales, à l'inverse des surfaces végétales, sont capables de stocker de grandes quantités d'énergie lorsqu'elles sont ensoleillées. Cette énergie sera restituée à l'environnement la nuit et participera à la formation de l'ICU. Un premier exemple (figure 18) montre la différence de comportement thermique entre les surfaces minérales et végétales. Ce cliché, pris sur le bassin de l'Arsenal après le coucher du soleil, fait ressortir, la nette différence de température qui existe entre les pavés de grès et la pelouse adjacente.

Il est possible de comparer entre eux les différents matériaux de revêtements de chaussées et de trottoirs. Deux critères permettent de les classer: leur couleur et leur rugosité. Plus les matériaux sont lisses et clairs, plus ils sont « froids », comme

par exemple le marbre ou la pierre de calcaire dur. À l'inverse, les matériaux sombres et rugueux seront considérés comme « chauds », comme l'asphalte ou le béton bitumineux (figure 19).

Si la typologie des revêtements parisiens suit une nomenclature assez récurrente sur l'espace public, les opérations d'aménagement des années 60 ainsi que les zones d'aménagement concertées (ZAC) des années 80 à Paris font l'objet de traitements spécifiques. Les revêtements employés, propres à chaque aménagement, répondent à des critères esthétiques qui auront malgré eux des impacts thermiques parfois difficile à quantifier (figure 20).

À ce stade il semblerait légitime de réaliser une classification des matériaux de sol selon les critères que nous venons de définir: la couleur et la rugosité. En réalité d'autres critères doivent rentrer en considération avant de se lancer dans cet exercice, nous les aborderons dans la partie « mesures ponctuelles d'adaptation ».

#### TEMPÉRATURE DE REVÊTEMENT DE L'ESPACE PUBLIC

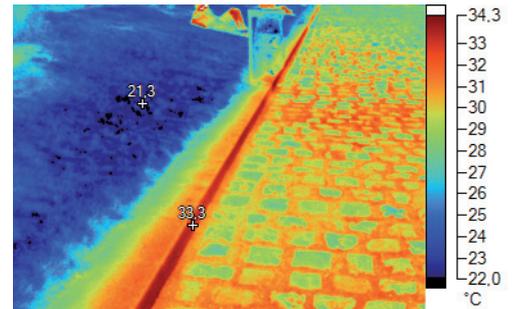


Figure 18 – Bassin de l'Arsenal, le 1<sup>er</sup> août 2011 à 20h (18h UTC)

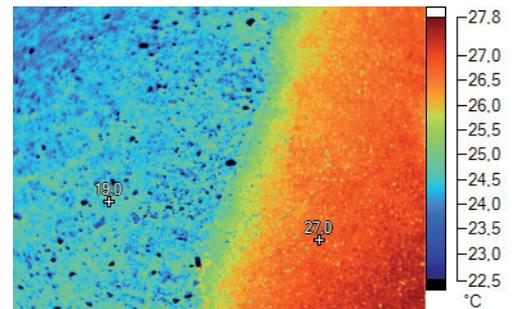
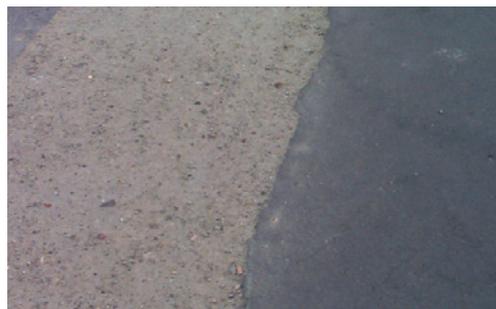


Figure 19 – Comparaison de deux revêtement de trottoir 1 heure après le coucher du soleil le 31 juillet 2011. Le stabilisé (à gauche) est nettement plus frais que l'asphalte (à droite), c'est leur différence de couleur qui l'explique.

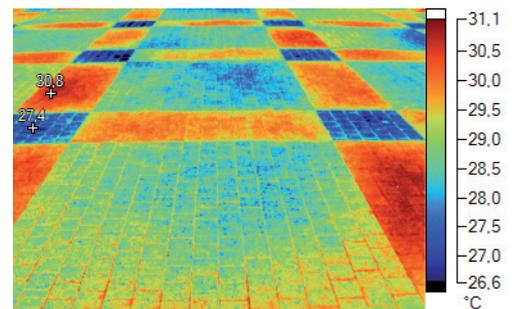
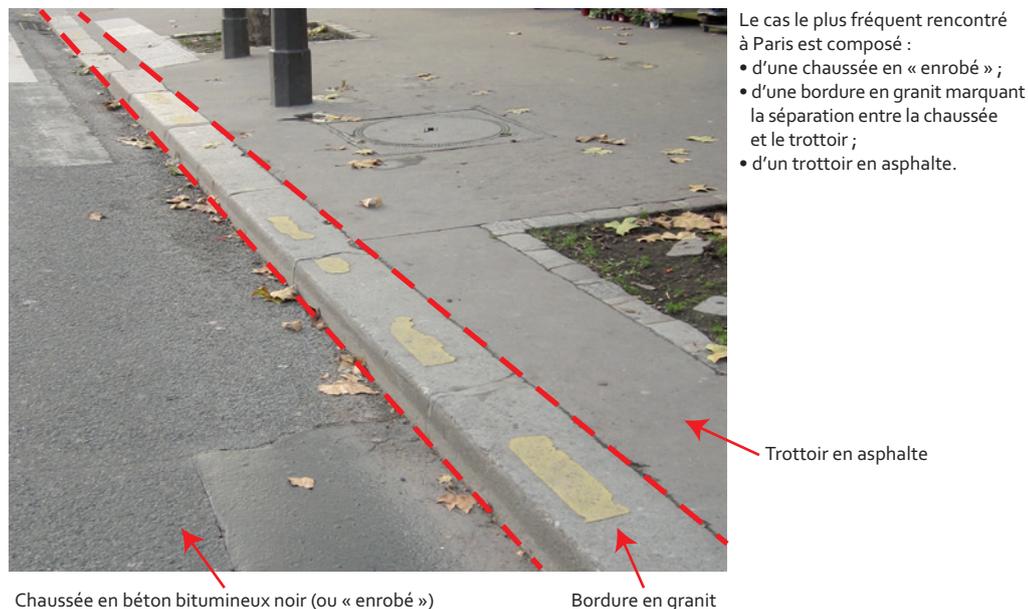


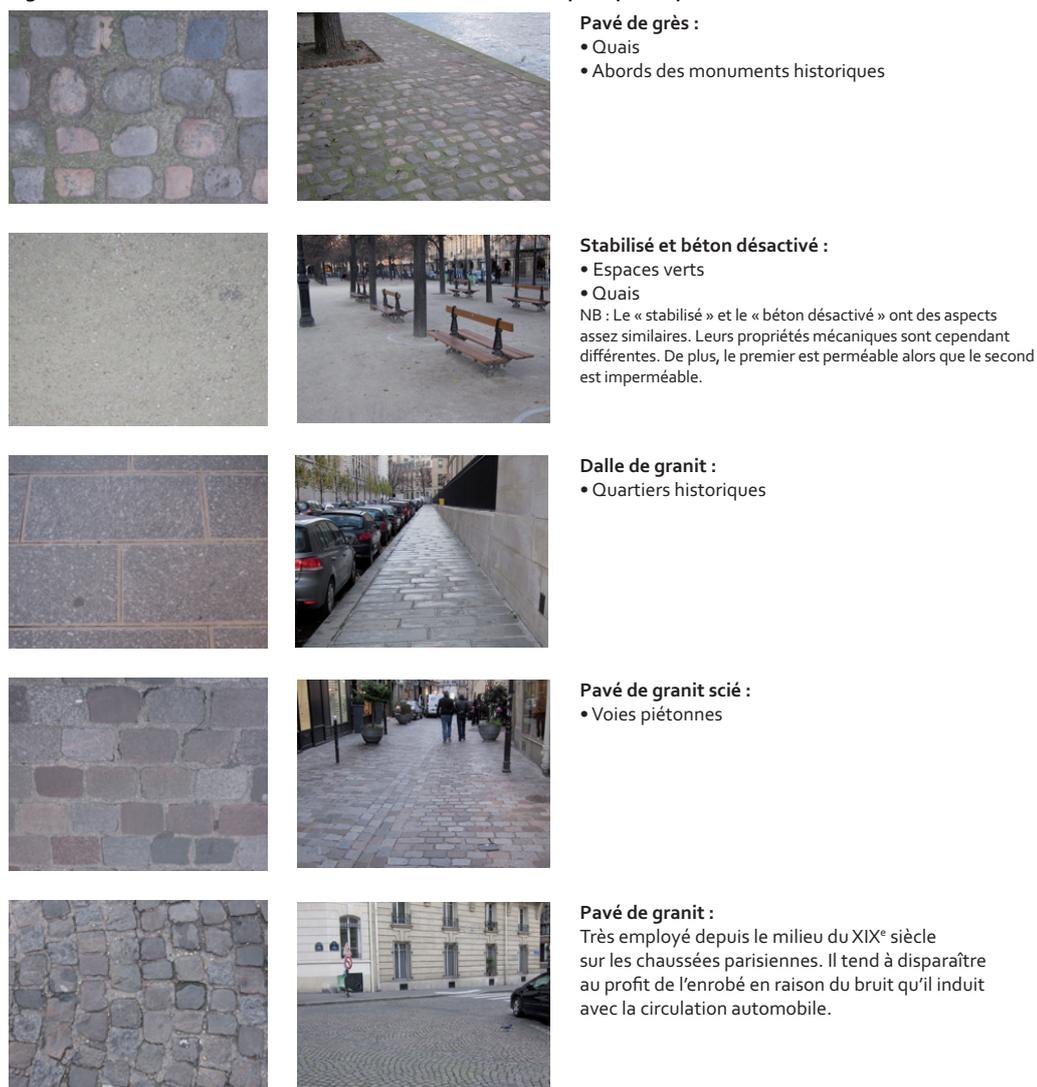
Figure 20 – Signature radiative nocturne d'une composition de revêtement de sol à la ZAC de la Grange-aux-Belles le 1<sup>er</sup> août 2011 vers 22h (20h UTC)

## Figure 21 – Revêtements de l'espace public couramment employés à Paris

Les revêtements de l'espace public parisien obéissent à une nomenclature récurrente basée sur des critères techniques et esthétiques. La nature des matériaux doit être mécaniquement compatible avec les grands types d'usages auxquels ils sont dédiés : circulation piétonne pour les trottoirs, circulation de bus, voitures, camions et vélos pour les chaussées. La couleur de ces matériaux participe de l'identité de Paris, elle fait donc elle aussi l'objet d'un choix.



## Figure 22 – Autres matériaux couramment rencontrés sur l'espace public parisien



## 1.4 Les matériaux employés dans les bâtiments

Les revêtements utilisés sur les façades parisiennes posent des questions similaires à celles rencontrées sur l'espace public. Les bâtiments construits avant 1914 à Paris présentent des façades relativement claires car souvent enduites ou en pierres claires apparentes ce qui les rend assez réfléchissantes. À l'inverse leur grande inertie leur donnera de grandes capacités de stockage de l'énergie solaire, et donc en fera de bons pièges à calories. Ce point, si défavorable soit-il, est très tributaire de la largeur des rues : une rue étroite voit peut le soleil et donc rend la question de colorimétrie et de l'inertie des murs plutôt secondaire. L'entre-deux-guerres voit se développer l'usage de la brique dont la teinte rouge aura des capacités de stockage de l'énergie solaire plus marquée. Ensuite, après-guerre, l'industrialisation des procédés constructifs permet l'usage d'une grande diversité de matériaux et de revêtements

de façades aux propriétés radiatives très variées comme les pattes de verre, les résines plastiques, les modules en aluminium ou en bois. Envisager ces questions de façon exhaustive semble difficile, les questions devront donc être tranchées au cas par cas selon les situations urbaines étudiées.

Les toitures parisiennes sont plus simples à aborder de façon typologique. Deux grands types de toitures cohabitent à Paris, les toits terrasses qui sont adoptés dans la construction à partir des années 30 et les toitures inclinées (« à la française » ou « à la Mansart ») en zinc, ardoise, voire tuile, largement employées dans les constructions d'avant 1914.

Les toits terrasses peuvent s'avérer problématique pour les occupants du dernier étage lorsqu'ils ne sont pas isolés. En effet, on rencontre de nombreux cas où les revêtements de toitures sont de type bitumineux, les niveaux de température en plein soleil de ces toitures peuvent excéder les 50 °C.

Figure 23 – Quelques toitures parisiennes



Toiture à la Mansart en zinc : le zinc réfléchit les rayons du soleil en journée ce qui est un avantage pour le microclimat urbain, mais sa faible inertie rend les logements sous toitures assez inconfortables.



Toiture terrasse recouverte de graviers : la grande quantité d'air prisonnière entre les graviers confère peu de capacité de stockage du rayonnement solaire à ces toits ce qui est un atout climatique.

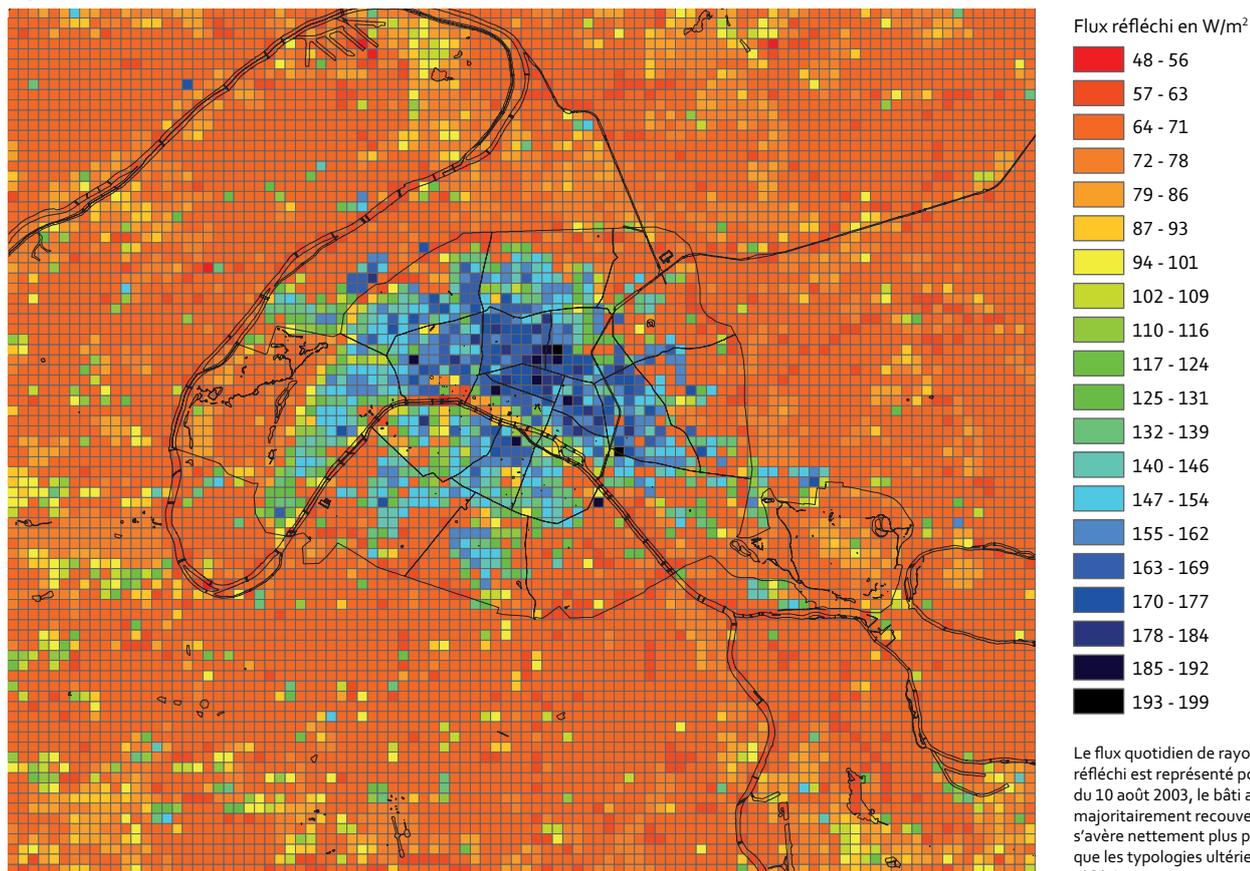


Toiture terrasse avec revêtement bitumineux (« shingle ») : ce revêtement peut atteindre des niveaux très élevés de température sous l'influence du rayonnement solaire, et restera chaud plusieurs heures après le coucher du soleil. Il participera donc à la formation de l'ICU.

Figure 24 – Bâtiment avec couverture en zinc en cours de démolition. La zone située sous toiture est généralement investie par les occupants qui se privent ainsi d'une coupure thermique créée par l'air. Sur cette image l'espace sous toiture ne représente pas une plus value particulière en terme de volume habitable, dans beaucoup d'immeubles parisiens les gains obtenus seront importants et permettront d'installer par exemple des mezzanines ou des rangements.



Figure 25 – Flux solaire réfléchi vers l'espace



Le flux quotidien de rayonnement visible réfléchi est représenté pour la journée du 10 août 2003, le bâti ancien de Paris, majoritairement recouvert de zinc, s'avère nettement plus performant que les typologies ultérieures car plus réfléchissant.

Source : Étude EPICEA (2012)

À l'inverse les graviers, qui recouvrent nombre de toits terrasses à Paris, sont beaucoup plus intéressants d'un point de vue microclimatique. La couche de gravier qui recouvre les terrasses est composée en grande partie de vides d'air qui ne confèrent aucune inertie au revêtement, les capacités de stockage sont donc faibles. Dans les bâtiments d'avant 1914, la couverture en zinc est de rigueur; l'ardoise a été aussi employée avec le zinc mais uniquement sur les brisis (partis les plus inclinée du toit à la Mansart). Ces couvertures sont des structures légères qui transmettent très bien la chaleur solaire à l'intérieur des combles. Les problèmes de surchauffes qui existent aujourd'hui dans les combles des bâtiments sont en partie liés au fait que les espaces sous toitures, traditionnellement

inoccupés, sont fréquemment investis par les occupants des derniers étages. Ces espaces servaient initialement de tampon thermique, le vide d'air qu'ils créaient permettait d'opérer une coupure thermique et de tempérer le faible niveau de confort thermique des derniers étages.

Si la couverture en zinc peut être vécue comme une source d'inconfort pour les habitants des derniers étages, à l'échelle macroscopique urbaine elle peut être comprise comme un atout. Cette couverture possède un réel avantage par rapport aux toits terrasses : elle est extrêmement réfléchissante, et ce même lorsqu'elle est oxydée (albédo de 0,6), elle est donc capable de renvoyer vers l'espace une part du rayonnement solaire incident (figure 25).

## 1.5 La forme urbaine

L'ICU se manifeste surtout la nuit car les surfaces qui ont emmagasiné de l'énergie solaire dans la journée restent chaudes même après le coucher du soleil. Le principal facteur de refroidissement durant la nuit est la présence d'un ciel dégagé. Dans un contexte urbain où l'on trouve des constructions hautes et des rues peu larges, la « quantité de ciel » que nous voyons quand nous levons la tête depuis l'espace public est réduite; dans ce cas le refroidissement nocturne sera très fortement contraint (figure 26). Inversement, la quantité de chaleur solaire que peut stocker un espace public est elle aussi intimement tributaire de la forme urbaine, une forme urbaine qui « voit peu » le ciel ne s'échauffera que faiblement, car le soleil atteindra difficilement le sol dans la journée.

Une bonne façon de visualiser les propriétés de refroidissement et d'échauffement des formes urbaines est d'adopter une visualisation du ciel avec un appareil photographique de type très grand angle. Deux exemples pris dans le 4<sup>e</sup> arrondissement sont présentés figure 27 :

- une vue prise depuis Beaubourg, un espace que l'on qualifiera de dégagé et propice au refroidissement nocturne, mais qui recevra beaucoup d'énergie solaire en journée;
- une vue prise depuis la rue Geoffroy Langevin, une rue très étroite du Marais qui possède une faible vue sur le ciel, son refroidissement nocturne est donc faible, mais elle captera peu d'énergie solaire en journée.

Cette première approche qualitative permet de dégager deux extrêmes en matière de forme urbaine:

- les formes denses et compactes qui voient peu le ciel, que l'on trouve dans les tissus les plus anciens de Paris s'échauffent faiblement avec l'insolation journalière mais ne possèdent pas de grandes capacités de refroidissement la nuit;
- les formes urbaines très « diluées », de type périurbaines, s'échauffent fortement à cause de l'insolation journalière mais peuvent se refroidir efficacement la nuit.

Afin d'illustrer ce type de contraste, on a relevé en fin de journée la température de l'air à proximité du centre Pompidou (figure 28). Entre l'esplanade et les rues adjacentes, soit environ 150 mètres, il existe une différence de 2 °C. Cette différence est imputable à la forme urbaine. L'ensoleillement de ce 1<sup>er</sup> août est très inégal sur le secteur, la rue Geoffroy Langevin par exemple est très abritée du soleil alors que l'esplanade est très ensoleillée (figure 29), cette différence se traduira par une différence de température de 2 °C en fin de journée.

Les tissus les plus anciens de Paris ont des gabarits hérités de l'époque médiévale. À cette époque, la question du confort urbain se résume à une seule chose : assurer un minimum de confort dans les bâtiments en l'absence de tout système de chauffage. La solution retenue est d'opter pour une forte mitoyenneté des bâtiments et des rues étroites. La forte mitoyenneté permet aux logements de minimiser leurs parois donnant sur l'extérieur (qui font rentrer du froid dans les logements), et les rues étroites permettent de mettre les bâtiments à l'abri des phénomènes de vent et du refroidissement nocturne.

Figure 26 – Le « facteur de vue du ciel » (SVF) est un indicateur qui permet d'évaluer la facilité avec laquelle se produit le refroidissement nocturne par échange radiatif avec le ciel. En zone rurale ce refroidissement est maximum (SVF = 1), en ville il est contraint par la présence des bâtiments (SVF < 1).

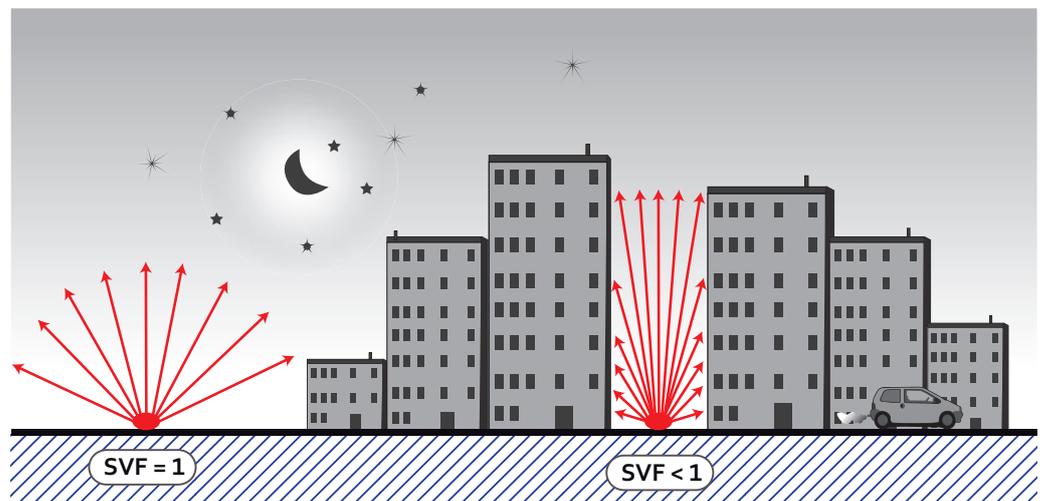


Figure 27 – Facteur de vue du ciel à proximité du Centre Pompidou (4°)



**Parvis de Beaubourg** : Vue dégagée sur le ciel (SFV>80%)  
 - Fort niveaux d'ensoleillement en journée  
 + Fort niveau de refroidissement nocturne



**Rue Geoffroy Langevin** : Peu de vue sur le ciel (SFV<40%)  
 + Faible niveau d'ensoleillement en journée  
 - Faible potentiel de refroidissement nocturne

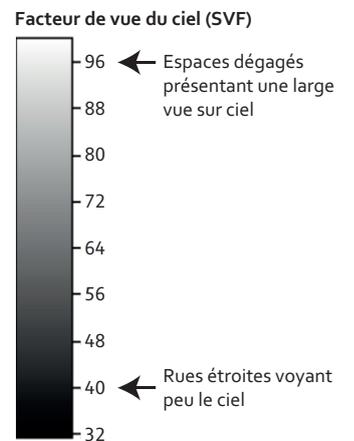


Figure 28 – Températures de l'air relevées à proximité du centre Pompidou le 1<sup>er</sup> août 2011 à 19h (17h UTC)

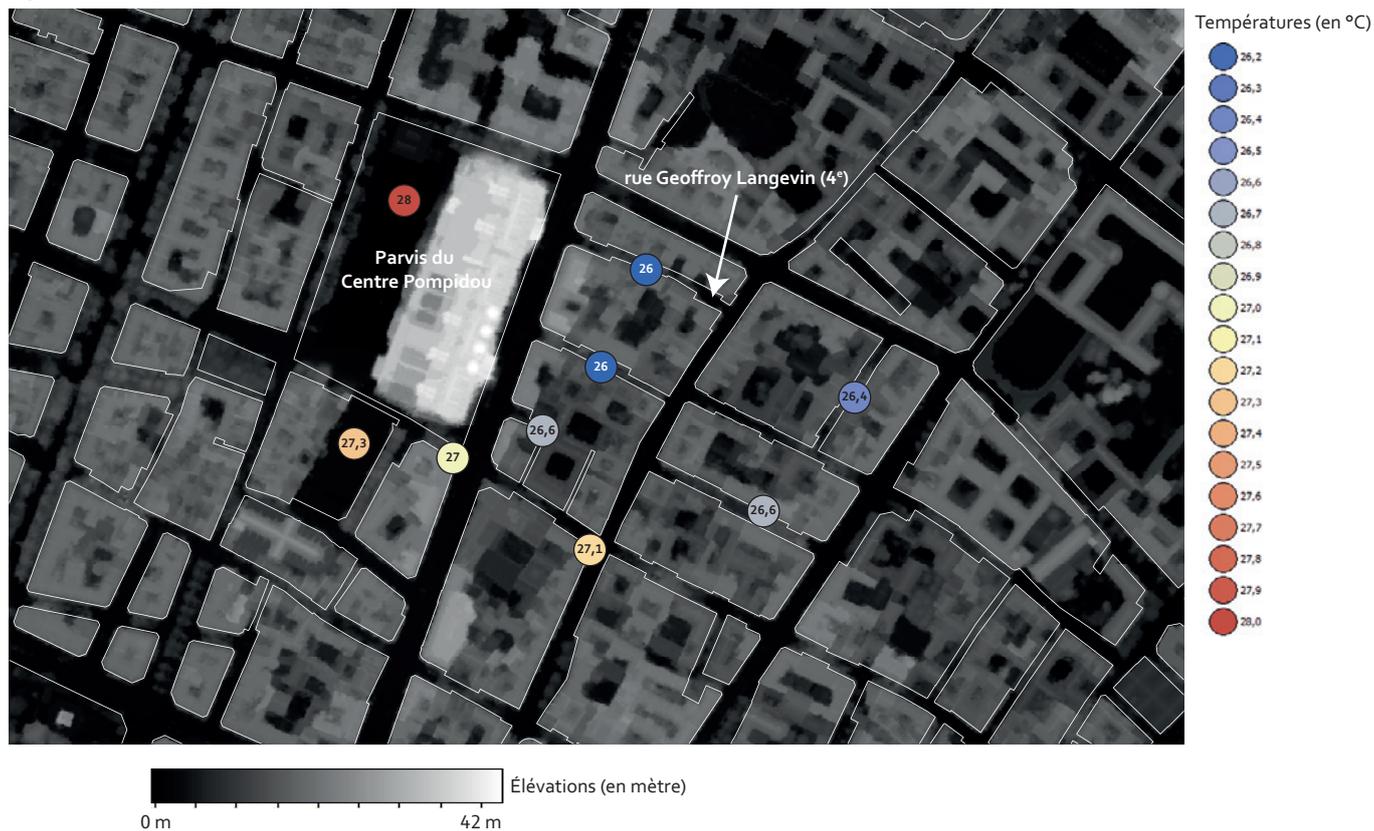
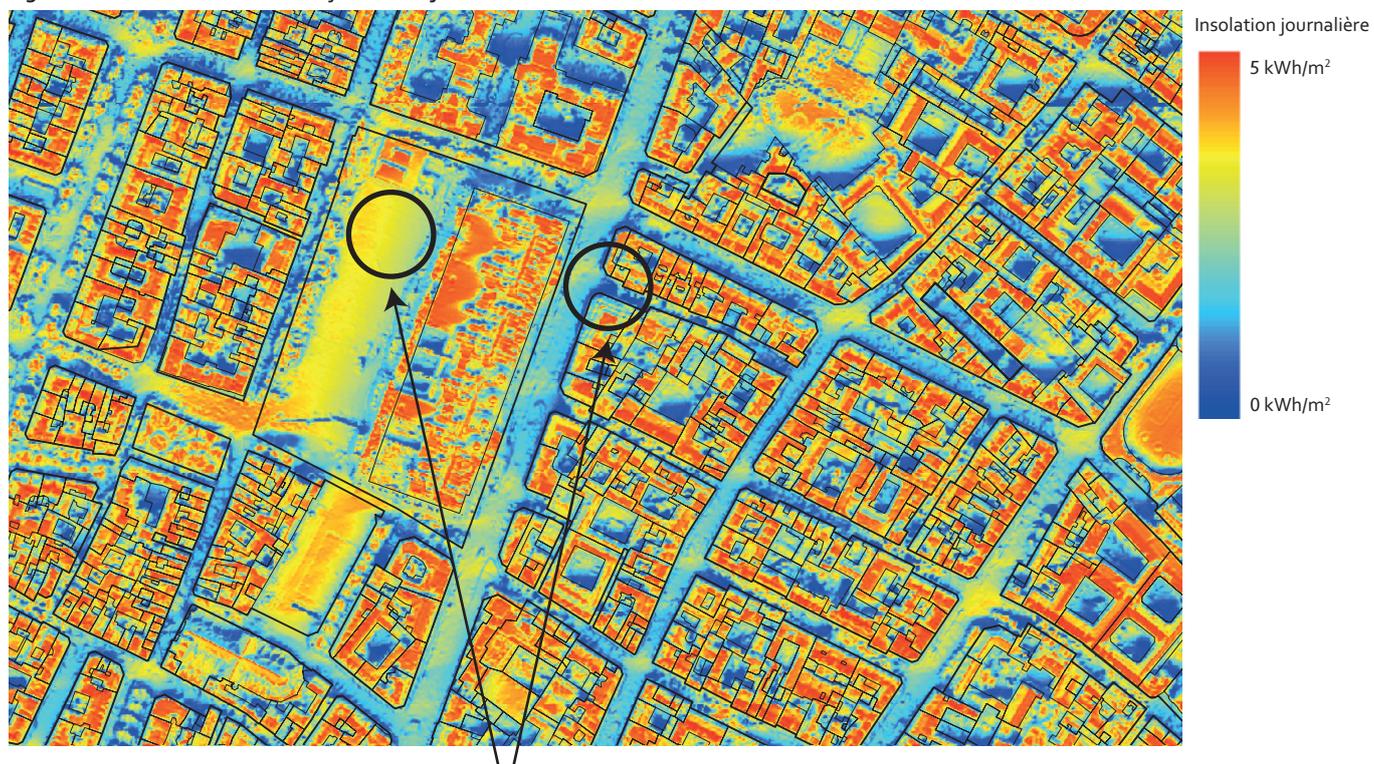
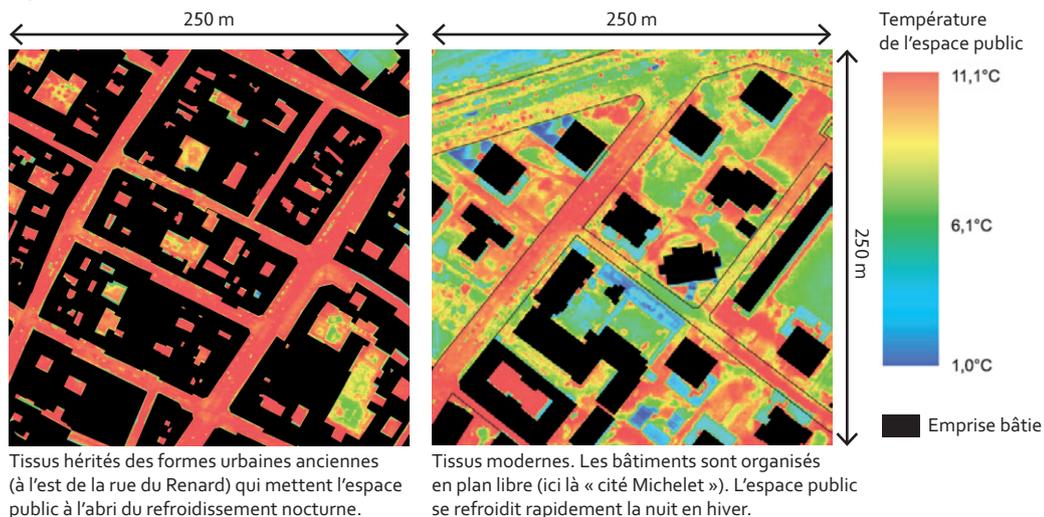


Figure 29 – Calcul de l'insolation reçue dans la journée du 1<sup>er</sup> août 2011



L'ensoleillement des deux types d'espaces publics au cours de la journée du 1<sup>er</sup> août est très différent. En fin de journée, une différence de 2 °C est constatée entre la rue étroite Geoffroy Langevin et l'esplanade de Pompidou. Au cours de la nuit la température de l'esplanade redescendra vraisemblablement plus rapidement en raison d'une vue vers le ciel plus dégagée.

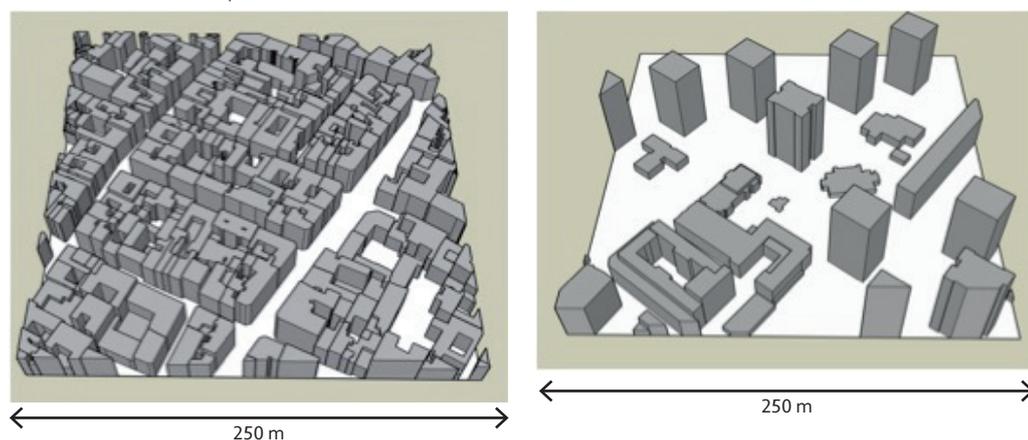
Figure 30 – Comportement climatique des 2 formes urbaines en hiver



Clichés pris la nuit du 6 mars 2009.

Figure 31 – Comparaison qualitative des atouts et inconvénients de deux formes urbaines parisiennes

Les deux exemples de formes urbaines présentent des caractéristiques thermiques très différentes. Les mesures de lutte contre les ICU à mettre en place dans chacune d'elles seront vraisemblablement différentes elles aussi.



Tissus hérités des formes urbaines anciennes :

- + Le sol est à l'abri de l'ensoleillement journalier grâce aux rues étroites
- Le refroidissement nocturne est ralenti

Tissus modernes issus de la reconstruction :

- Le sol s'échauffe facilement dans la journée car le tissu urbain est très peu dense
- + Le refroidissement nocturne est efficace

Cette différence entre les tissus très anciens et les tissus modernes est démontrée par une thermographie aérienne prise en hiver la nuit du 6 mars 2009 (figure 30). Dans les tissus anciens, la forte densité bâtie et le faible rapport au ciel protègent l'espace public du refroidissement nocturne, ce qui est un avantage en hiver mais un inconvénient en été.

Une comparaison du comportement estival des formes urbaines de Paris et de la petite couronne a pu être menée grâce aux simulations d'EPICEA. On retrouve la dichotomie énoncée précédemment à savoir que les formes très denses ou très ouvertes possèdent chacune leurs

avantages et leurs inconvénients. À ce stade un travail plus fin doit être mené afin de déterminer la performance des formes urbaines rencontrées à Paris, des indicateurs de confort doivent être construits pour tester la robustesse des différents tissus. Au-delà des 2 formes urbaines évoquées ici, les différentes époques d'urbanisation de Paris ont induit des choix urbains et des formes urbaines multiples dont il conviendra de clarifier avec précision le comportement microclimatique.

## 1.6 Les activités humaines

Les activités humaines, quelles que soient leur nature, sont tributaires de consommations d'énergie. Les déplacements, les activités de bureau, la production d'eau potable, la cuisson d'aliments, etc. sont rendus possibles par l'utilisation de sources d'énergie. Les énergies couramment employées en ville sont le gaz, le fioul, le charbon et l'électricité. Dès que nous consommons de l'énergie, nous procédons en réalité à une transformation physique de l'énergie dont le stade ultime se traduit par un dégagement de chaleur. **Ainsi toute consommation d'énergie participe à l'élévation de température de notre environnement.**

Cette constatation est évidente dans le cas du chauffage puisque dans ce cas le but recherché est précisément de profiter du dégagement de chaleur qui survient lors de l'usage de la source d'énergie. Du gaz brûlé dans une chaudière sert à produire de l'eau chaude qui alimentera un radiateur qui servira lui-même à chauffer une pièce. Si c'est parfaitement évident dans ce cas, ça l'est moins pour les usages que nous avons de l'électricité. La chaleur dégagée par les appareils électriques est plutôt bien vécue en hiver puisque cette externalité est positive pour l'occupant d'un logement, en revanche pendant les périodes caniculaires cette externalité devient négative. Un chargeur de batterie, un ordinateur, un réfrigérateur ou même un ventilateur dégagent de la chaleur et peuvent rendre la température ambiante d'un logement rapidement insupportable. **Toutes les consommations d'énergies en ville participent donc au**

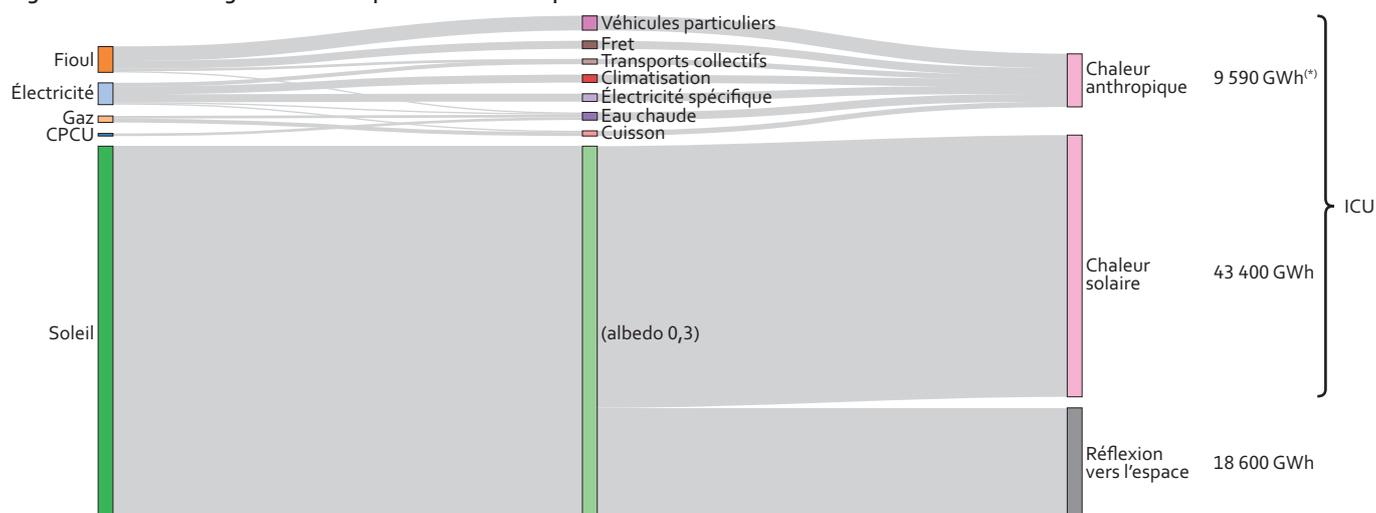
**réchauffement microclimatique et à la formation de l'ICU.** Il convient donc de mesurer ces émissions de chaleur « anthropiques » et de quantifier la part de responsabilité de l'activité humaine dans l'ICU.

Dans la formation de l'ICU, deux phénomènes s'additionnent : la radiation solaire qui participe à l'échauffement des surfaces et la chaleur d'origine anthropique. Afin d'illustrer la part de responsabilité qui incombent aux activités humaines dans la formation de l'ICU on a reconstitué les flux énergétiques qui transitent sur le territoire parisien durant les 5 mois de l'année les plus propices à l'apparition de l'ICU. La période étudiée va de mai à septembre. Ces mois sont aussi les mois de l'année où les systèmes de chauffage ne sont pas sollicités pour chauffer les bâtiments mais uniquement pour produire de l'eau chaude.

Le schéma figure 32 représente les flux d'énergie qui transitent sur le territoire parisien de mai à septembre 2009. Sur la gauche sont représentés les flux d'énergies fossiles, d'électricité et de vapeur d'eau qui convergent vers Paris, la plupart du temps via des réseaux, ainsi que le flux solaire, c'est-à-dire le rayonnement solaire reçu jour après jour durant les 5 mois étudiés.

Le fioul, l'électricité, le gaz ou la vapeur d'eau sont mis à disposition des activités humaines pour différents usages répertoriés au centre du graphique (véhicules particuliers, fret, transports collectifs, climatisation, électricité spécifique, eau chaude, cuisson). Comme mentionné précédemment, ces usages se soldent dans tous les cas par des émissions de chaleur dans

Figure 32 – Bilan d'énergie du territoire parisien de mai à septembre 2009



(\*) GWh (pour « Giga Watt heure ») est une quantité d'énergie. Une ampoule de 100 Watts qui fonctionne pendant 10 heures consomme 1 kWh (pour « kilo Watt heure »). 1 GWh c'est 1 million de kWh.

Source : CEREN (2011)

l'environnement, elles sont nommées « chaleur anthropique » dans la partie droite du graphique. Leur total correspond à la contribution des activités humaines dans la formation de l'ICU.

L'énergie solaire incidente est réfléchiée directement vers l'espace pour une faible part (évaluée à 1/3) et ne participe pas à l'ICU. Cette part est difficile à évaluer par le calcul, elle est fixée ici intuitivement par l'auteur. La valeur retenue peut paraître élevée, elle a été retenue en raison du caractère fortement réfléchissant des couvertures en zinc, quasi systématiquement employées dans le bâti antérieur à 1950 à Paris. Enfin, les 2/3 de l'énergie solaire incidente sont absorbés par les surfaces minérales de Paris et participeront à la formation de l'ICU, ils figurent sur la droite du diagramme sous l'intitulé « chaleur solaire » (une part infime sert à la photosynthèse, elle est négligée ici).

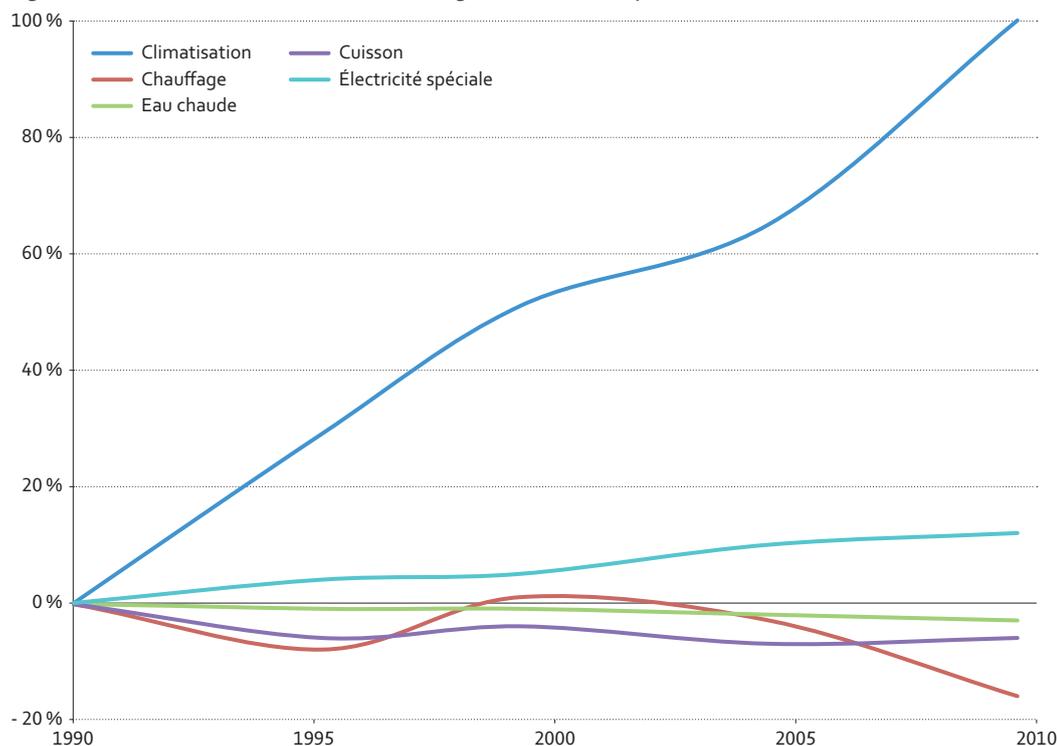
Dans ce contexte l'activité humaine est responsable pour environ 20 % de l'ICU. Cette valeur est extrêmement élevée, et met en exergue le caractère totalement démesuré des consommations d'énergie sur notre territoire. Au-delà de ce simple constat, l'évolution actuelle des consommations d'énergie doit être considérée comme extrêmement préoccupante. Pour illustrer ce propos, la figure 33 retrace l'évolution des consommations d'énergie des commerces parisiens de 1990 à 2009.

Alors que l'augmentation tendancielle du prix de l'énergie constatée ces dernières années (en particulier le gaz qui a augmenté de 70 % de 2004 à 2008) a fait décroître ou stagner les consommations d'énergie pour le chauffage ou l'eau chaude, la climatisation voit son usage doubler en l'espace de 20 ans dans les commerces parisiens. L'explosion de ce poste doit être considérée comme très préoccupante. Elle traduit l'évolution des modes de vie et les nouvelles exigences des habitants vis-à-vis du confort thermique (un parallèle simple peut être fait avec l'industrie automobile pour laquelle la climatisation des habitacles est maintenant la règle). Cette évolution tendancielle va exactement à l'encontre de ce que pourrait être une politique d'adaptation au changement climatique en ville, **tout mode d'adaptation qui se traduit par des consommations d'énergie supplémentaires est voué structurellement à l'échec.**

Au-delà de ce simple constat, le recours à la climatisation fragilise notre territoire ; les consommations supplémentaires qu'elle induit doivent être pensées dans un monde où l'énergie vaut de plus en plus chère, c'est-à-dire dans un monde où toute forme de dépendance énergétique est facteur de vulnérabilité.

Le réseau de chauffage urbain joue aussi un rôle dans le réchauffement de l'espace public. Si durant les mois d'été il ne sert pas à aux besoins de

Figure 33 – Évolution des consommations d'énergie des commerces parisiens de 1990 à 2009



Source : CEREN (2011)

## IMPACT DE LA CLIMATISATION SUR L'ICU

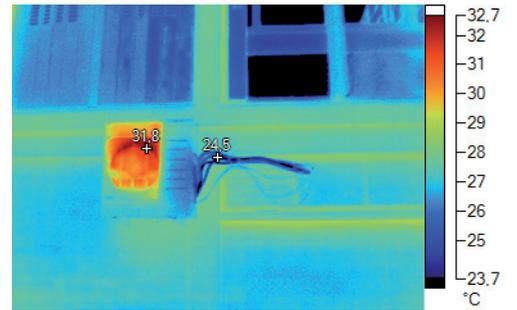


Figure 34 – Climatiseur d'un commerce rejetant de l'air chaud dans l'atmosphère, participant ainsi au phénomène d'ICU.

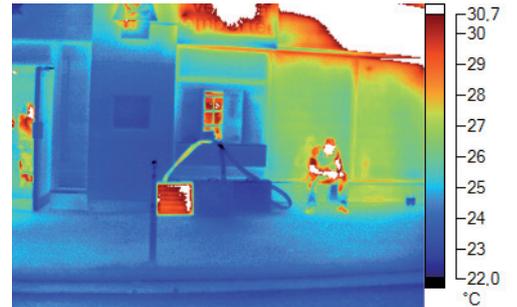


Figure 35 – Groupe de 3 climatiseurs positionnés directement sur l'espace public par un « fast-food ». Seul le climatiseur de gauche fonctionne au moment du cliché. Son usage intervient alors que la porte du commerce est grande ouverte.

chauffage des bâtiments, il continue à les alimenter afin de permettre leur production d'eau chaude sanitaire. C'est vraisemblablement durant ces mois d'été que les pertes du réseau sont annuellement les plus importantes. Sachant que la vapeur d'eau produite durant cette période provient

intégralement de la combustion des ordures ménagères, la question du stockage de cette énergie (« stockage intersaisonnier ») devrait être posée de façon prospective afin de minimiser l'impact du chauffage urbain en terme de réchauffement de la ville durant les épisodes caniculaires.

## IMPACT DU CHAUFFAGE URBAIN SUR L'ICU

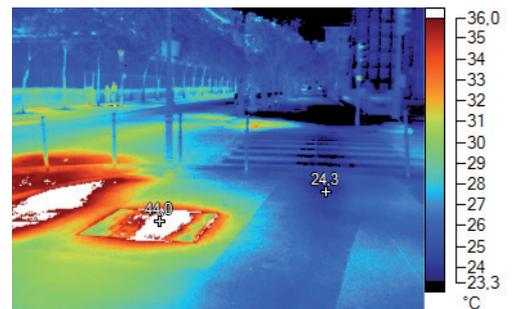


Figure 36 – Branchement de chauffage urbain (CPCU) occasionnant un dégagement de chaleur sur l'espace public en été. Clichés pris le 31 juillet 2011 à 21h (19 heures UTC).

## 2 – Premières mesures d'adaptation

Dans cette partie sont traitées les mesures d'adaptation aux phénomènes d'ICU. Afin d'introduire les travaux du cahier#2 sur l'adaptation climatique, on propose ici une première liste de mesures qui devraient être mises en place ou expérimentées dans un futur proche à Paris.

### 2.1 Réduire la « pollution thermique »

Si les consommations d'énergie liées à l'activité humaines ont déjà été évoquées comme essentielles dans la formation de l'ICU, certaines d'entre elles ont des impacts particulièrement négatifs dans la mesure où elles possèdent des effets secondaires qui compliquent les mesures d'adaptation traditionnelles (on parlera de « rétroactions négatives »).

- Circulation automobile: le premier effet de la circulation automobile est de réchauffer l'air ambiant du fait de la combustion <sup>(3)</sup> et la chaussée du fait des frottements, l'effet secondaire de la combustion est l'émission de polluants atmosphériques qui génèrent un effet de serre additionnel <sup>(4)</sup>. Cet effet de serre additionnel agit un peu comme un couvercle au-dessus de la ville et amoindrit le refroidissement nocturne radiatif, ce qui accroît l'effet d'ICU. La réduction

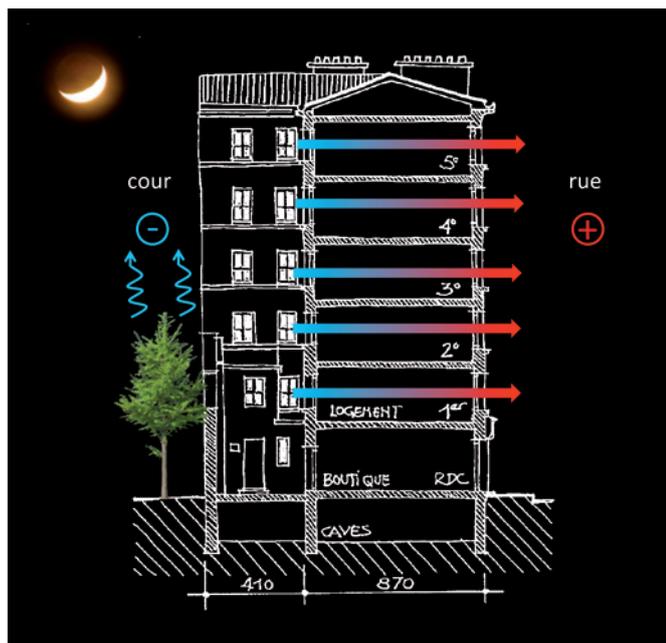
de la circulation automobile est donc l'une des priorités de la lutte contre les ICU.

- Climatisation: les bâtiments construits avant 1914 sont insérés dans des ilots qui, lorsqu'ils n'ont pas été recomposés au xx<sup>e</sup> siècle, sont fermés. Il existe dans ce cas des différences d'ensoleillement importantes entre les cours et les rues, qui entraîneront des différences de température marquées la nuit entre ces espaces. Ces différences de température sont le moteur d'une ventilation naturelle extrêmement précieuse puisqu'elle permet le rafraîchissement des logements la nuit. Lorsque les occupants des rez-de-chaussée installent des climatiseurs dans les cours (c'est le cas de nombreux commerces parisiens), outre les dégagements de chaleur occasionnés qui participent à l'ICU, la chaleur dégagée modère la différence de température qui existe entre la cour et la rue ce qui compromet la ventilation nocturne des logements dans les étages supérieurs. Lorsque la climatisation est utilisée ponctuellement dans un commerce, les logements aux alentours sont impactés, leur refroidissement nocturne est amoindri, ce qui les encouragera eux aussi à opter pour des solutions de climatisation. La climatisation opère, dans le cas de formes urbaines anciennes, une véritable « contagion thermique ».

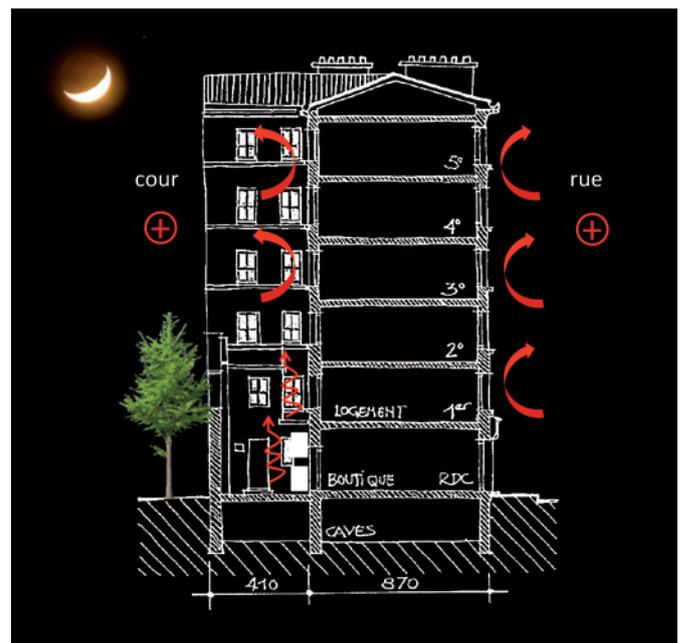
(3) – Avec un moteur électrique cet effet est moindre.

(4) – Cet effet secondaire est inexistant avec un véhicule électrique.

FIGURE 37 : MODIFICATION DE LA VENTILATION NATURELLE PAR AJOUT DE CLIMATISEURS



Ventilation nocturne naturelle d'une cour du XIX<sup>e</sup> 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.

## 2.2 Créer des îlots de fraîcheur

Les espaces libres comme les places ou les esplanades sont des lieux où il est possible de créer ponctuellement des îlots de fraîcheur. Les terrasses des grands équipements, rarement valorisées, peuvent elles aussi être aménagées et mises à profit dans la lutte contre les ICU.

Les places et les esplanades se prêtent bien à un usage nocturne dans la mesure où ils bénéficient du meilleur refroidissement une fois le soleil couché. Pour créer dans ces lieux des îlots de fraîcheur, il faut les protéger de l'échauffement journalier. Deux solutions sont possibles : l'arrosage continu en journée et/ou l'introduction d'une strate végétale. **Pour ce qui est des grands espaces minéralisés comme le parvis de l'Hôtel de ville ou Beaubourg des systèmes d'arrosage intégrés aux revêtements de sol devraient être testés.** Ils sont actuellement employés au Japon en hiver pour le déneigement et en été dans la lutte contre les ICU.

L'usage d'une lame d'eau en continu introduit une contrainte supplémentaire dans la qualification des revêtements de sol. Si du strict point de vue de l'ensoleillement, les surfaces lisses sont mieux à même de réfléchir les rayons du soleil, les surfaces destinées à un arrosage pour créer un îlot de fraîcheur doivent au contraire présenter une certaine porosité afin que l'évaporation soit maximale. Cette mesure consomme de l'eau, et

peut s'appuyer sur un usage du réseau d'eau non potable présent à Paris, dont une partie fonctionne gravitairement, ce qui induit un coût en énergie primaire moindre que dans le cas de l'eau potable (l'acheminement et les procédés de potabilisation de l'eau sont consommateurs d'énergie). Si la question de la ressource en eau reste posée, question qui pourrait devenir sensible dans la perspective du changement climatique, elle peut être intégrée dans le cadre d'un fonctionnement optimiste du réseau et de la recherche d'une diversification des ressources en eau (eaux de surface, eaux souterraines, eaux de pluie, etc.). Par ailleurs, l'usage envisagé ici serait concentré sur de courtes périodes et l'eau utilisée servirait aussi, in fine, à l'alimentation du réseau d'assainissement via les bouches d'égout. L'eau potable peut elle aussi rentrer dans les dispositifs ponctuels de rafraîchissement grâce à la brumisation, l'usage de cette ressource en période de canicule doit bien sûr se faire de façon modérée.

Les terrasses des grands équipements peuvent aussi être mobilisées afin de créer des espaces aériens de frais. La hauteur confère aux terrasses un bon potentiel de refroidissement en raison des vents qui y siègent, souvent moins perturbés par les volumes bâtis que l'espace public. Si les procédés de végétalisation s'avèrent performants dans ce cadre, la qualité des végétaux employés sera déterminante. **Ainsi les arbres ou les pergolas peuvent s'avérer très efficaces en raison des ombrages qu'ils créent, mais les dispositifs de végétalisation minimalistes**

FIGURE 38 – ARROSAGE DE L'ESPACE PUBLIC



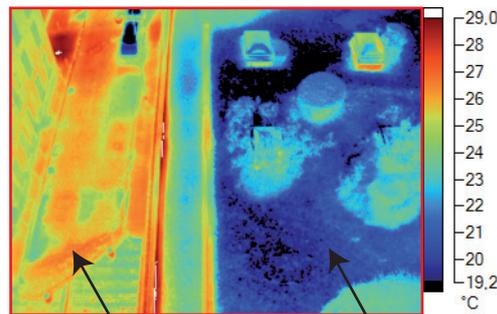
Lame d'eau créée par aspersion continue de façon à améliorer le confort thermique à proximité d'une gare routière (Japon, août 2012). Les dispositifs d'arrosage sont intégrés au revêtement de sol. Le revêtement est conçu de façon à avoir une certaine porosité afin de maximiser les surfaces d'évaporation et donc le rendement de la mesure d'adaptation.

FIGURE 39 – BRUMISATION



Brumisateurs installés dans une gare routière japonaise (août 2012). Un système analogue a été utilisé à Paris au Parc floral, il est utilisé aujourd'hui pour Paris Plage.

FIGURE 40 – EFFET MICROCLIMATIQUE D'UNE TOITURE VÉGÉTALE



En contre-bas l'espace public minéralisé encore chaud

Au premier plan : vue plongeante sur une terrasse végétale qui crée localement un îlot de fraîcheur (2 août 2011 vers 23h (21h UTC))

de type sédum auront des performances moindres car ils ne créent pas d'ombrages et leur activité photosynthétique est faible.

Dans le cas d'un usage de la végétation, le potentiel de rafraîchissement sera intimement tributaire de l'arrosage. Le stress hydrique annule totalement le potentiel de rafraîchissement de la végétation.

Dans les deux cas que nous avons évoqués, à savoir l'arrosage de l'espace public et l'introduction d'une strate végétale, la consommation d'eau joue un rôle important et conditionnera totalement la pertinence des mesures. **La question posée par la disponibilité de la ressource en eau est fondamentale et devra donc faire l'objet d'une évaluation prévisionnelle dans un contexte de changement climatique.**

## 2.3 Modifier les revêtements

Les revêtements de l'espace public sont aujourd'hui choisis selon des critères « mécaniques ». Les critères qui permettent d'arbitrer le choix de matériaux sont par exemple : leur réparabilité, leur résistance au vandalisme, leur tenue mécanique, la pérennité de leur aspect, etc. Il conviendrait aujourd'hui d'ajouter le critère microclimatique. Des tests devraient être menés pour comparer entre eux les matériaux traditionnellement employés à Paris. Il existe aujourd'hui sur le marché de nouveaux matériaux à fort pouvoir réfléchissant. Ces matériaux doivent être considérés avec prudence car beaucoup de zones d'ombre existent quant à leur réelle plus-value en milieu urbain. Un trop fort pouvoir réfléchissant condamne le confort visuel

des espaces publics, et rendent accidentogènes les différentes formes de mobilité. La pérennité de leur pouvoir réfléchissant doit être mesurée sur la durée et enfin le coût carbone de leur production (l'« énergie grise ») mérite une documentation (elle est totalement absente de la documentation fournie par les fabricants aujourd'hui).

Concernant les bâtiments eux-mêmes, la politique de ravalement en place à Paris permet de conserver des teintes claires sur les murs de Paris. La figure 41 montre l'exemple d'une façade qui a fait l'objet d'un ravalement, la façade est nettoyée puis peinte. Après ravalement la façade est donc relativement réfléchissante.

Comme dans le cas des revêtements de l'espace public évoqué précédemment, les façades ne doivent pas être l'objet de traitements fortement réfléchissants que l'on pourrait obtenir grâce à des revêtements ou des bardages métalliques, ils créent eux aussi des zones d'inconfort visuel sur l'espace public et sont accidentogènes.

Si la politique de ravalement actuelle semble suffisante pour le traitement de la question microclimatique à Paris, la tendance actuelle des copropriétés est d'opter quand elles le peuvent pour des teintes de plus en plus foncées (beige, gris clair, etc.) car moins salissantes et donc moins coûteuses puisque le temps qui s'écoule alors entre deux ravalements est plus long. Si les injonctions de ravalement sont amenées à l'avenir à intégrer des clauses « microclimatiques » permettant de favoriser les teintes claires, le

financement des ravalements mérite d'être posé lui aussi car il devient de fait plus coûteux pour les copropriétés. La circulation automobile est à Paris la seule cause de salissure des façades qui entraîne leur ravalement périodique. **Les copropriétés parisiennes en maintenant propres leurs façades paient donc l'une des externalités du trafic routier urbain.** La question du financement des ravalements doit être aujourd'hui reconsidérée.

Déjà évoquée, la question des toitures parisiennes mériteraient elles aussi de faire l'objet d'expérimentations en particulier sur les toits terrasses sur lesquels des matériaux réfléchissants pourraient être testés, on retrouvera là encore la question cruciale de la pérennité des propriétés réfléchissantes et du bilan carbone de production des matières réfléchissantes employées.

## 2.4 Mettre à profit la fraîcheur du sous-sol

Les variations de température journalières et saisonnières de l'air ambiant sont fortement atténuées dans le sous-sol. Cette atténuation dépend de la profondeur. À Paris, à partir d'une quinzaine de mètres la température se stabilise entre 12 et 14 °C toute l'année. Les catacombes, les anciennes carrières souterraines ou les tunnels sont les lieux qui présentent les niveaux de température les plus faibles lors des épisodes caniculaires. Figure 43, une illustration est donnée par une série de mesures réalisées à proximité de la petite ceinture ferroviaire le 18

FIGURE 41 – Une politique de ravalement vertueuse

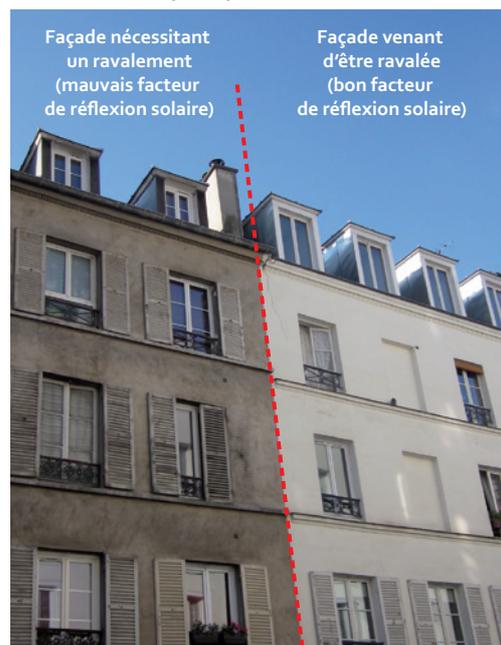
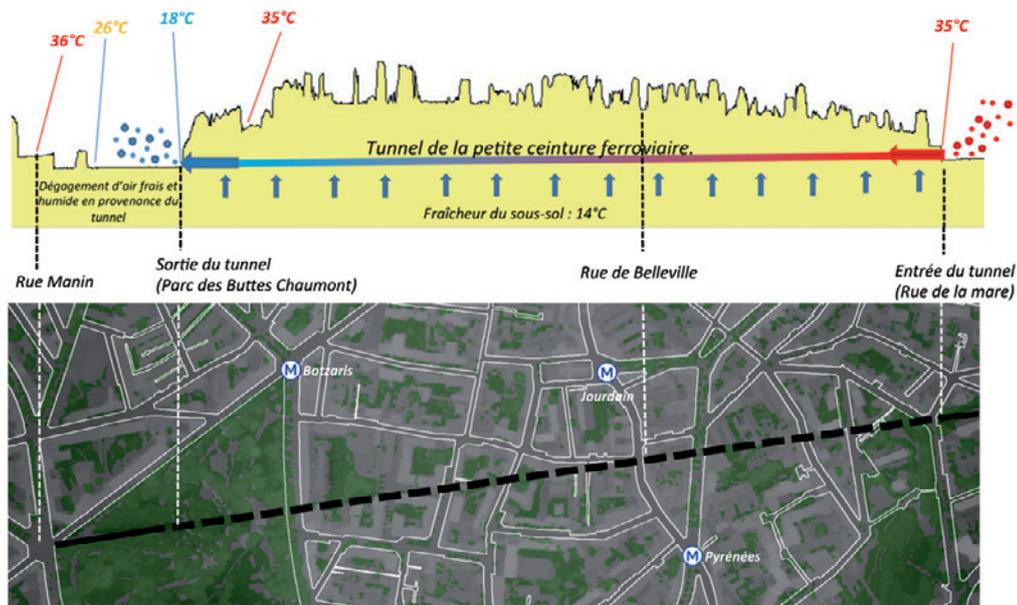


FIGURE 42 – Des matériaux à fort pouvoir réfléchissant souvent inadaptés en ville



Éblouissement affectant la Rue du Bouloi (1<sup>er</sup>) suite à l'emploi d'un bardage métallique sur le bâtiment du Ministère de la culture

Figure 43 – Mesures de températures ambiante le 18 août 2012 à 18h (16h UTC) à la sortie du tunnel de la petite ceinture en contrebas du parc des Buttes-Chaumont

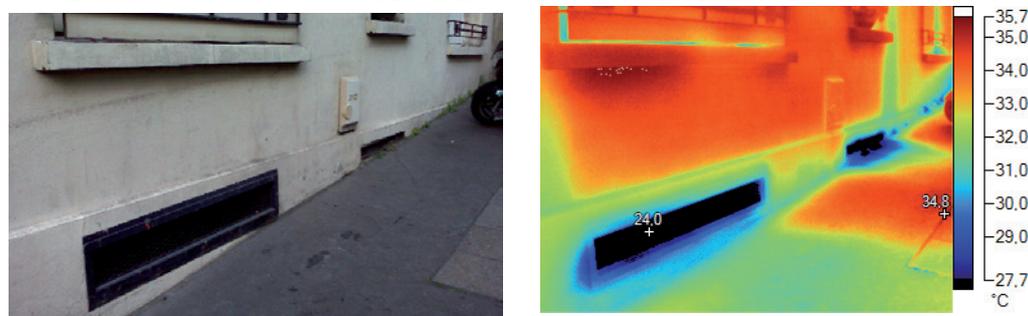


août 2012 vers 18h (16h UTC). Sur le tronçon étudié situé entre la rue de la mare (20°) et la rue Manin (19°) la petite ceinture emprunte un tunnel sur plus d'1 km, de l'air chaud à environ 35 °C (température ambiante) s'engouffre à l'entrée du tunnel rue de la mare et en ressort à une température de 18 °C en contre bas de la rue Manin. Ce tunnel fonctionne un peu comme un « puits canadien » à grande échelle, c'est le passage de l'air en souterrain qui permet son rafraîchissement.

Si la fraîcheur du sous-sol peut être mise à profit afin de créer de nouveaux espaces publics rafraîchis naturellement, elle peut être aussi utilisée directement dans les bâtiments. Le phénomène de ventilation naturelle déjà évoqué précédemment affecte aussi les caves (et certains

parkings) et produit ainsi de l'air froid qui n'est malheureusement jamais valorisé à des fins de rafraîchissement. **La présence de conduites shunt ou de cheminées dans les bâtiments devraient faire l'objet d'expérimentations afin de valoriser cette ressource de froid.** De façon plus ambitieuse la géothermie basse profondeur qui base son principe sur une circulation d'eau jusqu'à plusieurs dizaines de mètres de profondeur permet de valoriser en hiver et en été la température du sous-sol. Elle devrait être plus étudiée dans la construction neuve car le rafraîchissement est quasiment obligatoire dans ces bâtiments qui se comportent comme de véritables pièges à calories pour lesquels le confort d'été est moins bien assuré que dans les bâtiments anciens.

FIGURE 44 – ÉMANATION D'AIR FROID DEPUIS LES CAVES D'UN IMMEUBLE PARISIEN



Alors que la température ambiante est de 35°C, de l'air refroidi par les caves s'échappe dans l'atmosphère à environ 24°C. Cet air pourrait être mis à profit à l'intérieur des logements pour le rafraîchissement.

## 2.5 Une réglementation thermique du bâtiment très incertaine sur le confort d'été

Même si l'objet de ce document n'est pas de traiter du confort thermique dans les logements, il convient de remarquer que la réglementation thermique s'appliquant aux bâtiments neufs semble bordée de graves incertitudes concernant le confort d'été. La logique actuelle est de créer un maximum de confinement thermique dans les logements, un bâtiment conforme à la réglementation c'est un bâtiment parfaitement étanche à l'air et aux calories. Ces bâtiments, on le sait déjà, sont extrêmement problématiques en été. Ils étaient peu nombreux dans notre pays en 2003 lors du dernière épisode caniculaire que la France ait connu, le prochain épisode caniculaire que notre pays connaîtra sera véritablement révélateur de la performance estivale réelle des bâtiments à fort niveau d'isolation. L'hypothèse de rafraîchissement couramment invoquée dans les projets de constructions neuves est basée sur la surventilation nocturne des logements par simple ouverture des fenêtres. Nous l'avons vu dans ce document, cette ventilation nocturne est intimement liée à des phénomènes microclimatiques parfois aléatoires et rarement constants. Baser le rafraîchissement sur cette seule disposition semble peu crédible et conduira vraisemblablement les occupants de ces logements à adopter la climatisation. Le deuxième facteur d'incertitude liée à la réglementation thermique est l'horizon temporel. Les projets actuels doivent être compris comme proposant le meilleur compromis « thermique » pour le bâtiment dans le climat actuel. Si en 2050 un été sur deux ressemble à 2003 alors il paraît essentiel d'être un peu plus prospectif dans les hypothèses retenues. Lorsque l'on travaille sur les phénomènes d'ICU, on prend l'habitude de se projeter dans un contexte climatique évoluant rapidement. Les hypothèses venant de Météo France que nous retiendrons par la suite tablent pour la fin du siècle sur une réduction de 30 % des besoins de chauffage et une multiplication par 10 des besoins de rafraîchissement (ce qui revient à adopter pour Paris le climat actuel de Bastia). Ces hypothèses paraissent bien éloignées de celles qui sous-tendent la construction neuve et la rénovation basse énergie, il est fort à parier que nous prenons de ce fait une voie très incertaine dans la conception des logements en France.

Depuis les années 50, la politique de la construction et son contexte réglementaire pèchent par un excès de dogmatisme qui fait de la France une exception en Europe. L'isolation intérieure défendue par les textes depuis la fin des années 70 a chassé avec elle les bonnes pratiques pourtant employées ailleurs comme la technique du double mur ou l'isolation extérieure. Les bâtiments isolés par l'intérieur, on le sait aujourd'hui, accumulent pourtant les pathologies en hiver comme en été. Ces bâtiments sont parmi les plus fragiles vis-à-vis du confort d'été et devront être climatisés le plus souvent, ce qui est un nouveau facteur de précarité pour leurs occupants. La situation actuelle de la construction neuve est elle aussi entachée d'incertitudes qui laissent perplexe. Le contrôle total du renouvellement de l'air par ventilation mécanique dans un bâtiment totalement étanche est une orientation réglementaire plutôt discutable. Discutable d'un point de vue sociologique car depuis que ces dispositifs sont obligatoires dans le bâtiment (1969) on constate que les habitants acceptent mal de confier la gestion du renouvellement d'air à un équipement mécanique. Les performances thermiques théoriques, aussi prometteuses soient-elles sur le papier, sont généralement mises à mal par les occupants qui préfèrent contrôler eux-mêmes la ventilation par ouverture des fenêtres. Le second risque posé par ces dispositifs est d'ordre sanitaire : **dans un espace confiné et étanche tout dysfonctionnement du mode de ventilation a des répercussions sur la qualité de l'air respiré et donc la santé des occupants. Cette thématique propre aux bâtiments récents devrait faire l'objet d'une veille sanitaire particulière.**

Rappelons que les éléments permettant d'atteindre un niveau satisfaisant de confort en été sont, dans la construction neuve :

- la prise en compte de la ventilation naturelle ; lors de la conception, il faut faire en sorte que le bâtiment puisse être ventilé efficacement en été, la simple ouverture des fenêtres la nuit est généralement insuffisante en ville ;
- construire avec de l'inertie, à savoir des murs épais capables de stocker la fraîcheur apportée par la ventilation nocturne ;
- utiliser la fraîcheur du sous-sol par géothermie ou pompe à chaleur pour le rafraîchissement des locaux ;
- se protéger des apports solaires en journée ;
- modérer la consommation d'électricité dans le bâtiment.

## Conclusion et perspectives

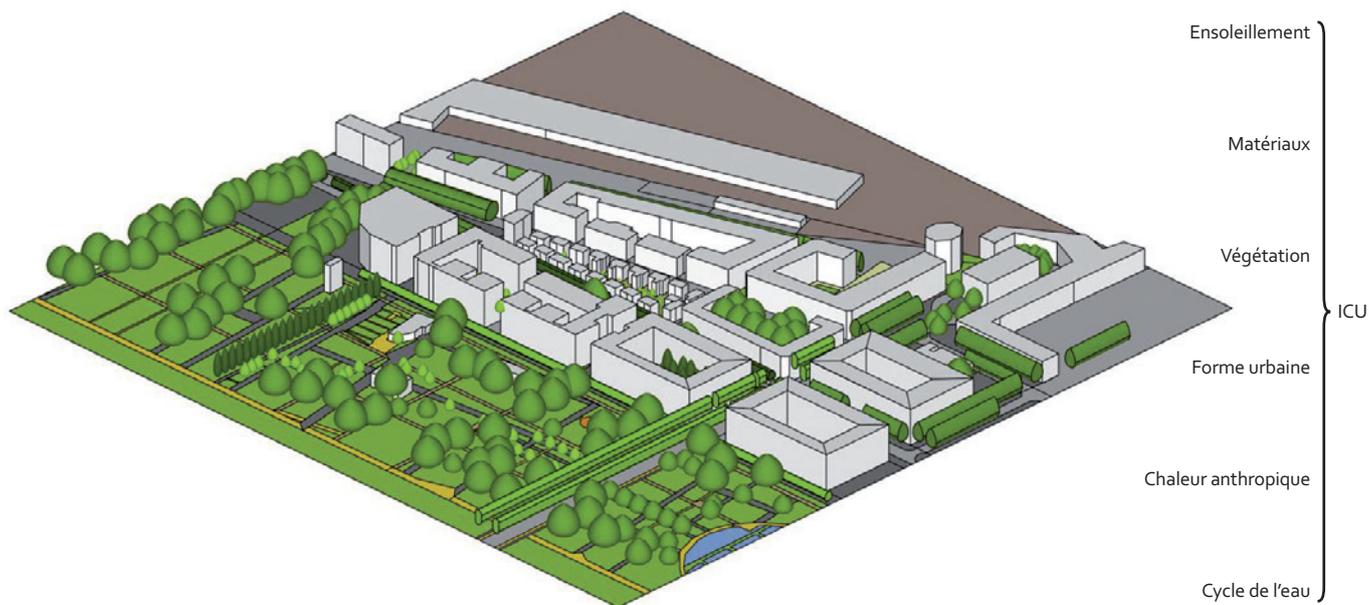
Si aujourd'hui les grandes familles de solutions sont connues pour traiter les ICU : usage de l'eau, végétalisation, modification de revêtements, diminution des consommations d'énergie du territoire ; en revanche l'impact de ces mesures d'adaptation est extrêmement tributaire des formes urbaines que nous rencontrons en Ville. Si, comme nous l'avons mentionné en introduction de ce document, chaque ville possède son propre îlot de chaleur dépendant de sa configuration urbaine globale, chaque ville possède aussi ses propres solutions d'adaptation. Pour définir une politique d'adaptation du territoire parisien, il est nécessaire de se projeter dans les tissus urbains et de regarder à très petite échelle pour chacun d'entre eux quelle mesure d'adaptation a la plus grande portée. Dans certains lieux l'arrosage de la voirie aura un impact majeur sur le microclimat, dans d'autres cette mesure aura des effets négligeables. De même, changer le revêtement de la chaussée au profit de matériaux clairs aura une portée sur certains types de voies possédant un certain type d'orientation, mais dans les rues étroites du Marais qui ne voient que très peu la lumière cette mesure sera sans effet.

La suite du travail (cahier#2) se concentrera sur plusieurs tissus urbains parisiens pour lesquels une modélisation fine des phénomènes microclimatiques sera effectuée. Cette modélisation, qui prend en compte localement les grands phénomènes constitutifs du climat urbain comme le rafraîchissement apporté par la végétation ou la réflexivité des matériaux, permettra de caractériser le comportement thermique des grandes typologies urbaines rencontrées à Paris et de dégager des solutions d'adaptation propre à chaque site. Les interactions

complexes qui existent entre la végétation, l'eau, les matériaux et la forme urbaine conditionnent l'émergence d'un microclimat sur un secteur donné. Seule la modélisation informatique permet de simuler ces phénomènes, de tester les solutions adaptées à chaque configuration urbaine et d'en chiffrer la portée en matière d'amélioration de confort thermique.

Les formes urbaines retenues permettront de renseigner les spécificités climatiques propres aux différents modes d'urbanisation qui ont marqué l'histoire de Paris. Pour les formes les plus anciennes, on tentera de comprendre le rôle que jouent la densité bâtie et l'étroitesse des rues. La faible porosité solaire de ces tissus est-elle un avantage dans la perspective d'un climat qui change ? Les courettes et autres puits de lumières participent-ils aussi activement que l'on croit à la ventilation nocturne des formes bâties ? Lorsque la question du rapport à la lumière s'est inversée avec le courant « hygiéniste » et plus tard avec le mouvement « moderne », la ville devient soudainement très perméable à la lumière, est-ce un atout ? Sinon, comment adapter ces tissus ? Enfin le « retour à la ville » emprunté par les Zones d'Aménagement Concertées des années 80 représente-il un bouleversement ou un retour à une certaine vertu climatique ? Parallèlement à toutes ces questions : la proximité d'espaces verts, de voie d'eau et d'emprises ferroviaires créent-elles des conditions microclimatiques particulières dans les zones d'habitat qui les bordent ? On le voit le nombre de questions qui se posent lorsque l'on s'intéresse au microclimat urbain est considérable. L'étude des 6 formes choisies ne couvrira pas l'ensemble des questionnements urbains posés par l'adaptation, en revanche son apport quantitatif permettra d'alimenter la définition d'une politique d'adaptation pour Paris dans les années à venir.

FIGURE 45 – PARAMÈTRES NÉCESSAIRES À LA MODÉLISATION DE L'ICU



La modélisation de l'ICU nécessite de documenter pour chaque forme urbaine tous les paramètres listés à droite du schéma et de résoudre leurs multiples interactions heure par heure lors d'un épisode caniculaire

## Bibliographie

Apur (2014), *Les îlots de chaleur urbains à Paris, cahier#2*

Cantat O. (2004). *L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps*. Norois, n° 191, 2004/2, p. 75-102

CEREN (2011). *Bilan énergétique de Paris Ed. 2009*.

Mairie de Paris (1993). *Matériaux et revêtements des chaussées et trottoirs*. Guide l'espace public.

Mansouri O. (2008). *Influence de la réflexivité des matériaux (albédo) sur la modification du microclimat et le confort thermique extérieur dans un canyon urbain*. Mémoire de Magister. Université Mentouri de Constantine (Algérie).

Météo France, CSTB, Apur (2012). *Étude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Échelle de l'Agglomération Parisienne (EPICEA) – volet 1, 2 et 3*.

Pigeon G. (2007). *Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine*. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier Toulouse III.

## Les Îlots de Chaleur Urbains à Paris

Paris, de par sa densité urbaine, possède un climat plus doux que le reste de la région Ile-de-France. Ce phénomène climatique, documenté depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, est appelé « îlot de chaleur urbain ». La canicule de 2003 a mis en exergue le caractère éminemment problématique de cette particularité climatique, son effet amplificateur sur la mortalité a marqué les esprits et interroge de façon plus générale les pratiques urbaines et leur effets sur l'expression du climat d'une Ville. Afin d'améliorer la connaissance de l'îlot de chaleur parisien, l'Apur a assisté Météo France, et le CSTB de 2007 à 2012 dans le programme de recherche EPICEA (Étude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Échelle de l'Agglomération parisienne). L'Apur a, en complément de ce travail de recherche, réalisé des reportages thermographiques de l'espace public parisien afin de permettre au grand public une meilleure compréhension des phénomènes climatiques urbains. Rédigé à l'attention des aménageurs et des décideurs, ce document synthétise les connaissances accumulées ces dernières années par l'APUR sur la question de l'îlot de chaleur urbain parisien, il décrit en particulier le lien qui existe entre pratiques urbaines et microclimat à Paris. Ce document est le premier volet d'une étude en deux volets.