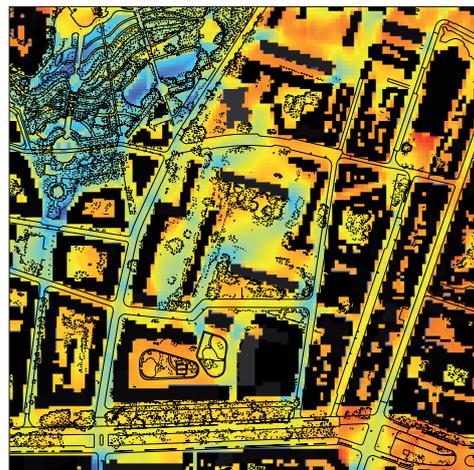
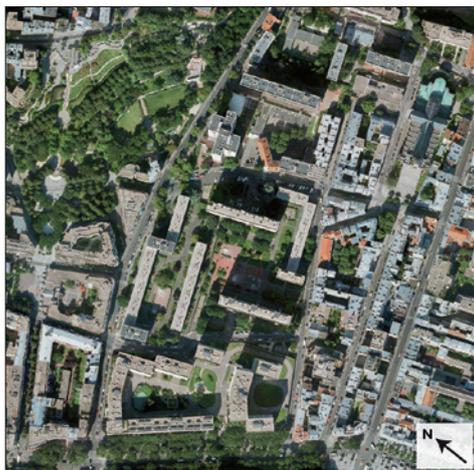
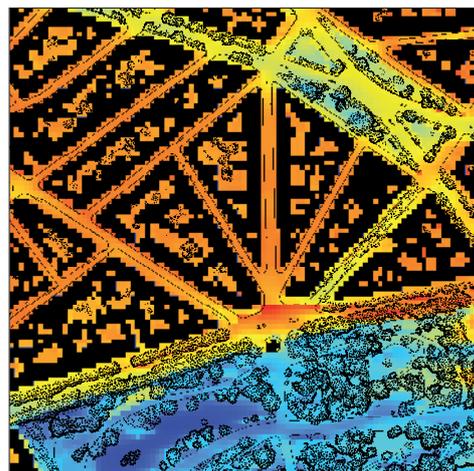


Les îlots de chaleur urbains à Paris

Cahier#2 : simulations climatiques de trois formes urbaines parisiennes et enseignements



Directrice de la publication : Dominique Alba
Étude réalisée par : Julien Bigorgne, Adrien Mangold
Sous la direction de : Christiane Blancot
Cartographie : Julien Bigorgne, Adrien Mangold
Maquette : Apur
Photographies : © Apur, sauf mention contraire
www.apur.org

2014V2.2.2.1

Sommaire

Introduction	5
1. Étude de trois formes urbaines parisiennes.....	7
1.1 Description des quartiers	7
1.2 Résultat des simulations	8
1.3 Limites de l'exercice.....	16
2. Enseignements pour la mise en place de solutions d'adaptation climatique à l'échelle de tout Paris	17
2.1 Les quartiers les plus chauds sont-ils aussi les plus pollués?	17
2.2 Les plantations d'arbres d'alignement à Paris	18
2.2.1 Trois critères pour choisir comment planter les voies de Paris	22
2.2.2 Les arbres et la ventilation nocturne	26
2.3 Comment repenser l'usage des matériaux sur l'espace public? ..	27
2.3.1 Comportement thermique des matériaux actuellement employés à Paris.....	27
2.3.2 Les matériaux « ultra-réfléchissants »	29
2.3.3 Usage de l'eau à des fins de rafraîchissement	29
2.4 Les usages de l'espace public	33
Conclusion.....	35
Bibliographie.....	36
Annexe	37

Introduction

Cette étude est le deuxième cahier publié par l'APUR dédié aux questions d'îlot de chaleur urbain et d'adaptation climatique de Paris. Ce cahier#2 est consacré aux simulations climatiques de petite échelle. Il fait suite au cahier#1 publié en 2012 qui faisait un état de l'art des connaissances disponibles sur Paris. Les cahiers#3 et #4 dédiés respectivement aux matériaux de voirie et aux brises thermiques urbaines sont à paraître.

Les aménageurs traitant d'espaces urbains ont désormais besoin d'intégrer à leur pratique la question microclimatique. Si cette volonté s'impose à eux de façon nouvelle, la compréhension des solutions urbaines permettant de tempérer le climat urbain reste encore floue et manque de documentation. Si les solutions qui permettent de traiter l'îlot de chaleur urbain (ICU) sont qualitativement connues (trame végétale abondante, usage de l'eau, choix raisonné de matériaux de sol), leur dosage se fait, dans les projets urbains, de façon encore trop aléatoire. Par ailleurs, l'ICU étant un phénomène très fluctuant dans l'espace et dans le temps, il convient de porter à la connaissance des aménageurs et des maîtres d'œuvre des informations quantitatives encore trop peu documentées à ce jour.

Il n'existe pas de solution d'adaptation climatique « toute faite » qui s'appliquerait partout et tout le temps afin de traiter la question de l'ICU. La solution théorique qui apporte le plus de gain serait de transformer tous les espaces non bâtis en sols perméables accueillant une trame végétale abondante que l'on arroserait suffisamment. Cette solution « extrême » que nous avons étudiée dans de précédents scénarios d'adaptation climatique réalisés lors du programme de recherche EPICEA⁽¹⁾ n'a pas de portée pratique en soi. La ville est un lieu d'échanges, les usages de l'espace public y sont composites. Cohabitent en ville, circulations automobiles, cyclables et piétonnes. Si l'adaptation climatique suppose de réinterroger les usages actuels, elle doit aussi composer avec et s'entendre comme la recherche du meilleur compromis entre divers impératifs dans un lieu donné. Le souci d'efficacité économique s'impose aussi dans la discussion. Les mesures de transformation de l'espace public ont un coût et sont donc à mettre en œuvre de façon prioritaire là où elles apportent le meilleur bénéfice climatique. Si des zones sont identifiées comme particulièrement critiques du point de vue de l'ICU alors les solutions d'adaptation climatique y auront un intérêt supérieur.

L'étude propose de lister les enseignements qu'il est possible de tirer des modèles numériques climatiques de petite échelle à Paris. Ces modèles (cités en bibliographie) sont des outils développés par différentes universités à des fins de recherche. Ils ont encore un caractère expérimental et leurs résultats doivent être validés par des mesures de terrain. Cette étude a retenu des simulations ayant fait l'objet de validations « in situ », les résultats présentés concordent avec des observations réalisées ces dernières années dans Paris⁽²⁾.

L'étude se divise en deux grandes parties. Une première partie « académique » compare trois formes urbaines parisiennes. Le lecteur désireux d'appréhender le phénomène d'ICU dans sa déclinaison la plus fine (calcul heure par heure du confort thermique) y trouvera des illustrations et commentaires permettant d'apprécier les différences de ressenti climatique de ces trois sites. À la lumière du diagnostic réalisé dans la première partie, la deuxième partie scénarise des solutions d'adaptation et leur portée à l'échelle des quartiers parisiens. Les paragraphes sont formulés afin de répondre aux interrogations auxquelles les aménageurs et services techniques des collectivités seront confrontés en pratique lorsqu'ils traiteront d'adaptation climatique. Si les réponses proposées ne sont pas exhaustives, elles définissent un cadre pour les expérimentations à prolonger ou engager afin d'améliorer les pratiques actuelles.

1- EPICEA : Étude Pluridisciplinaire sur les Impacts du Changement climatique à l'Échelle de l'Agglomération parisienne. Ce projet de recherche a été conduit de 2007 à 2012 par Météo-France, l'APUR et le CSTB pour le compte de la Ville de Paris.

2- Les simulations ayant été jugées trop discordantes avec les observations « in-situ » ne sont pas présentées dans ce document. Les temps de calculs très longs inhérents à ce type de simulation ne permettent pas de réaliser des tests de sensibilité afin de mesurer la robustesse des modèles. Les modèles climatiques sont encore des systèmes de type « boîtes noires » à propos desquels une certaine prudence est à observer. Leur usage et leur interprétation ne doivent pas se faire sans l'appui de mesures « in situ ».



© InterAtlas

Parc Monceau (17°)



apur



© InterAtlas

Sud du parc de Belleville (20°)



apur



© InterAtlas

Nord de la porte de Bagnollet (20°)



apur

1. Étude de trois formes urbaines parisiennes

Trois secteurs de Paris ont été choisis et ont fait l'objet d'analyses microclimatiques. Comme indiqué en introduction, ces analyses ont encore un caractère expérimental et possèdent un certain nombre de limites. On ne manquera de discuter et d'analyser avec précautions les résultats proposés par les modèles.

Paris est une ville qui se distingue par la complexité de ses formes urbaines et bâties. Les formes choisies ont valeur d'illustration, mais la notion de représentativité à laquelle pourrait prétendre toute tentative de typologie urbaine fonctionne assez mal dans le cas parisien.

Nous nous sommes donc limités à choisir des formes urbaines et bâties illustrant trois situations urbaines très différentes : le parc Monceau, le Sud du parc de Belleville et le Nord de la porte de Bagnolet.

1.1 Description des quartiers

Le parc Monceau (17^e)

Le parc Monceau (17^e) est un quartier loti durant la deuxième moitié du XIX^e siècle, il est une illustration de composition haussmannienne relativement préservée (à l'exception des cœurs d'îlots). Le cadrage retenu pour les simulations climatiques comprend le parc et les bâtiments situés au Nord du parc. Ce quartier se distingue par la grande homogénéité des corps de bâtiments, très peu requalifiés après guerre, tout du moins extérieurement.

Le Sud du parc de Belleville (20^e)

Le Sud du parc de Belleville (20^e) est un quartier qui illustre les politiques menées après-guerre de résorption des îlots insalubres. À l'inverse du quartier Monceau, les formes bâties les plus diverses se rencontrent ici. On notera en particulier les immenses opérations de type « plan libre » des années 1960 entre la rue des Maronites et la rue des Couronnes. Le parc de Belleville et les opérations qui le bordent au Sud datent des années 1980. L'urbanisation originelle de ce quartier (de type faubourien) qui date de la toute fin du XIX^e siècle est encore présente sur le secteur en particulier, entre la rue des Maronites et la rue de Ménilmontant.

Le Nord de la porte de Bagnolet (20^e)

Le Nord de la porte de Bagnolet (20^e) illustre l'évolution radioconcentrique de la ville au XX^e siècle, évolution qui se lit ici de façon chronologique de l'Ouest vers l'Est. Le boulevard Mortier marque la limite de la ville avant la destruction de l'enceinte de Thiers. Entre le boulevard Mortier et la rue Le Vau se trouvent les habitations bon marché (HBM) de l'entre-deux-guerres et à l'Est de la rue Le Vau un programme scolaire qui a été réalisé dans les années 1960 associé au parc Emmanuel Fleury. Le secteur est limité à l'Est par le boulevard périphérique.

Quelques paramètres nécessaires à la modélisation microclimatique

-  Canopée
-  Volumes bâtis
-  Eau
-  Limite entre types de revêtements de l'espace public

1.2 Résultat des simulations

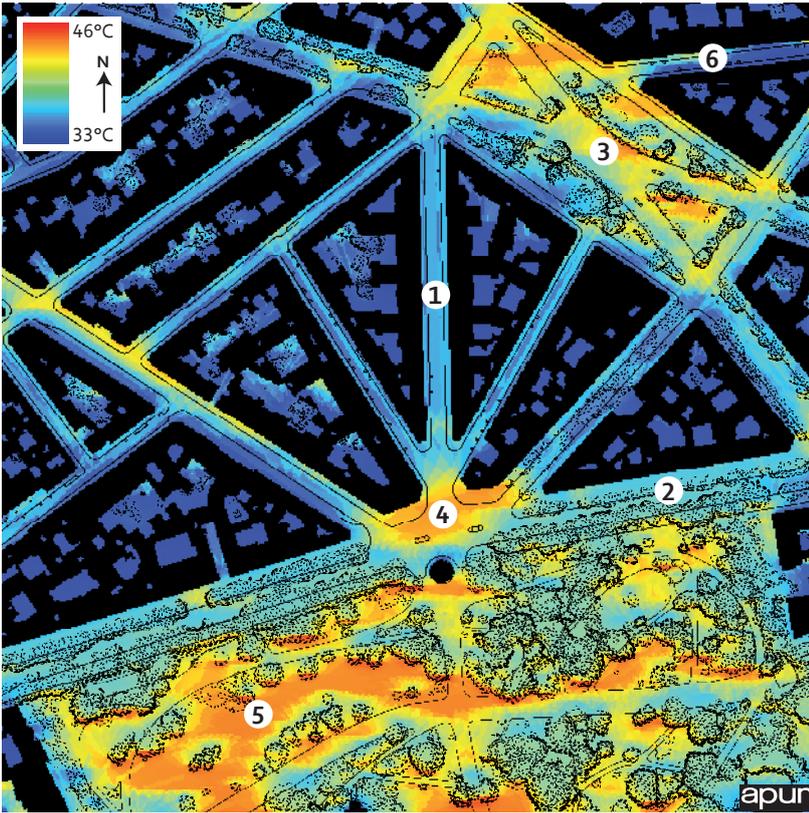
Les résultats des calculs qui sont présentés ci-après représentent des simulations effectuées sur une journée et une nuit de canicule. Il n'est pas encore possible de réaliser ce genre de test sur plusieurs jours, c'est notamment pour cela que ne figurent pas dans cette analyse les formes urbaines les plus anciennes de Paris (XVII^e et XVIII^e), nous en précisons les raisons à la fin de cette partie. La température de l'air n'est jamais évoquée dans les résultats que nous présenterons, car cette variable joue un rôle mineur dans le ressenti de la chaleur en ville. En effet de nombreux paramètres rentrent en compte dans la perception du confort thermique notamment l'humidité de l'air, la présence de vent, la température du sol, des bâtiments, du ciel, etc. Afin de simplifier au maximum la lecture nous avons choisi de présenter les résultats sous la forme d'une « température ressentie » qui est construite à l'aide de variables décisives dans la formulation confort thermique⁽³⁾. Enfin, de façon arbitraire, nous avons choisi de réaliser ces simulations un 18 août en se référant à une campagne de mesures réalisées ce jour-là dans Paris en 2012. La probabilité de survenue d'une canicule est assez forte à ce moment de l'année à Paris, néanmoins il convient de noter que la course du soleil, qui est maximale vers le 21 juin, se réduit tout au long de l'été de façon rapide, ainsi un îlot de chaleur survenant fin juin peut avoir des effets sensiblement différents de ceux présentés.

Note de lecture :

- *En journée, le confort thermique des espaces libres est présenté toutes les deux heures sous formes de vignettes pour chaque secteur. Notons que les températures élevées qui sont relevées (au-delà de 40 °C) correspondent aux températures ressenties lorsque le piéton est exposé à l'ensoleillement direct. Ces cartographies horaires peuvent être comparées aux données de température de l'air délivrée au même moment par la station de Paris-Montsouris (14^e). Étant donné la grande variabilité du confort thermique en journée, il est proposé un commentaire basé sur une cartographie du confort moyen journalier.*
- *La nuit, le confort thermique est proposé sous forme de vignettes pour chaque secteur pour une période allant de 22 heures à 2 heures du matin. Le soleil se couche le 18 août un peu avant 21 heures, ainsi vers 22 heures le déstockage thermique des surfaces minérales précédemment exposées au soleil est important. Dans les trois simulations une brise thermique (3 m/s) a été appliquée plein Est. Le choix d'une direction générale d'écoulement des brises thermiques orientées à l'Est est arbitraire et reflète des situations très probables dans le cas de la porte de Bagnolet et du parc de Belleville. Dans le cas du parc Monceau la direction Est est probable mais non systématique, la direction Sud est théoriquement tout aussi probable.*
- *Les modèles employés permettent de proposer une précision des simulations à l'échelle du mètre pour les simulations diurnes (le modèle employé est Solweig développé par l'université de Göteborg en Suède, cf. bibliographie) et une précision de 4 m pour les simulations nocturnes, cette précision moindre est principalement due à la complexité du cycle de l'eau la nuit (le modèle employé est Envi-met, cf. bibliographie).*
- *Les heures sont données en heure locale (UTC +2).*

3- Dans ce rapport, le confort thermique sera représenté par le PMV (PMV : Predicted Mean Vote, cf. bibliographie). Cet indicateur est normalement donné sur une échelle sans unité allant de -5 à +5, nous avons choisi de le représenter sous la forme d'une « température ressentie » afin que le lecteur puisse appréhender les cartes et graphiques qui vont suivre sans connaissance préalable de cet indicateur de confort thermique. Cette démarche est d'ailleurs reprise dans nombres d'indicateurs utilisés pour qualifier le confort thermique sur l'espace public comme l'UTCI (cf. bibliographie).

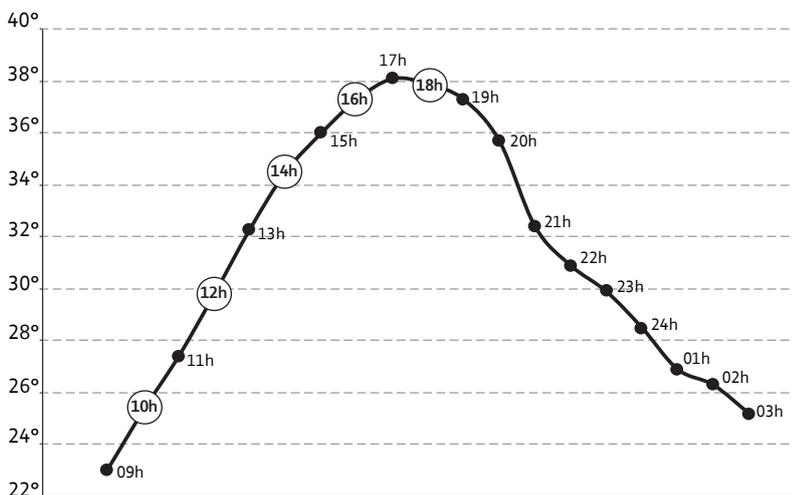
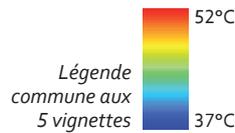
Confort thermique diurne au parc Monceau (17^e) un 18 août



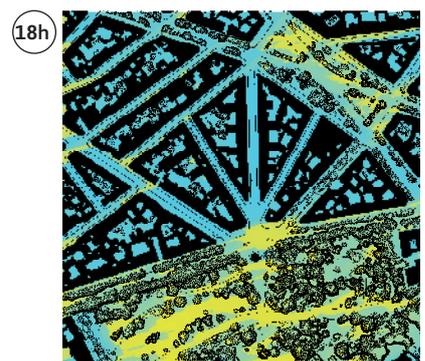
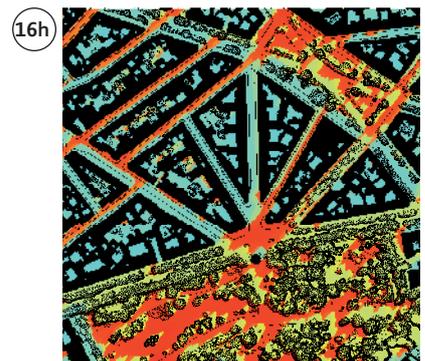
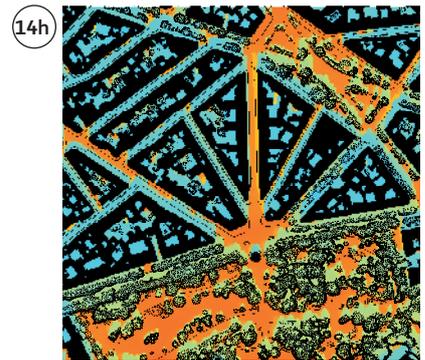
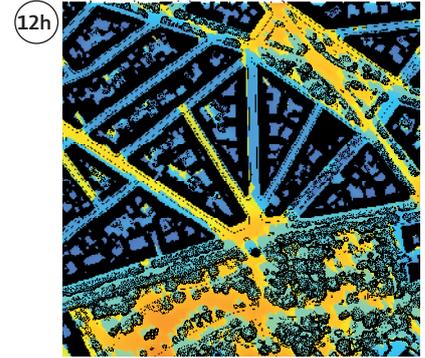
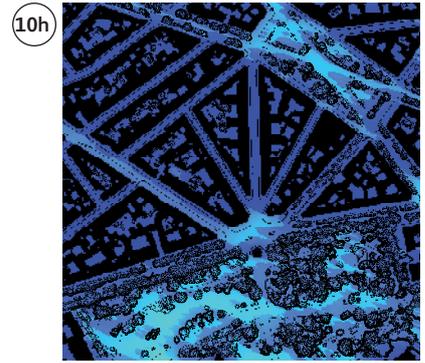
Températures ressenties en moyenne journalière au parc Monceau

Sur ce secteur une grande partie du vocabulaire de la composition type du lotissement haussmannien peut être analysée. Les voies secondaires de desserte locale comme la rue de Phalsbourg ① sont suffisamment étroites (12 m) pour protéger efficacement l'espace public de l'insolation. Parmi ces voies secondaires on ne distinguera pas de différences de comportement climatique entre les rues Nord-Sud ① ou Est-Ouest ⑥, l'étroitesse des voies en est la raison. Les voies primaires, plus larges, comme le boulevard de Courcelles ②, sont protégées de l'insolation par une canopée qui joue pleinement son rôle, la protection solaire s'avère efficace. Rappelons que sur la carte le confort thermique est calculé en lieu et place du piéton, c'est-à-dire sous la canopée.

Les lieux d'inconforts thermiques sont la place du Général Catroux ③, le boulevard de Courcelles là où les plantations sont interrompues pour mettre en perspective l'entrée du parc ④, et les pelouses du parc lui-même ⑤.

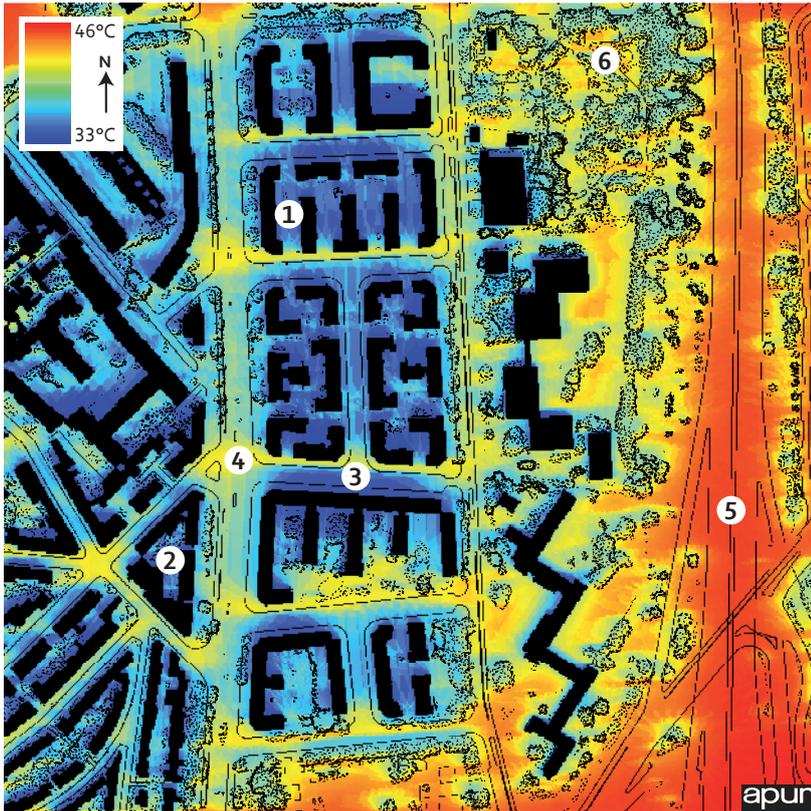


Températures de l'air relevées à la station météo de Paris-Montsouris le 18 août 2012



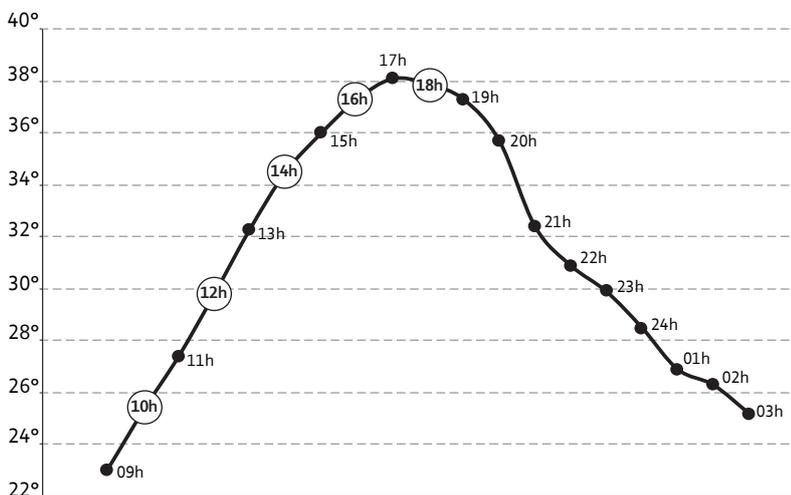
Températures ressenties au parc Monceau

Confort thermique diurne au Nord de la porte de Bagnolet (20^e) un 18 août

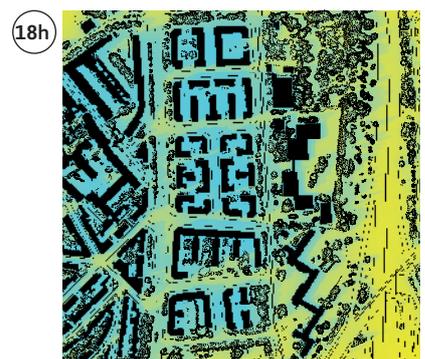
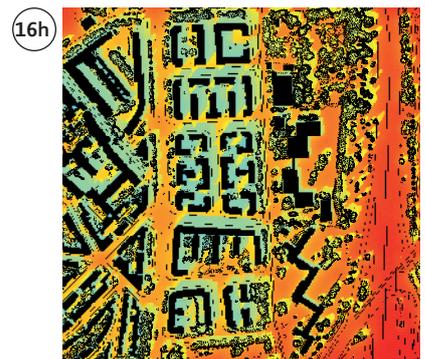
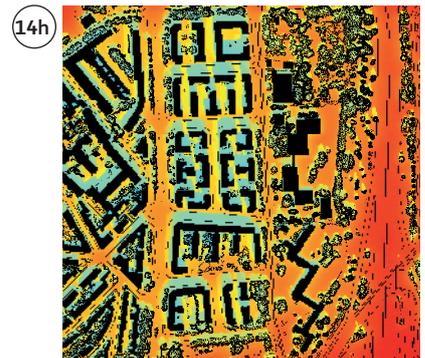
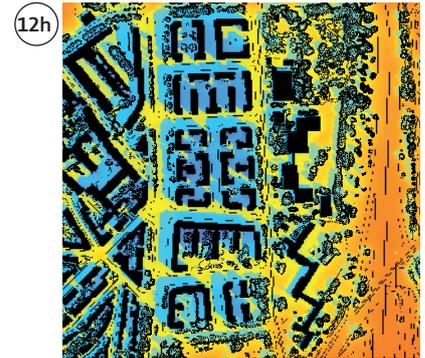
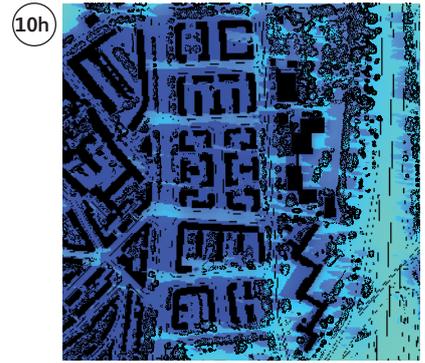


Températures ressenties en moyenne journalière au Nord de la porte de Bagnolet

Les cours des HBM ① protègent de façon convenable du soleil, en tout cas autant que les cours ou courettes des bâtiments plus anciens ②. Les théories hygiénistes, qui prévalaient lors de la construction des HBM, avaient pour ambition de faire rentrer un maximum d'air et de lumière dans les logements et le cœur des îlots. Sur les quelques bâtiments présentés ici, on constate qu'il n'en est rien car l'ouverture, toute relative, des îlots est compensée par l'accroissement de la hauteur des édifices, et le soleil ne pénètre que très ponctuellement dans ces tissus qui restent encore très fermés. Le soleil pénètre ponctuellement sur les rives Nord des rues Est-Ouest ③ perpendiculaires au boulevard des maréchaux ainsi qu'au niveau de leurs intersections avec le boulevard Mortier ④. À l'Est du secteur le périphérique est la zone la plus exposée et donc la plus inconfortable ⑤. Cet inconfort est accru par les dégagements de chaleur des véhicules (non modélisés ici). Enfin, le parc ⑥ malgré sa densité de plantation a du mal à offrir des espaces suffisamment ombragés, cet inconvénient est dû à la tranchée du périphérique qui n'offre pas de protection solaire et expose donc fortement le parc, notamment le matin.

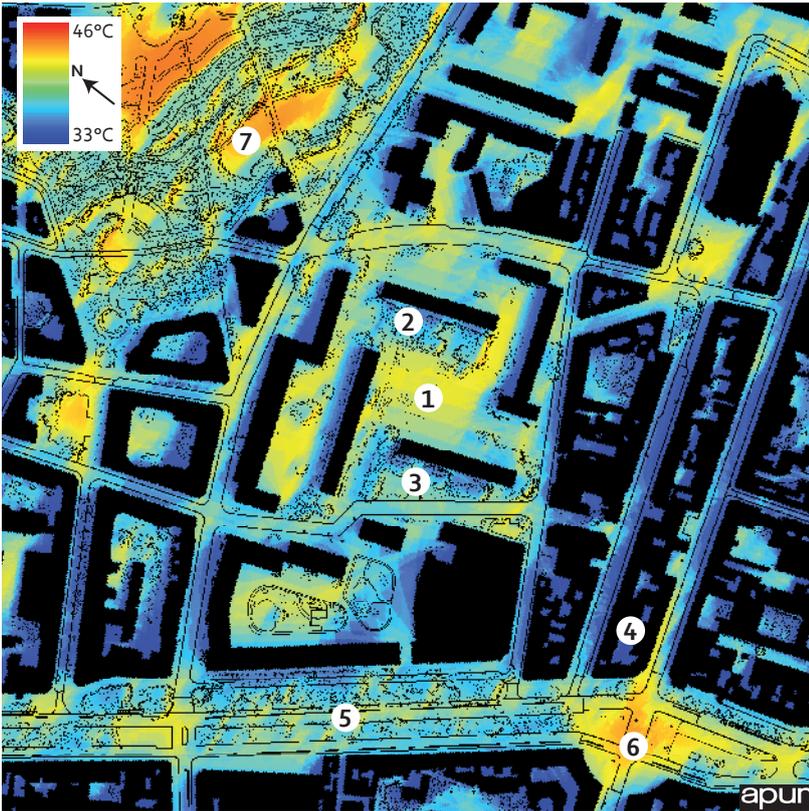


Températures de l'air relevées à la station météo de Paris-Montsouris le 18 août 2012



Températures ressenties au Nord de la porte de Bagnolet

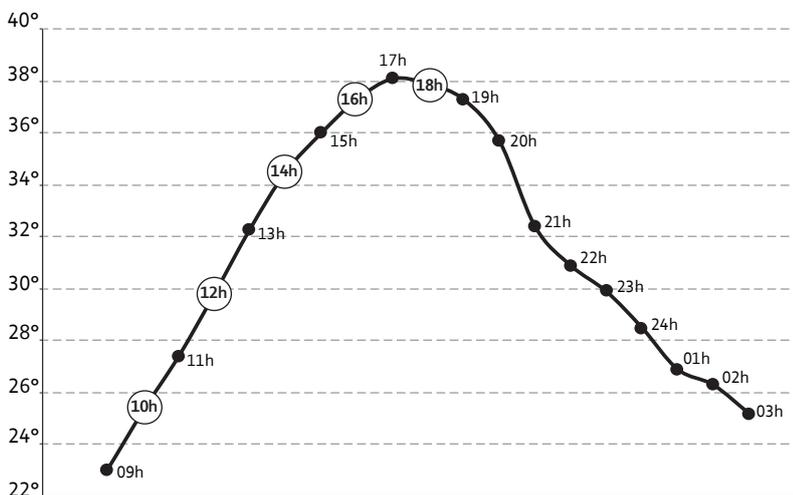
Confort thermique diurne au Sud du parc de Belleville (20^e) un 18 août



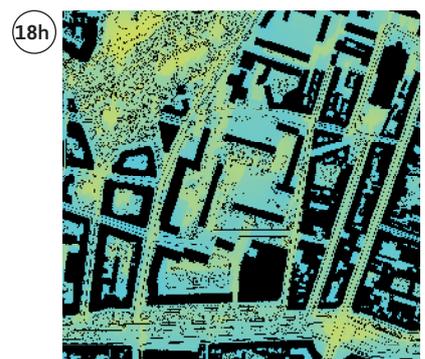
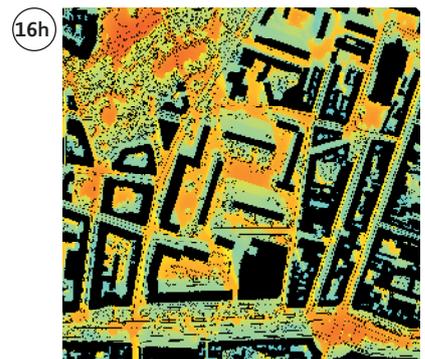
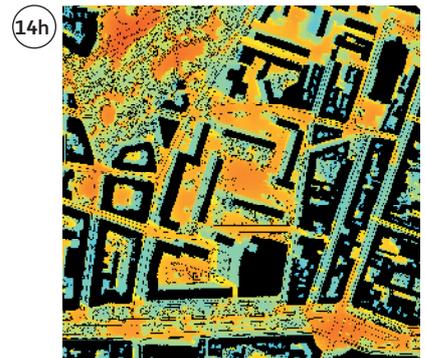
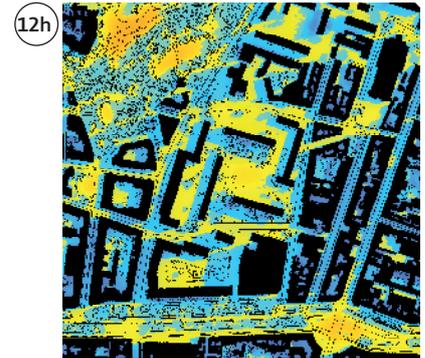
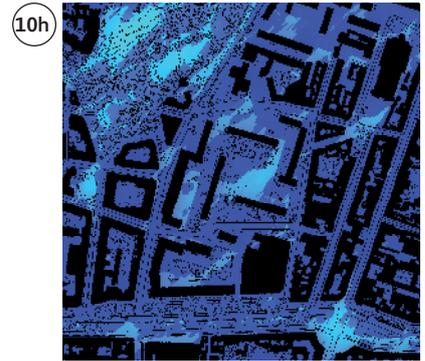
Températures ressenties en moyenne journalière au Sud du parc de Belleville

L'opération dite de « plan libre » ① entre la rue du Pressoir et la rue Julien Lacroix fait abondamment pénétrer le soleil dans l'îlot. Ce parti pris hygiéniste arrive donc à ses fins de façon convaincante sur cet exemple (à l'inverse des formes HBM, cf. porte de Bagnolet). Notons que des massifs arborés ont été judicieusement placés dans l'îlot afin de protéger les premiers étages du soleil de l'après-midi, et de créer des zones de confort au pied des principales barres ②③. Sur ce secteur, la présence d'îlots de la fin du XIX permet de mesurer le contraste qui existe avec l'insolation des courettes ④ qui sont parmi les espaces les plus confortables. Cette température, relativement faible, est à l'origine des mécanismes de tirage thermique qui permettent une ventilation efficace des logements par simple ouverture des fenêtres sur cour et sur rue. Les plantations de sophoras sur le boulevard de Belleville protègent de façon insuffisante l'espace public comme en témoignent les irisations qui ressortent en ⑤. Les zones les plus exposées au soleil sont les pelouses du parc de Belleville ⑦ et l'intersection du boulevard avec la rue de Ménilmontant ⑥.

Légende commune aux 5 vignettes
52°C
37°C

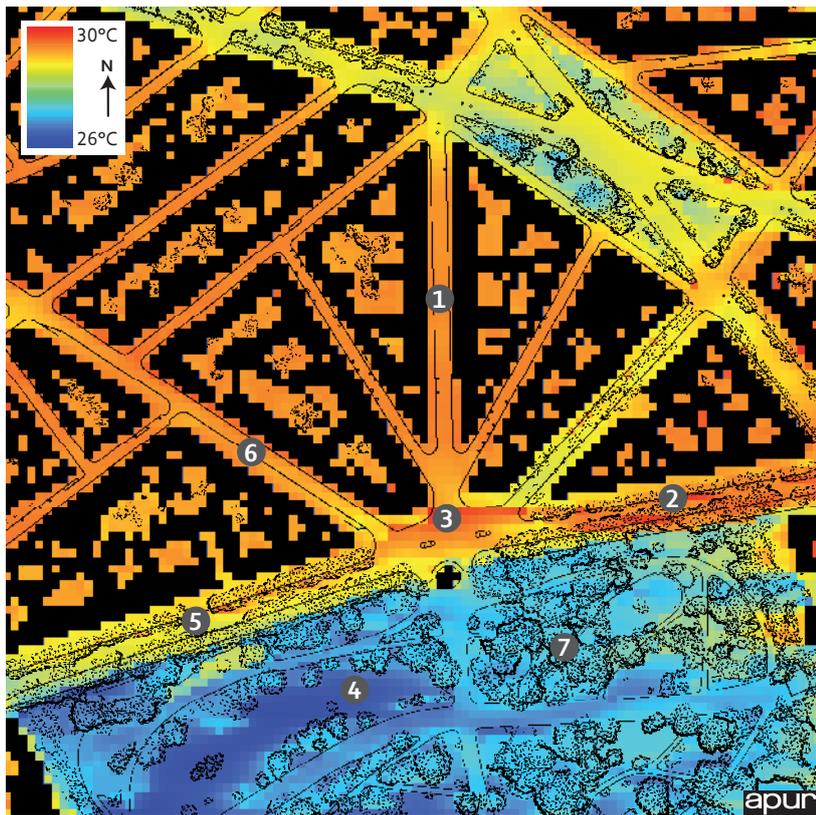


Températures de l'air relevées à la station météo de Paris-Montsouris le 18 août 2012



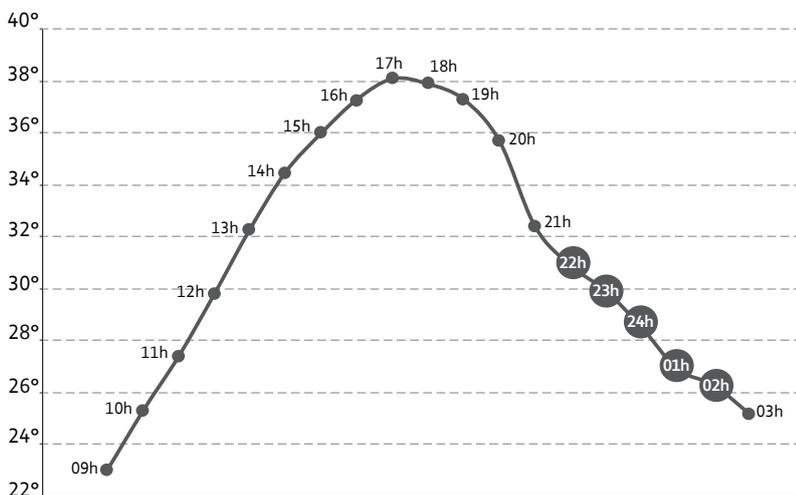
Températures ressenties au Sud du parc de Belleville

Confort thermique nocturne au parc Monceau (17^e) un 18 août

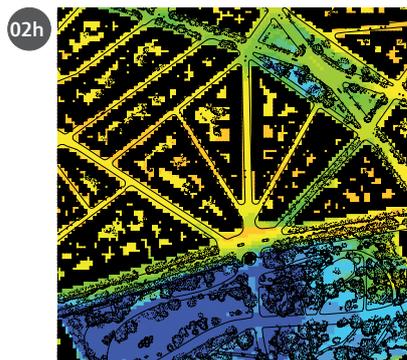
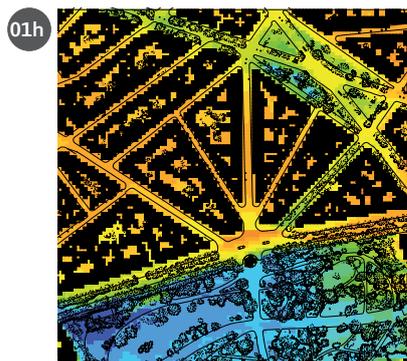
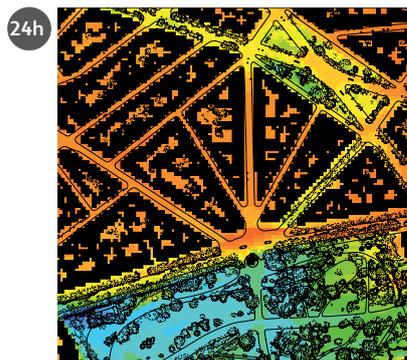
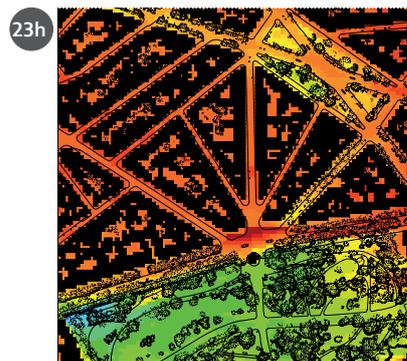
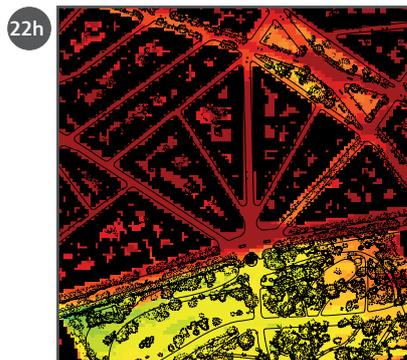


Températures ressenties à 02 heures au parc Monceau

Le réseau de voies secondaires étroites, qui était durant la journée bien protégé du soleil, s'avère relativement inconfortable la nuit. En l'effet l'étroitesse des voies et la hauteur des bâtiments cachent l'espace public de la voûte céleste et de son rayonnement froid ①. Ces rues étroites peinent donc à se refroidir et restent donc chaudes assez tard dans la nuit. Le boulevard de Courcelles ② ③ est fortement irradié en fin de journée, cette surchauffe se répercutera tard dans la nuit sur l'inconfort de l'espace public, la présence des seuls arbres ne suffit pas à contrer cette insolation tardive. Plus à l'Ouest sur le boulevard cette situation est moins prononcée ⑤, le rôle rafraîchissant du parc semble faire son effet ici, mais le halo de fraîcheur induit par le parc devient rapidement insoupçonnable dès que l'on s'éloigne trop dans la rue de Prony ⑥. Les pelouses ④, ici suffisamment arrosées, sont les zones les plus fraîches du secteur. Sous les arbres du parc ⑦, le confort thermique est un peu moindre, on retrouve ici l'effet d'obstruction de la voûte céleste par la canopée qui atténue un peu le confort au sein du parc.

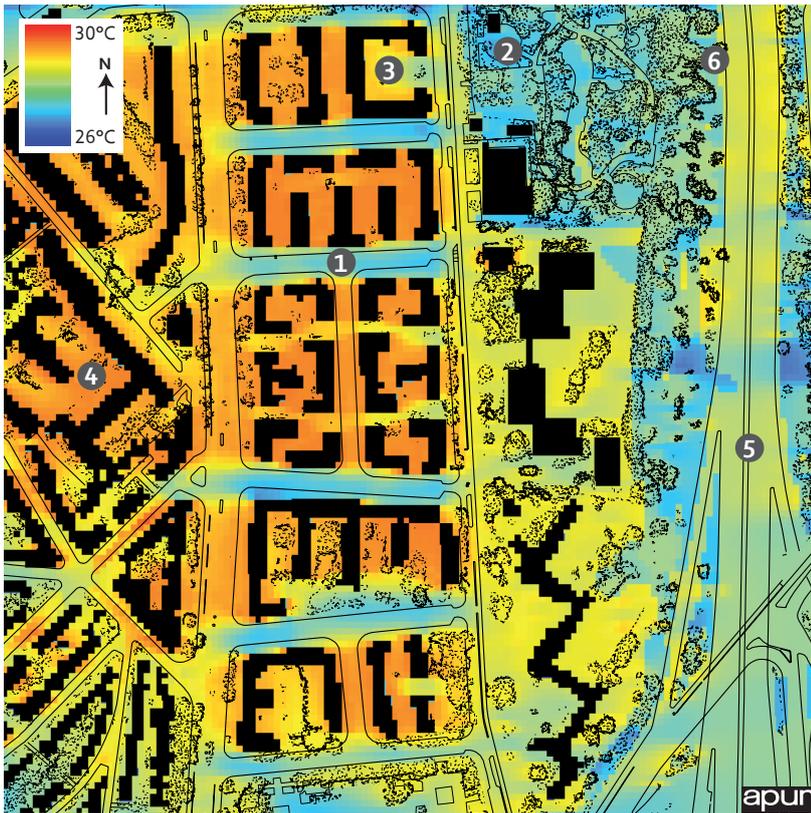


Températures de l'air relevées à la station météo de Paris-Montsouris le 18 août 2012



Températures ressenties au parc Monceau

Confort thermique nocturne au Nord de la porte de Bagnolet (20^e) un 18 août

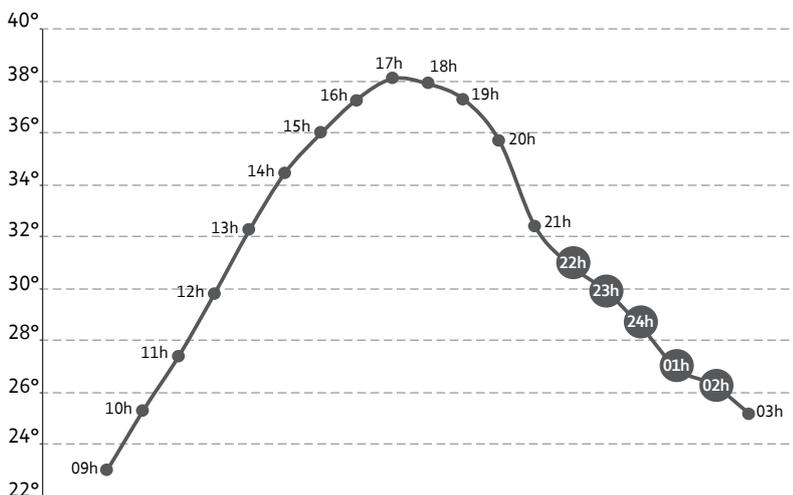


Températures ressenties à 02 heures au Nord de la porte de Bagnolet

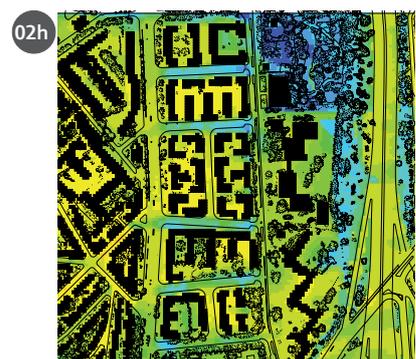
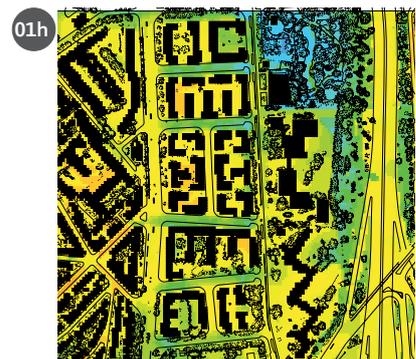
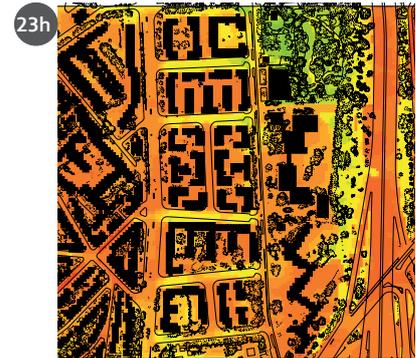
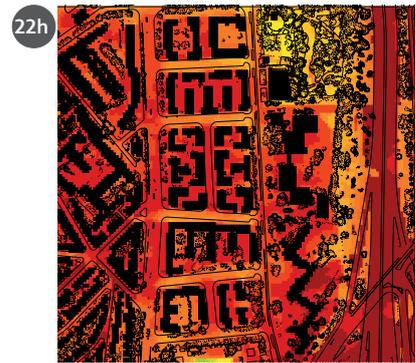
Les principales zones de confort sont ici produites par les brises thermiques et le parc. Le vent, en provenance de l'Est, s'écoule sans perturbation car le périphérique, en tranchée, ne fait pas obstruction. Ce vent, bien que faible (~3 m/s), apporte un confort notable dans les rues perpendiculaires au Boulevard Mortier ❶. Le vent accélère dans ces rues par effet venturi. On le voit sur cet exemple, le vent nocturne est un rafraîchisseur de l'espace urbain tout aussi efficace que les pelouses du parc Emmanuel Fleury ❷.

Les formes ouvertes de HBM peuvent poser problème au regard de la pollution atmosphérique. Les formes en « C » par exemple sont de nature à interrompre l'écoulement d'air chargé en polluants en provenance du périphérique et à créer des zones à la fois polluées et thermiquement inconfortables ❸. Les formes urbaines qui sont à la fois non ventilées et bâties sur de grandes hauteurs ont du mal à se refroidir par manque de vue sur la voûte céleste ❹. Le périphérique est ici placé dans une situation de refroidissement favorable ❺ puisque très ouvert sur le ciel. Néanmoins les dégagements de chaleur dus à la circulation des véhicules, qui n'ont pas été représentés ici, laissent à croire qu'il s'agit d'un espace nettement plus chaud que ce que laisse entendre la simulation ❺.

Légende commune aux 5 vignettes

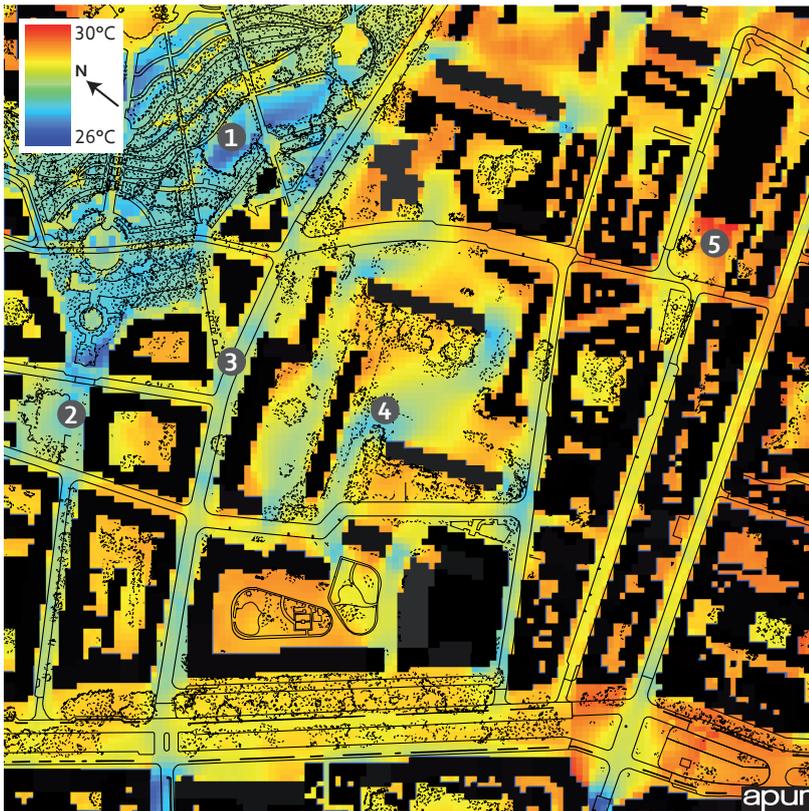


Températures de l'air relevées à la station météo de Paris-Montsouris le 18 août 2012



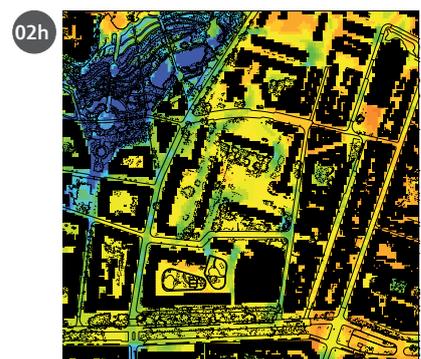
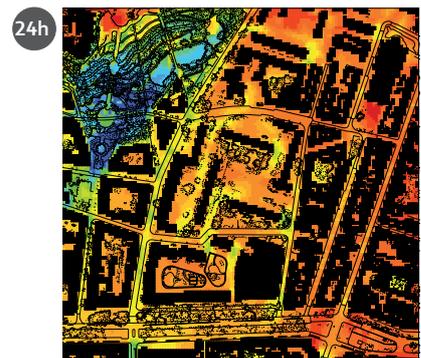
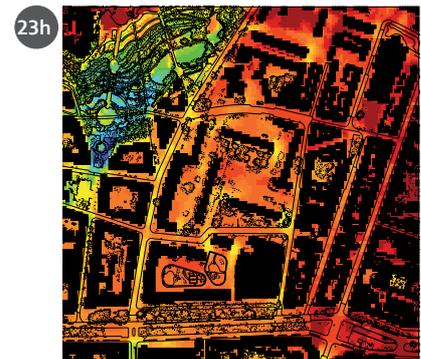
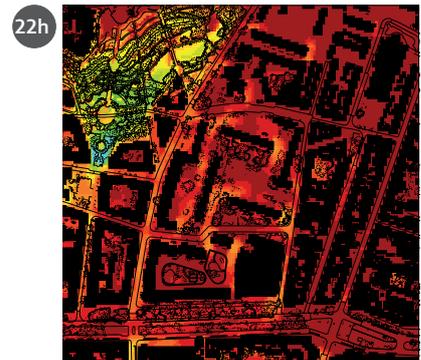
Températures ressenties au Nord de la porte de Bagnolet

Confort thermique nocturne au Sud du parc de Belleville (20^e) un 18 août

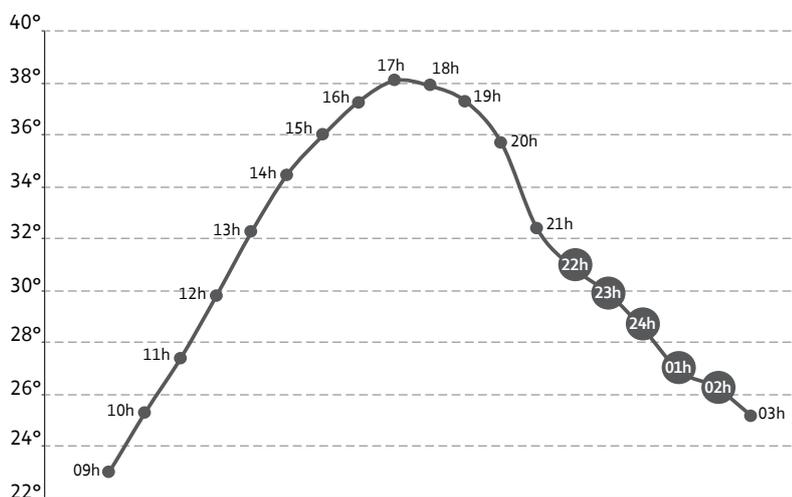


Températures ressenties à 02 heures au Sud du parc de Belleville

Le parc de Belleville, situé en hauteur, peut être considéré comme un générateur d'air frais à l'échelle du quartier. Outre les situations très confortables qu'il est apte à produire sur son emprise propre ①, l'air frais qu'il produit a tendance à s'affaïsser et à s'évacuer vers la ville en contrebas en suivant les pentes et en rasant le sol. Cet effet est notable dans les rues de Pali-Kao ② et des Couronnes ③. Les barres de logements entre la rue Julien Lacroix et la rue du Pressoir sont le lieu d'accélération ponctuelles du vent par effet venturi ④. Notons que les faces Ouest de certains bâtiments exposés tardivement au soleil continuent de rayonner tard dans la nuit et produisent des zones d'inconfort sur l'espace public, comme le parvis de l'église Notre-Dame-de-la-Croix ⑤.



Légende
commune aux
5 vignettes



Températures de l'air relevées à la station météo de Paris-Montsouris le 18 août 2012

Températures ressenties au Sud du parc de Belleville

Pendant la période diurne, le confort thermique sur l'espace public est tributaire de la capacité qu'ont les bâtiments et les arbres à protéger le sol du soleil. Le coucher du soleil est le moment où les différences de confort thermique sont les plus fortes sur l'espace public, car à ce moment les zones végétalisées apportent déjà de la fraîcheur tandis que les espaces minéralisés sont encore très marqués par l'insolation journalière et commencent le déstockage de la chaleur emmagasinée. Enfin, la nuit est la période de refroidissement : les différences que l'on constate au coucher du soleil iront en s'amenuisant au fil des heures sans pour autant s'effacer. Notons que le confort thermique, tel qu'il est présenté, est calculé à environ 1,5 m du sol.

Comme en témoignent ces simulations, les formes urbaines aux bâtis resserrés, caractéristiques des formes urbaines anciennes, sont les mieux protégées du soleil. Par contre, la nuit, ces formes ont du mal à se refroidir à cause des fronts bâtis très proches qui protègent l'espace public du vent et du rayonnement froid de la voûte céleste. Les formes modernes de type plan libre sont à l'extrême opposé, leurs espaces libres captent beaucoup le soleil en journée mais la nuit se rafraîchissent convenablement.

Ainsi, les formes urbaines anciennes génèrent des climats locaux relativement tempérés, aux différences modérées alors que les formes modernes de type barres ou plots créent des différences de confort entre le jour et la nuit plus marquées. Les formes d'HBM sont quant à elles un entre-deux.

Notons que dans tous les secteurs, le confort thermique est, la nuit, très marqué par deux paramètres : la nature du sol et l'écoulement du vent. Les sols perméables ont, sur ces simulations, été représentés avec une teneur en eau suffisante (comme s'ils étaient quotidiennement arrosés). On constate que dans ce cas, leur plus-value est très intéressante d'un point de vue climatique. Cet arrosage fréquent a pour effet indésirable d'augmenter l'humidité de l'air. Nous parlons d'effet indésirable car, toute chose égale par ailleurs, l'augmentation de l'humidité de l'air dégrade le confort thermique. Néanmoins cet inconvénient est plus que compensé par les gains de rafraîchissement apportés par l'évaporation de l'eau. Ce point est essentiel et illustre bien la nécessité de réaliser des analyses basées sur le confort thermique et non pas seulement sur la température de l'air.

Autre point décisif : l'influence des parcs et des sols perméables a un caractère très local. Par conséquent, **l'adaptation climatique relève toujours d'interventions locales aux conséquences climatiques locales.** Ainsi on trouvera un intérêt plus élevé à développer une strate végétale diffuse dans la ville que de chercher à créer de nouveaux parcs urbains car leur influence se restreint à leur emprise propre et n'impacte pas la ville au-delà des rues adjacentes⁽⁴⁾. Un autre facteur, dont l'influence est majeure la nuit, est la circulation de l'air. Le vent, généralement très faible durant les épisodes de canicule, a été représenté de façon arbitraire selon les secteurs. La particularité de ces vents nocturnes est de ne pas suivre une direction générale commune à toute la région Ile-de-France (à l'inverse des fameux « vents dominants » que l'on retrouve lors des épisodes dépressionnaires). Ici les vents sont le produit des différences locales de relief et de température en ville. Ces vents même s'ils sont faibles, sont capables d'augmenter assez efficacement le confort thermique, malheureusement leur survenue est fortement aléatoire.

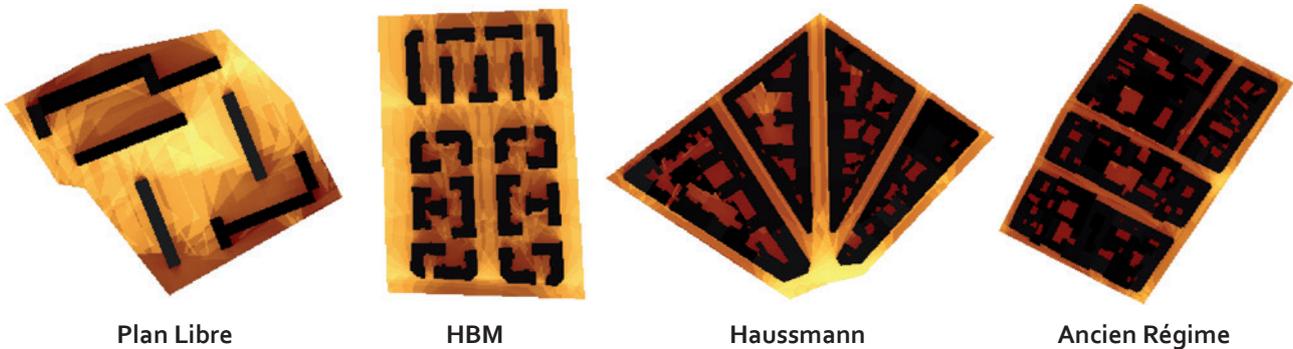
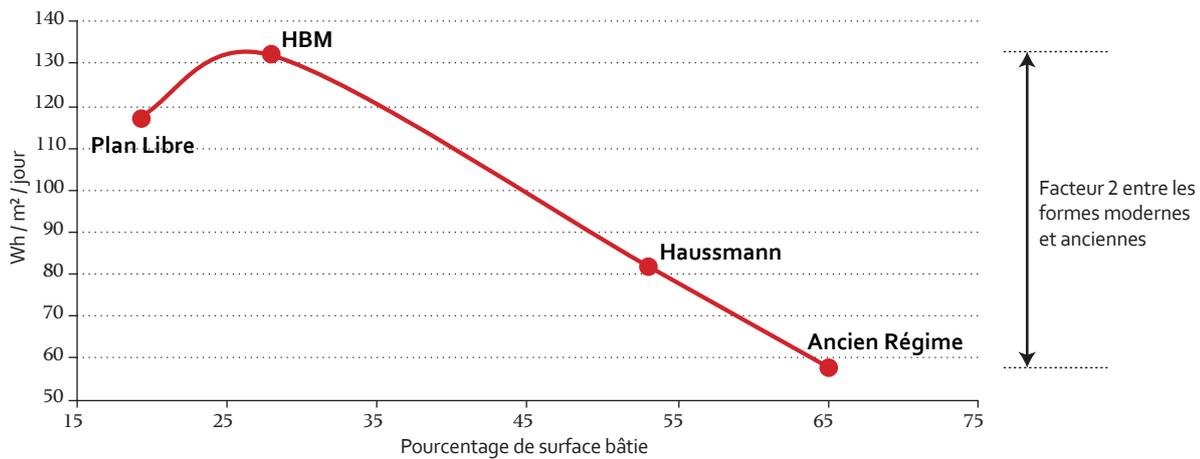
4- Cet enseignement vient confirmer ceux de l'étude EPICEA (voir bibliographie).

1.3 Limites de l'exercice

L'exercice qui a été mené comporte plusieurs limites.

Les simulations que nous venons d'étudier sont représentatives d'une canicule installée depuis relativement longtemps, on pourra dire qu'elles illustrent une journée de canicule faisant suite à plusieurs jours de canicules, car c'est le temps qu'il faut pour que les bâtiments parisiens, notamment les plus anciens, perdent toute la fraîcheur qu'ils auront accumulée avant la canicule. Ainsi, ce que ne montrent pas ces analyses, c'est la période transitoire qui existe lorsque la canicule s'installe. Les bâtiments les plus anciens résistent bien aux premiers moments de la canicule en raison de l'importance des masses thermiques qui les compose, des murs mitoyens faits en maçonneries lourdes, des rues très étroites qui protègent du soleil, et des courettes qui ventilent les logements la nuit ⁽⁵⁾.

Ensoleillement journalier moyen des espaces libres en été de quelques formes urbaines parisiennes



Cette interaction est d'autant plus grande que la densité bâtie est forte. Dans l'exemple du secteur de Belleville, la forme libre située entre la rue Julien Lacroix et le boulevard de Ménilmontant est bâtie à 20 % tandis que dans les formes anciennes le rapport est inverse. Par exemple, le quartier situé entre la rue de Beaubourg et la rue du Temple est bâti à 65 % comme cela est présenté ci-dessous.

La résilience climatique des formes anciennes est élevée en raison de cette très forte occupation du sol qui protège du soleil le sol et de l'inertie thermique des masses bâties qui transfère de la fraîcheur aux voies. Les modèles numériques calculant le confort thermique n'arrivent pas encore à rendre compte de ce trait caractéristique, ce qui revient à placer ces formes à forte inertie dans une situation représentative d'une canicule installée depuis longtemps.

Concernant les formes modernes, les espaces libres sont importants mais les bâtiments agissent comme de véritables capteurs solaires et la surchauffe des logements apparaît dès les premiers jours de canicule. Ces formes bâties sont par construction moins robustes mais possèdent un atout climatique qui est leur strate végétale intégrée à l'îlot.

Si les outils de simulation climatique que nous avons pu tester donnent des résultats intéressants sur les formes urbaines postérieures au XIX^e siècle, ils s'avèrent assez inopérants pour les formes urbaines les plus anciennes (XVII^e et XVIII^e).

5- Les simulations que nous avons menées sur des quartiers datant des XVII^e et XVIII^e siècles n'arrivaient pas à rendre compte de l'interaction forte qui existe entre l'espace public des tissus anciens et les bâtiments, c'est pour cela qu'elles ne sont pas présentées ici.

2. Enseignements pour la mise en place de solutions d'adaptation climatique à l'échelle de tout Paris

2.1 Les quartiers les plus chauds sont-ils aussi les plus pollués ?

En été, durant les épisodes de canicules, il existe des régimes de vent bien particuliers qui se mettent en route la nuit. Ces vents sont faibles, au plus 3 mètres par seconde. La compréhension de ces systèmes de vent est essentielle en été car, nous l'avons vu précédemment, les lieux exposés à cette ventilation nocturne sont aussi les plus agréables.

Ces vents sont appelés brises thermiques car leur survenue est liée aux différences climatiques qui existent au sein de la ville. La nuit, l'air chaud de la ville remonte en altitude, l'air froid, lui, est « plaqué » au sol et tend à s'écouler de façon hydraulique en suivant les pentes de la ville. La brise thermique ressemble dans son fonctionnement à un écoulement de rivière avec ses affluents, ses vallées. En première approximation, les brises thermiques suivent les pentes de la ville, adoptent souvent les lits des anciens rus pour converger vers la vallée de la Seine, couloir de vent principal, aérant la ville d'Est en Ouest.

La connaissance des brises thermiques est capitale pour traiter correctement la question du confort d'été la nuit en ville. La survenue des brises thermiques peut être documentée suivant un mode probabiliste. La multitude de facteurs amorçant le déclenchement des brises thermiques est tel qu'il n'est pas possible de prévoir l'intensité des brises en fonction des lieux et des heures.

La connaissance des brises thermiques est capitale dans la mesure où elle révèle de très fortes inégalités territoriales au regard du confort thermique urbain. Certaines zones sont systématiquement à l'abri des vents nocturnes quand d'autres se révèlent systématiquement mieux aérées. La conséquence principale de ce constat est que tout aménagement de l'espace public à des fins d'adaptation climatique ne doit en aucun cas enrayer l'écoulement naturel des brises thermiques. Ce point interroge par exemple l'usage d'arbres d'alignement à des fins de rafraîchissement climatique. Cet usage doit être adapté aux situations urbaines rencontrées, les avantages et inconvénients doivent être pesés.

Autre point, la question de la pollution atmosphérique : si le vent nocturne est un atout considérable dans l'amélioration du confort thermique sur l'espace urbain, il est aussi un vecteur assurant la répartition des polluants. Les zones les moins aérées du territoire peuvent se révéler de véritables pièges dans lesquels les polluants stagnent et s'accumulent. Ainsi les zones les plus frappées par l'inconfort climatique sont aussi celles dans lesquelles la qualité de l'air y est moindre.

La régulation des flux routiers revêt une importance particulière lors d'épisodes de canicule. Déjà mentionné dans le cahier #1, l'automobile génère trois effets indésirables lors d'épisodes de canicule :

- L'automobile a un effet direct sur l'ICU, au travers du fonctionnement du moteur qui crée un dégagement de chaleur et contribue à l'échauffement de la ville.
- Dans le cas de véhicules essence ou diesel, deux effets indirects notables doivent être soulignés. Le premier concerne l'effet de serre additionnel des polluants (oxydes d'azote, ozone, etc.), ces gaz à effet de serre ont un effet local qui empêche le refroidissement des villes la nuit⁽⁶⁾. Le second effet est l'effet sur la santé puisque les polluants atmosphériques affecteront les personnes déjà les plus touchées par l'ICU.

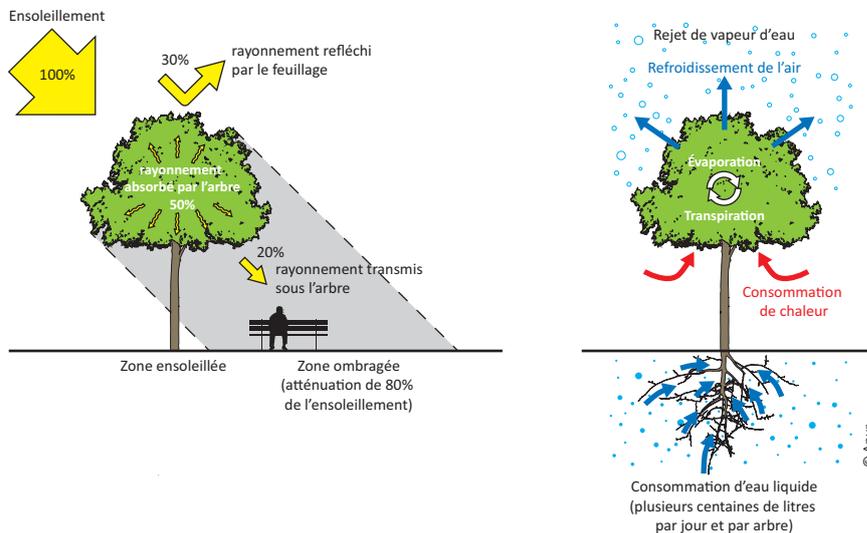
Conclusion :

- *La connaissance des vents nocturnes appelés brises thermiques est essentielle dans la cartographie des zones d'inconfort du territoire parisien, leur documentation fera l'objet du cahier # 4 (à paraître).*
- *Les zones les moins bien rafraîchies par les vents nocturnes sont aussi parmi les plus polluées. Il convient de considérer la régulation de la circulation routière comme un levier évitant que des populations soient doublement affectées par l'inconfort thermique et la dégradation de la qualité de l'air.*

6- Cet effet de serre urbain a été rendu célèbre par le « smog » de Los Angeles

2.2 Les plantations d'arbres d'alignement à Paris

Les plantations d'arbres d'alignement sont un atout majeur pour garantir des situations de confort sur l'espace public par temps de canicule. Les arbres agissent de deux façons. Tout d'abord ils créent des ombres et protègent donc le sol du soleil ; cet avantage est un atout aussi a posteriori car, lorsque les revêtements de sol sont de nature minérale, les ombrages empêchent le sol de stocker de l'énergie le jour et de la restituer la nuit. Deuxièmement l'arbre de par sa consommation d'eau se comporte la nuit comme un climatiseur de l'espace urbain puisqu'il évapore et donc rafraîchit l'air ambiant (voir figure ci-dessous).



En journée les situations d'inconfort thermique sur l'espace public peuvent être largement traitées par les arbres d'alignement. La faculté qu'ont les arbres à créer des zones d'ombre sur l'espace public sera ainsi mise à profit. En journée l'inconfort thermique peut se résumer de façon assez simple : l'espace public est-il suffisamment protégé du soleil ? Si cela n'est pas le cas les arbres peuvent apporter une réponse simple moyennant quelques précautions.

De façon schématique les essences d'arbres que l'on rencontre sur les voies parisiennes les plus larges peuvent se répartir en trois catégories : platane/marronnier, érable/tilleul, sophora. Ces trois grandes familles coexistent dans Paris ; historiquement, leur usage a été dévoué à la composition paysagère. L'embellissement de rues, boulevards ou avenues a pu être réalisé grâce au choix porté sur ces différents types d'arbres. Au-delà de l'évidente vocation paysagère que nous venons d'évoquer, les essences sont choisies pour leur robustesse et leur capacité à vivre dans un milieu urbain relativement agressif.

En terme d'ICU, chacune de ces essences a des répercussions sur le confort climatique urbain qui lui sont propres. Deux critères doivent être considérés, l'opacité du feuillage et la volumétrie de la canopée.

essences	platane	marronnier	érable	tilleul	sophora
hauteurs	25 à 30 m	25 à 30 m	10 à 15 m	15 à 20 m	15 à 20 m
« silhouette de la canopée (lorsque l'arbre est jeune) »					
« transparence de la canopée »	20 %	20 %	40 %	40 %	60 %

© Apur

Trois grandes familles d'arbres d'alignement rencontrées sur les voies parisiennes. La modulation de l'ICU par l'arbre sera tributaire, entre autres, de la volumétrie de sa canopée et de sa transparence.

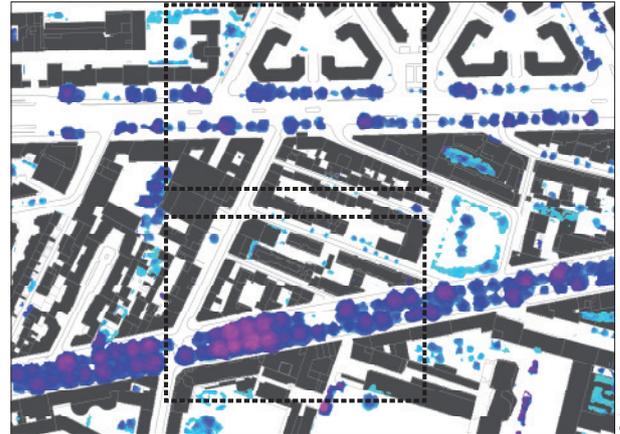
La densité de plantation

La densité de plantation est un critère essentiel permettant de qualifier le confort climatique apporté par les arbres sur l'espace public. Sur l'exemple ci-dessous, on a choisi de comparer l'impact de deux voies plantées de platanes dans le 18^e arrondissement : le Boulevard Ney et la voie composée par les rues Leibnitz et Belliard. Le relevé précis de la végétation par une campagne de mesure aérienne (LIDAR) permet de restituer toute la complexité de la canopée. Les isolignes donnent une retranscription fidèle du volume occupé par la canopée.

Relevé de l'altitude de la canopée préalable au calcul de confort thermique sur l'espace public



© InterAtlas

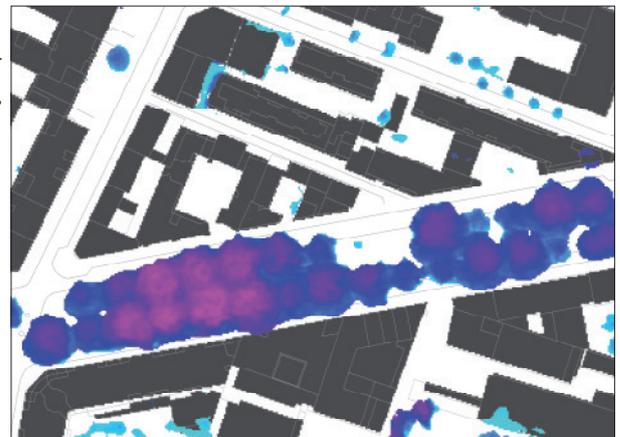


© Apur

Relevé par campagne aérienne des volumes occupés par les canopées urbaines



© InterAtlas



© Apur

Zoom : restitution de la canopée des platanes des rues Leibnitz et Belliard (18^e)



© InterAtlas

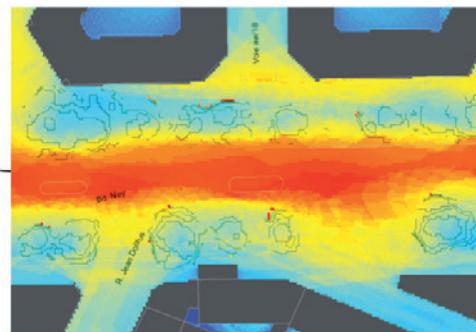
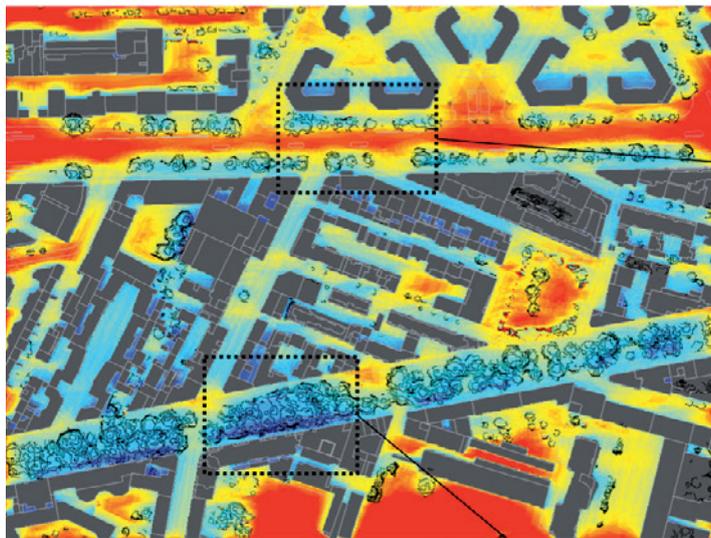


© Apur

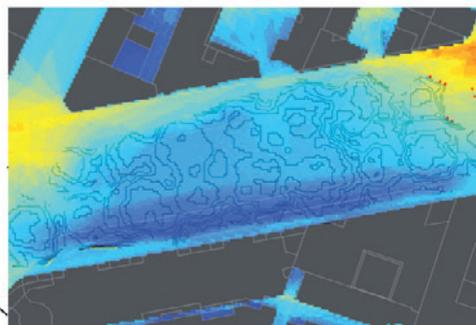
Zoom : restitution de la canopée des platanes boulevard Ney (18^e)

Calcul de confort thermique en moyenne journalière un 21 juin

Comparaison de deux alignements de platanes dans le 18^e arrondissement



Alignement de platanes très espacés bd Ney : l'espace public est relativement mal protégé par les arbres dont la présence est trop diffuse pour garantir une protection solaire suffisante.



Alignement très dense de platanes rues Leibnitz et Belliard : l'espace public est bien protégé par les arbres tout au long de la journée.

Comme le confort climatique est une donnée extrêmement variable dans le temps, on peut, à des fins de comparaisons, l'étudier en moyenne sur la journée. La figure ci-dessous montre le confort moyen ressenti sur l'espace public et en particulier sous les arbres. La densité de plantation a un impact notable sur le confort thermique : sur le boulevard Ney la trop faible densité de plantations rend très inconfortable la majeure partie de l'espace public, inversement dans les rues Leibnitz et Belliard la protection solaire offerte par les platanes est totale, l'espace est confortable, le ressenti climatique du piéton est très peu affecté par l'insolation, il ressent une température proche de celle de l'air ambiant.

Le choix des essences

Le deuxième paramètre que nous pouvons citer est celui de l'impact climatique consécutif au choix des essences. Sur l'exemple ci-dessous, une comparaison est effectuée entre un alignement de platanes et de sophoras. Le sophora est un arbre à la canopée particulièrement clairsemée, sa plus-value climatique est très inférieure à celle du platane (voir figure ci-dessous).

Les cas présentés ont permis de mesurer l'impact d'arbres d'alignement sur le confort climatique en ne retenant que deux critères : la densité de plantation, puis le type d'essence. Néanmoins ces critères à eux seuls ne permettent pas d'envisager des recommandations sur les politiques de plantations. En effet, l'arbre d'alignement n'est pas dissociable du contexte urbain dans lequel il est employé. Ici nous avons retenu des voies orientées Est-Ouest et relativement larges. À Paris, de multiples situations se rencontrent nous tenterons d'en documenter quelques-unes.

Calcul de confort thermique en moyenne journalière un 21 juin

Alignement dense de platanes (bd Haussmann - 9°)



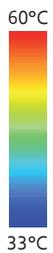
© InterAtlas

Alignement de sophoras (bd Poissonnière - 10°)

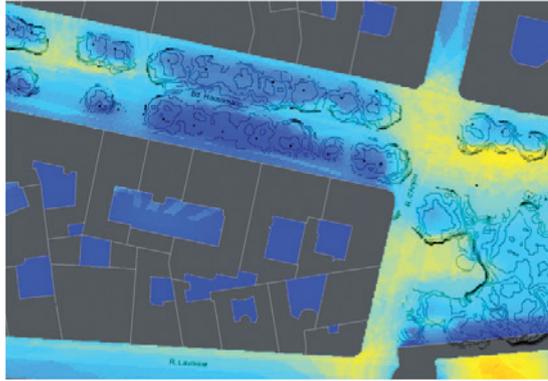


© InterAtlas

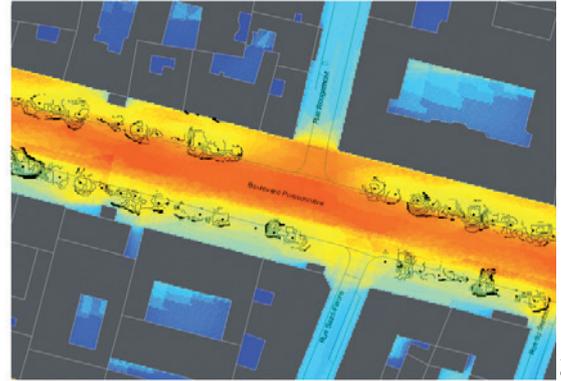
Température ressentie en moyenne journalière un 21 juin



© Apur



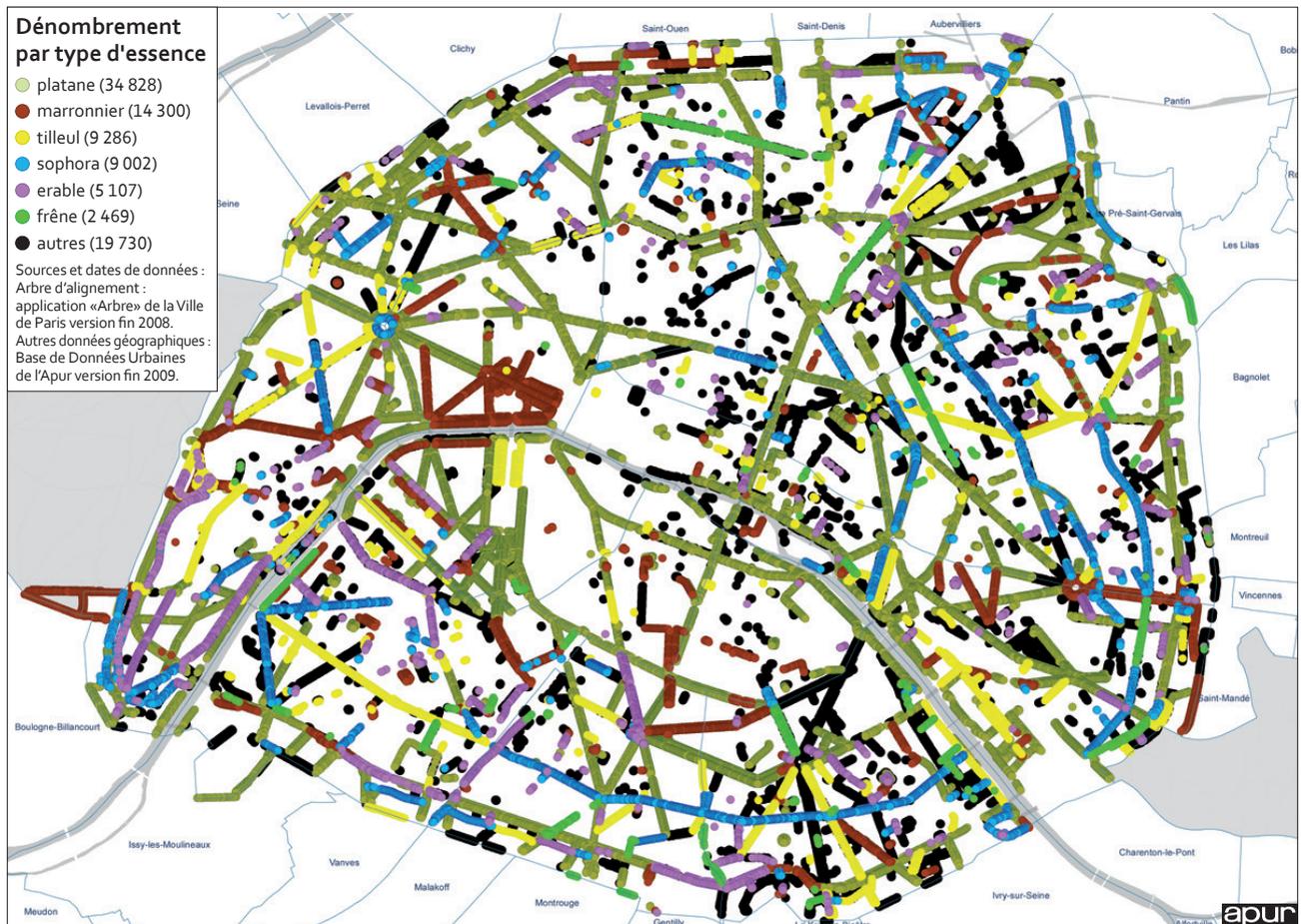
L'espace public est bien protégé par les arbres toute la journée



© Apur

L'espace public est mal protégé par les arbres car leur feuillage est trop clairsemé

Carte des arbres d'alignement

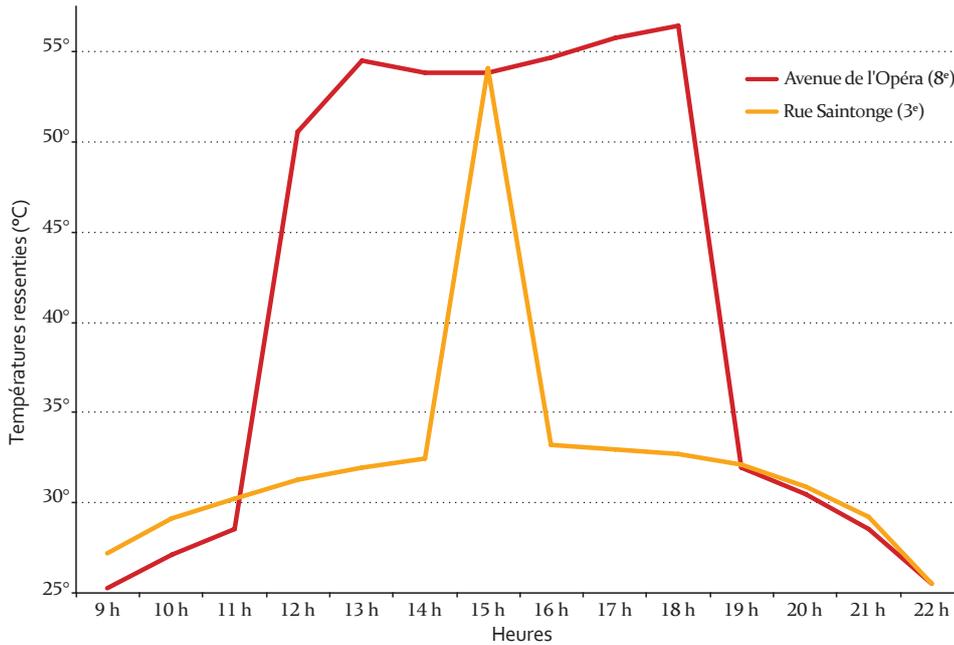


2.2.1 Trois critères pour choisir comment planter les voies de Paris

Au moins trois critères interviennent dans l'identification de voies pour lesquelles la plantation d'arbres d'alignement apparaît comme une plus value intéressante. Le premier critère, le plus évident est l'**étroitesse de la voie**. Les voies les plus étroites ne sont que faiblement ensoleillées, et la plus value de plantation y est nulle, voire impraticable dans le cas de rues très étroites.

Ici l'indicateur retenu pour qualifier l'étroitesse de la voie est le rapport H/L (hauteur du front bâti divisé par la largeur de la voie).

Confort thermique sur l'espace public de deux voies parisiennes en journée un 21 juin



Vue hémisphérique, avenue de l'Opéra (8°), H/L = 0,5
Forte perméabilité solaire du tissu

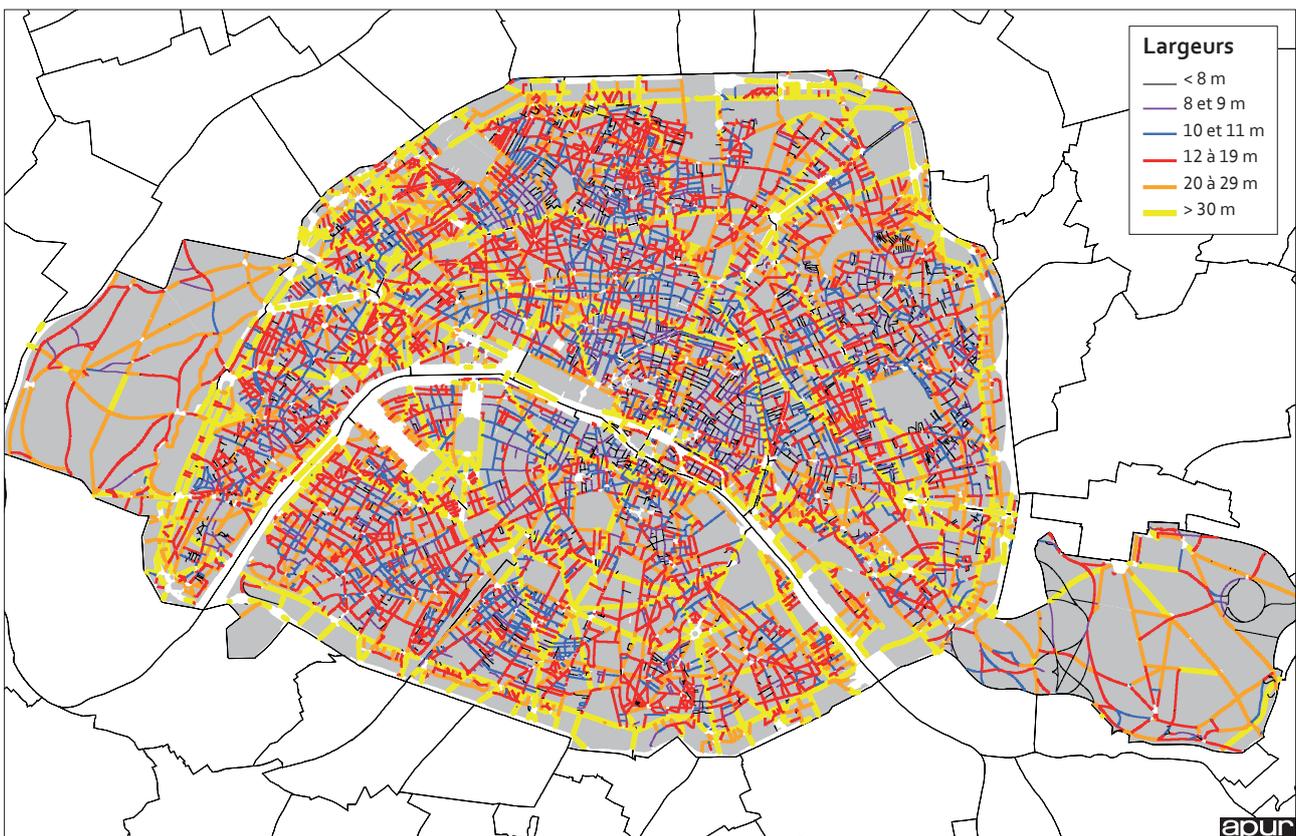


Vue hémisphérique, rue Saintonge (3°), H/L = 3
Faible perméabilité solaire du tissu

Typologies des voiries parisiennes

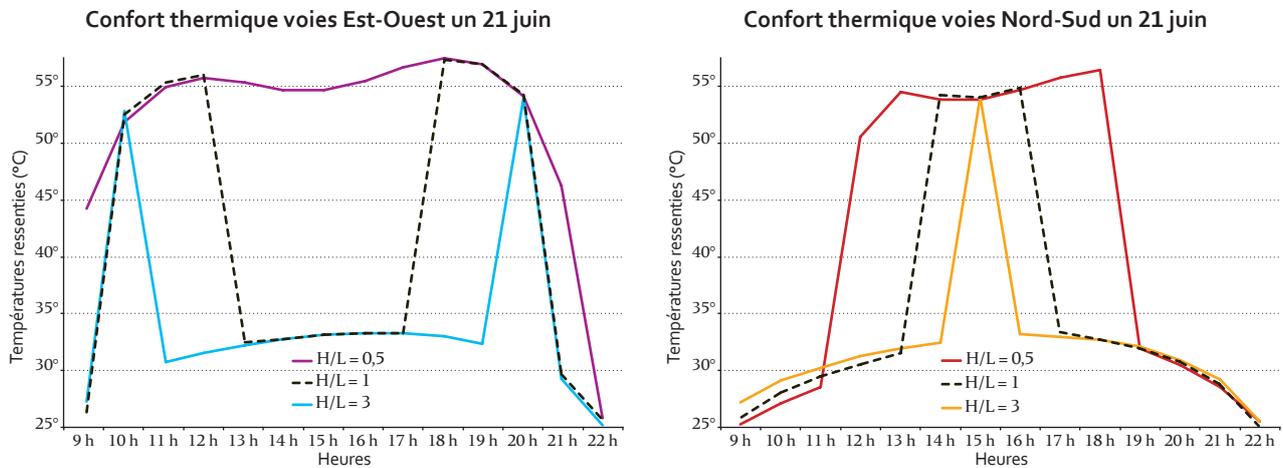
Largeurs de voies	< 8 m	10 et 11 m	12 à 19 m	20 m	> 30 m
H/L	> 3	2	1	1,5	< 0,5
Rues	rue de Bretonvilliers (1 ^{er})	rue Vieille du Temple (3 ^e)	rue du Faubourg du Temple (11 ^e)	rue de Rivoli (4 ^e)	bd de Sébastopol (3 ^e)
Photos					
Vues hémisphériques vers le ciel					
Exemples de voies	rue Charlot villa d'Alésia, rue Séguier, rue Mouffetard, rue de Plaisance...	rue des Vignes, rue Poliveau, rue de Seine, rue La Bruyère, rue de l'Ouest...	rue des Morillons, rue Nationale, rue de Patay, rue d'Avron, rue Montmartre...	rue de Sèvres, rue de Rennes, rue des Écoles, rue Monge, rue Gay-Lussac...	av. de l'Opéra, bd Voltaire, bd Haussmann, bd Magenta, bd de Sébastopol...

© Apur



apur

Le deuxième indicateur qui permet de qualifier les voies parisiennes est **leur orientation par rapport au Nord**. L'orientation déterminera les heures auxquelles le soleil pénètre dans la voie et crée des situations d'inconfort climatique. Nous avons choisi de retenir dans les courbes suivantes la date du 21 juin pour illustrer notre propos. Cette date, bien qu'arbitraire, ne correspond pas à un moment où la probabilité d'épisodes caniculaires est la plus forte à Paris mais au moment où l'insolation de la ville est la plus forte. Ainsi, les simulations réalisées le 21 juin font ressortir la plus-value maximale des plantations en tant que protections solaires.

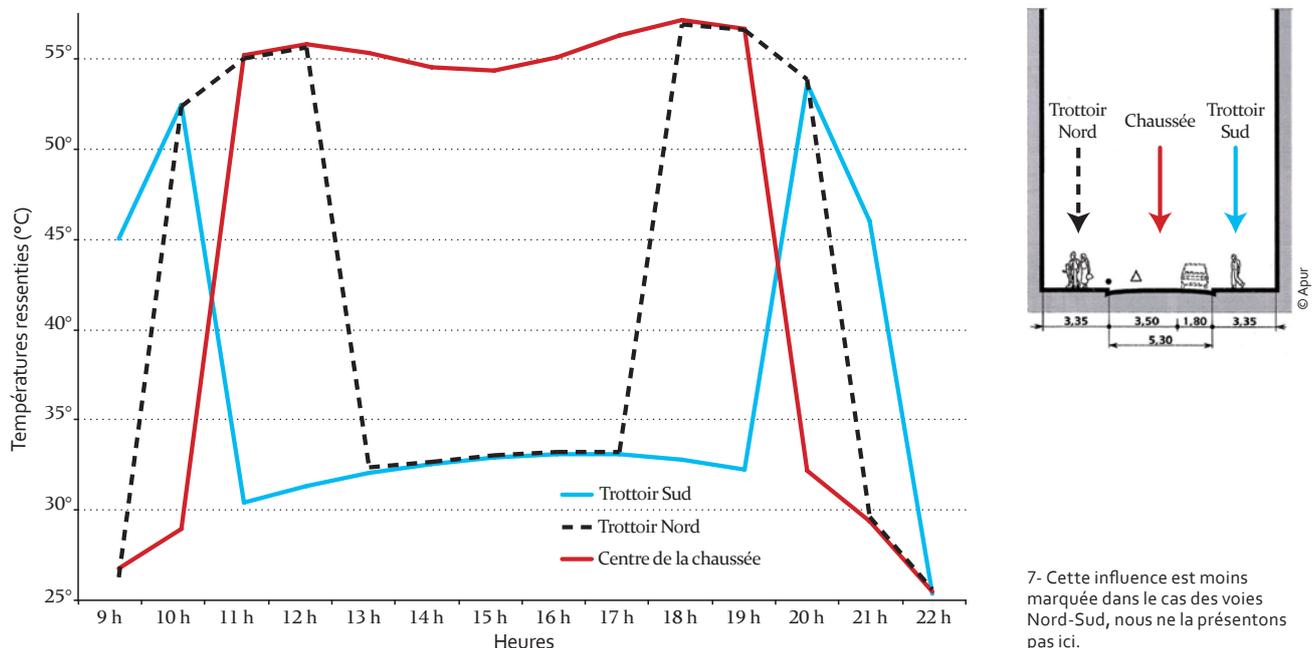


Les voies Nord-Sud sont inconfortables aux alentours de 13 heures, la plage horaire de l'inconfort s'allonge à mesure que la voie gagne en largeur. Les voies Est-Ouest sont inconfortables le matin, puis le soir. De même que précédemment, la fenêtre horaire de l'inconfort grandit à mesure que la voie s'élargit.

Les rues Est-Ouest sont affectées d'un ensoleillement cumulé plus long que les voies Nord-Sud, l'inconfort thermique y est plus long et plus tardif. Ce dernier point importe car il aura des répercussions la nuit, les voies qui emmagasineront les derniers rayons du soleil seront affectées aussi d'un inconfort qui se prolongera une partie de la nuit.

Enfin, le dernier critère qui intervient dans cette analyse est **la position du piéton sur la voie**. Dans les cas présentés précédemment nous avons placé le piéton au centre de la voie afin de ne pas introduire trop de complexité dans le déroulé de l'exposé. Mais le piéton n'a qu'exceptionnellement sa place au centre de la voie parisienne, il convient d'ajouter à ce qui précède deux autres cas qui correspondent aux deux trottoirs rencontrés classiquement de part et d'autre de la voie parisienne. Cette nuance possède une importance notable dans le cas des voies orientées Est-Ouest ⁽⁷⁾.

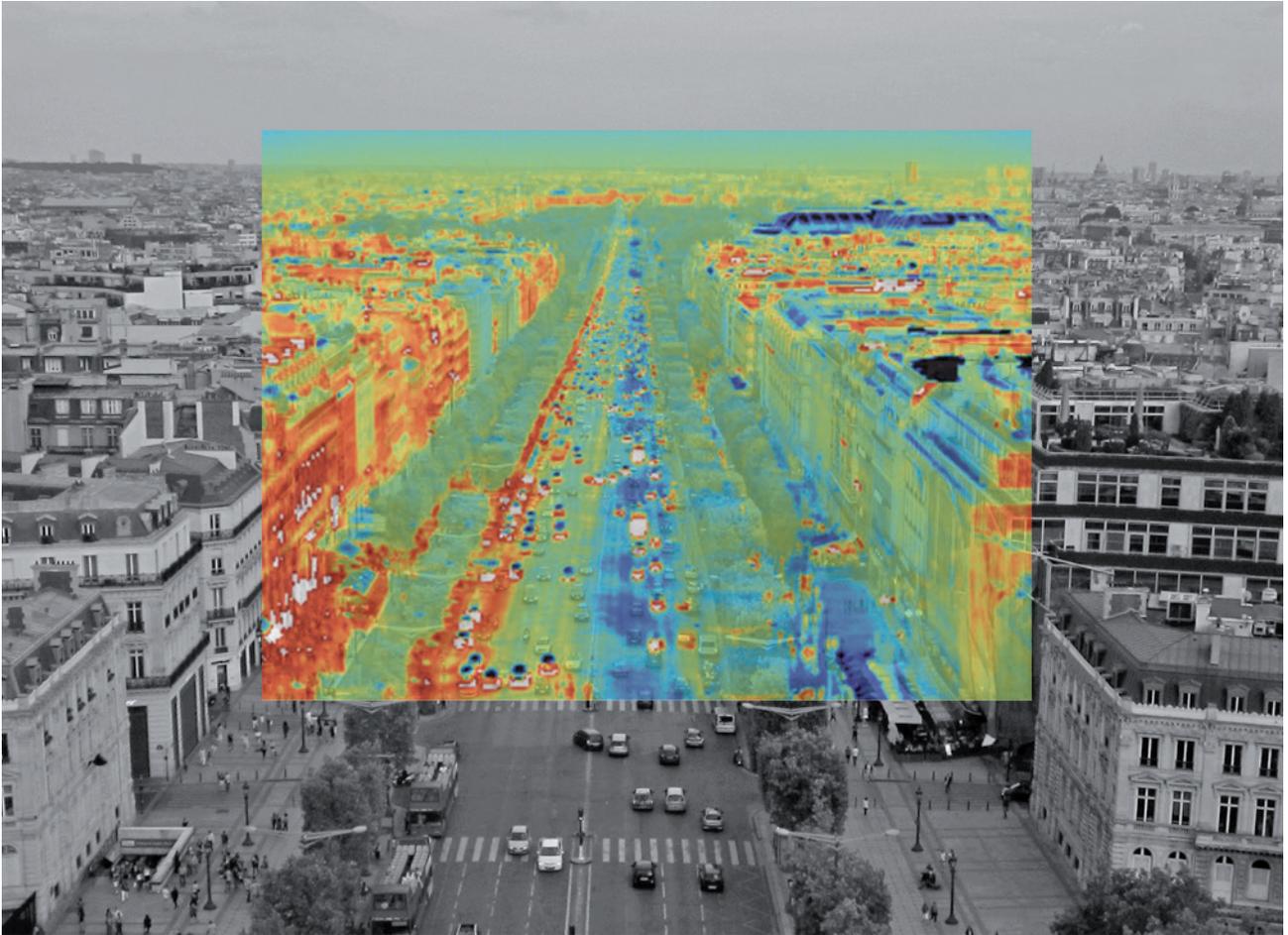
Confort thermique sur une voie Est-Ouest de 12 m (H/L = 1) selon la position dans la voie un 21 juin



7- Cette influence est moins marquée dans le cas des voies Nord-Sud, nous ne la présentons pas ici.

La position au centre de la chaussée est une position qu'il convient de documenter car elle concerne aujourd'hui les cyclistes ⁽⁸⁾ et parce que la cohabitation de tous les modes sur la chaussée ⁽⁹⁾ (re)devient de plus en plus possible grâce à la diminution progressive des vitesses des circulations.

Pour les voies les plus larges ($H/L = 0,5$ ou $H/L = 1$), il existe une réelle différence de confort thermique entre la rive Nord et la rive Sud de la voie. La rive Nord étant systématiquement la plus inconfortable. Cette différence s'estompe à mesure que la voie se rétrécit (ou que H/L augmente).



Avenue des Champs-Élysées (8^e arrondissement) le 3 Août 2008 à 20 h 30 depuis l'Arc de Triomphe. Le fondu entre la thermographie infrarouge et la photographie en noir et blanc fait ressortir la différence de confort thermique entre la rive Nord (à gauche sur l'image) et la rive Sud (à droite sur l'image) de cette avenue.

La diversité des situations rencontrées supposera que les aménagements prévus sur l'espace public soient réalisés en adéquation avec les usages et leur temporalité. Certaines voies sont climatiquement sensibles en milieu de journée (voies Nord-Sud), quand d'autres le sont le matin et le soir (voies Est-Ouest). Dans une même voie certains trottoirs sont toujours inconfortables quand d'autres ne le sont jamais.

8- Le confort thermique du cycliste se pose en des termes différents de celui du piéton notamment à cause de l'effort physique et l'existence d'un vent relatif.

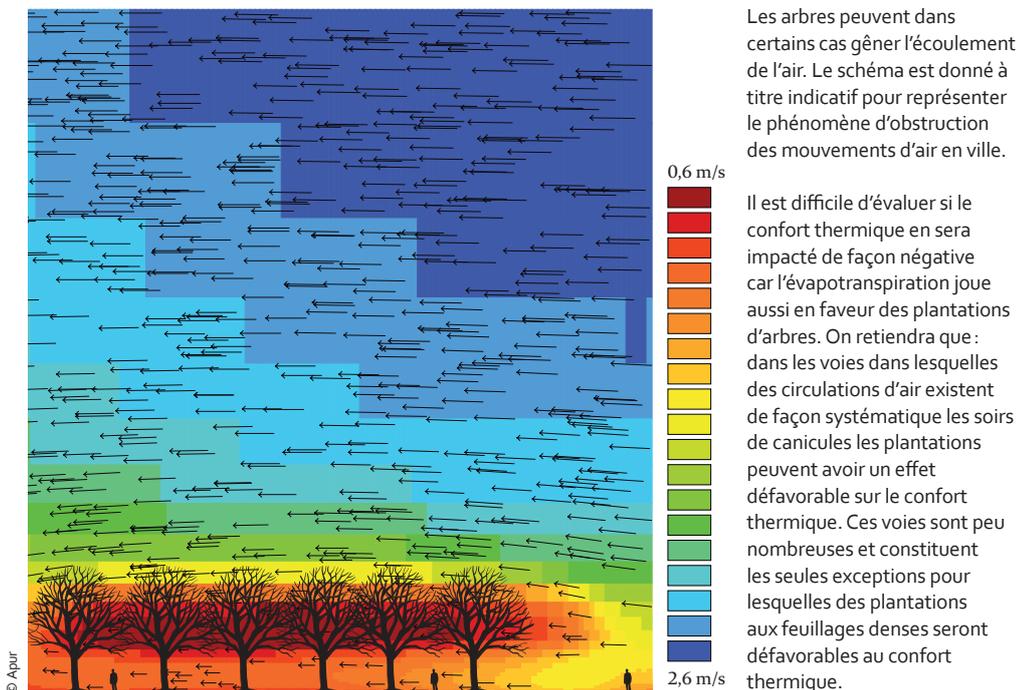
9- Historiquement, la ville haussmannienne a été d'ailleurs conçue dans cette optique, le mouvement moderne qui plaide pour la ségrégation des modes évoluait dans un monde où l'énergie mise à la disposition des modes de transports était perçue comme inépuisable et bon marché.

Au-delà de ces considérations, il faut noter que les solutions d'aménagements climatiques sont profondément asymétriques: sur une avenue Est-Ouest, si un élargissement de trottoir est envisagé, la rive Sud sera à privilégier, en revanche si une plantation d'arbres d'alignement est envisagée alors la rive Nord sera préférée. Si les voies historiques ont plutôt recherché à valoriser l'ordre et la symétrie (tailles des arbres normées selon les espaces, plantations bilatérales, etc.), les solutions climatiques vont dans le sens opposé, celui du désordre et de la dissymétrie (taille des arbres minimale ou inexistante, plantation unilatérale, etc.). Pour les architectes urbanistes, cette opposition formelle peut être vue comme une occasion de redéfinir les bases de la conception de voies plantées à Paris. L'argument climatique offre une opportunité d'évolution par rapport aux conceptions classiques en affinant la palette des préoccupations inhérentes aux choix d'essences d'arbres et leurs modes de plantations.

2.2.2 Les arbres et la ventilation nocturne

La présence d'arbres sur l'espace public est à double tranchant : les arbres apportent ombre le jour, fraîcheur la nuit mais ils sont aussi susceptibles de s'opposer au passage du vent.

Réduction de la vitesse des brises thermiques par une plantation d'arbres d'alignements



Alors comment choisir ? Tout d'abord, il faut remarquer que les problèmes climatiques posés sont de natures différentes : la plus-value de l'arbre est certaine, alors que sa moins-value est probable. Il est sûr que l'arbre fera de l'ombre le jour et apportera de la fraîcheur la nuit, alors que son opposition aux mouvements d'air dépend de la survenue ou non des vents nocturnes qui eux régulent le climat parisien avec une occurrence imprévisible.

Généralement les arbres seront donc employés afin d'assurer le confort climatique des espaces, néanmoins de façon exceptionnelle il faudra renoncer à leur usage dans certains cas très spécifiques de lieux pour lesquels on est sûr de la récurrence des vents nocturnes, comme par exemple les voies édifiées en lieu et place d'anciens rus.

Une autre façon de procéder est de jouer sur la morphologie des arbres afin que la canopée perturbe le moins possible les écoulements d'air nocturne. On peut par exemple suggérer de tester à cet effet des essences connues pour leur faible prise au vent et dont la densité de feuillage est suffisante pour protéger de l'insolation, il semble utile pour cela de se référer aux plantations employées dans les régions plus méridionales.

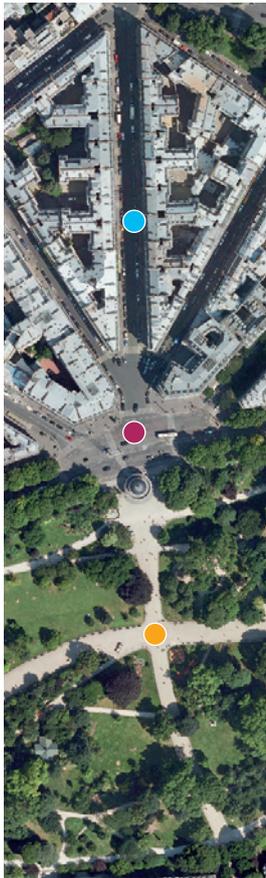
Conclusion :

- Le choix d'essences d'arbres aux feuillages denses permet d'assurer un confort thermique sur l'espace public. Les politiques de taille des arbres qui auraient tendance à réduire la taille des canopées vont dans le sens d'une aggravation du confort climatique.
- Les voies Est-Ouest sont les voies dont l'inconfort thermique est le plus élevé. Dans le cas de voies larges le trottoir Nord est à traiter en priorité lors de nouvelles plantations.
- De façon prospective les essences choisies doivent pouvoir s'acclimater à un climat plus sec et plus chaud, conséquence du changement climatique, l'emploi d'essences méridionales devrait être mis en œuvre dès aujourd'hui de façon expérimentale. Le choix d'essences ne perturbant pas les écoulements d'air la nuit sera à privilégier, les essences possédant une canopée dense et plate correspondent à un optimum théorique, puisqu'elles produisent un effet de pergola sur l'espace public.
- Le dernier critère (non développé dans ce document) qui intervient dans le choix des essences est celui de la pérennité du feuillage. Les arbres à feuilles caduques seront préférés pour deux raisons : les ombres nécessaires en été doivent disparaître en hiver afin de laisser rentrer un maximum de soleil dans les habitations afin de modérer les consommations de chauffage, de plus la régénéscence saisonnière des feuilles permet aux arbres de mieux résister à la pollution sur le long terme.

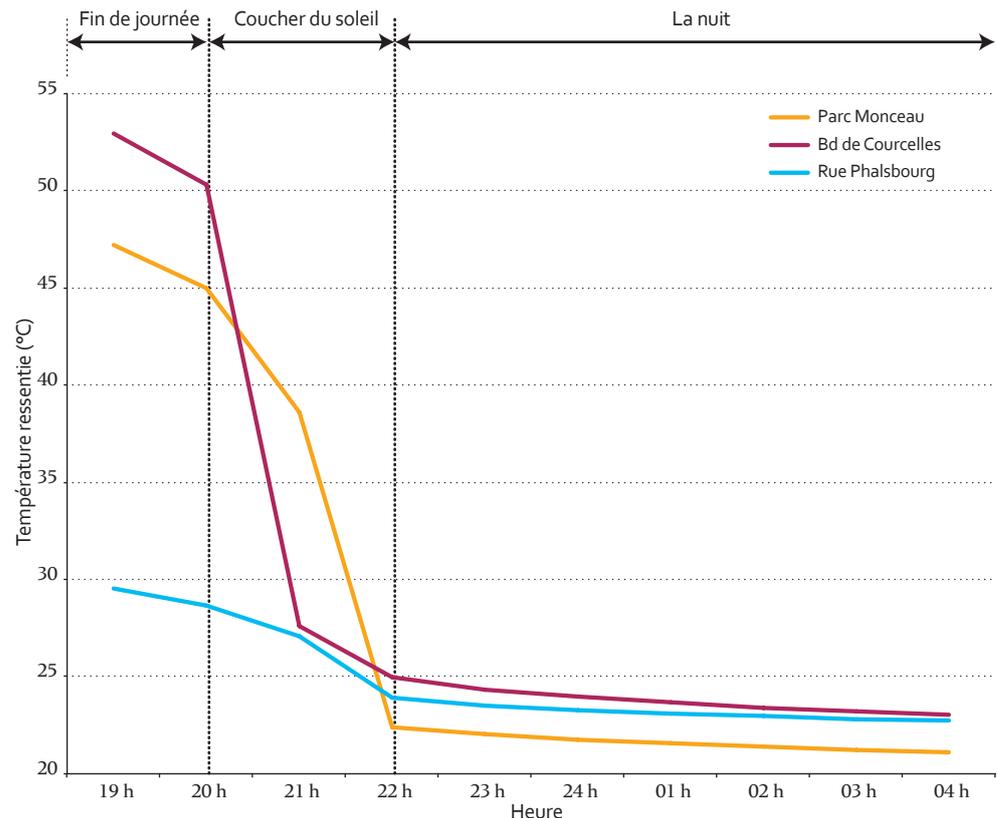
2.3 Comment repenser l'usage des matériaux sur l'espace public ?

2.3.1 Comportement thermique des matériaux actuellement employés à Paris

La nature du sol de l'espace public est le deuxième paramètre le plus important, après le vent, sur lequel il faut jouer pour améliorer le confort du piéton. Comme nous l'avons vu dans la partie consacrée à l'étude des formes urbaines, en journée le confort du piéton est tributaire de la présence de protection solaire que forment bâtiments et arbres. La nuit c'est la nature du sol qui devient décisive, comme le montre l'exemple ci-dessous.



Refroidissement comparé de trois types d'espaces publics : quartier du Parc Monceau un 21 juin en soirée

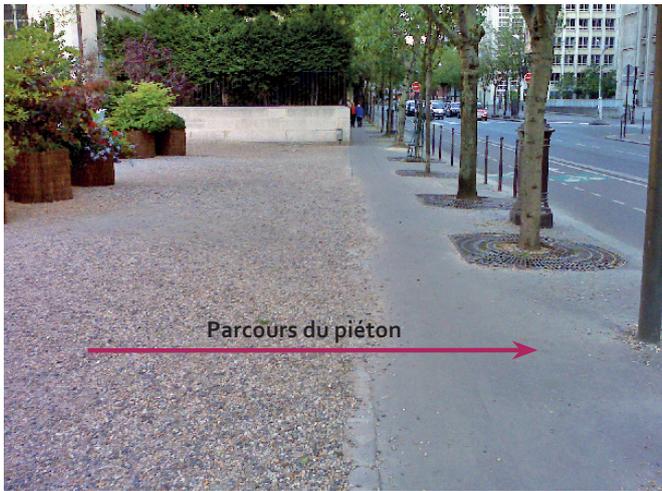
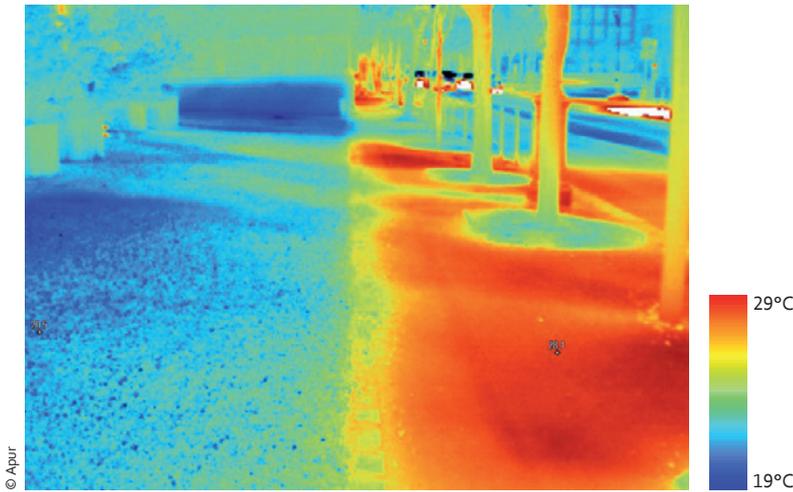


En fin de journée, les différences de confort thermique sont tributaires des masques solaires, ainsi la rue de Phalsbourg est, parmi les trois points de mesure, l'endroit le plus agréable. Lorsque le soleil se couche, la présence de végétal dans le parc permet un refroidissement rapide de cet espace. La nuit, le refroidissement des deux espaces minéralisés est plus lent que celui du parc, leur niveau de confort moindre se maintient tout au long de la nuit.

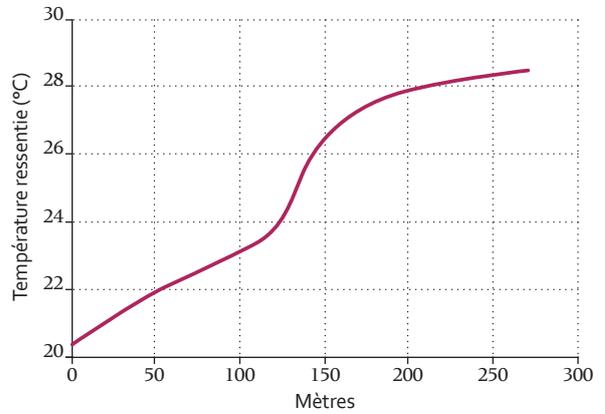
On peut schématiquement regrouper les types de sol rencontrés à Paris en trois grandes familles :

- **La famille des matériaux minéraux (granit, grès) et dérivés du pétrole (asphalte, bitume) :** ces matériaux sont sombres, ils réfléchissent donc peu l'énergie solaire. De plus ils ont de grandes capacités de stockage de l'énergie solaire, cette capacité est renforcée par la couche de béton sur laquelle ils reposent. La nuit, pendant de longues heures ils rayonneront l'énergie reçue et stockée dans la journée.
- **La famille des matériaux sablonneux ou pulvérulents (stabilisé, béton désactivé, terre battue).** Ces matériaux sont relativement clairs, ils réfléchissent en partie le rayonnement solaire en journée et stockent très peu d'énergie du fait de leur composition très « aérée ». La couche superficielle de ces matériaux, dont l'aspect est proche du sable, est très peu solidaire du support sur laquelle elle repose. La conductivité thermique entre les couches est très mauvaise, et le stockage de chaleur s'effectue très mal ce qui est atout climatique.
- Enfin, **les végétaux de surface (pelouses, friches, etc.).** Ils tendent à adopter une température proche de celle de l'air afin de ne pas dépérir face à l'intensité du rayonnement solaire. La nuit ils rafraîchissent l'air ambiant par évaporation de l'eau contenue dans le sol. Le mécanisme de régulation climatique très intéressant apporté par le végétal est très largement tributaire de la teneur en eau du sol. Si cette dernière est inférieure au besoin de la plante alors elle n'apporte aucune plus-value climatique et la plante dépérit progressivement.

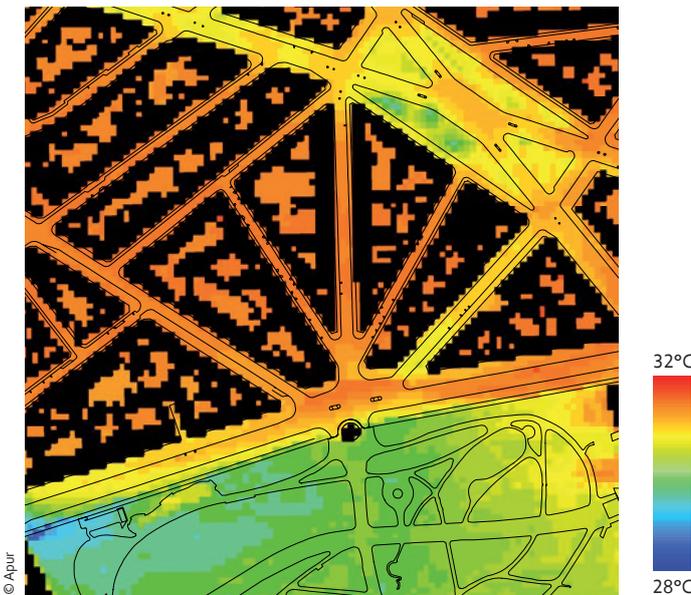
Comparaison de deux revêtements (gravier et asphalte) une heure après le coucher du soleil le 31 juillet 2011



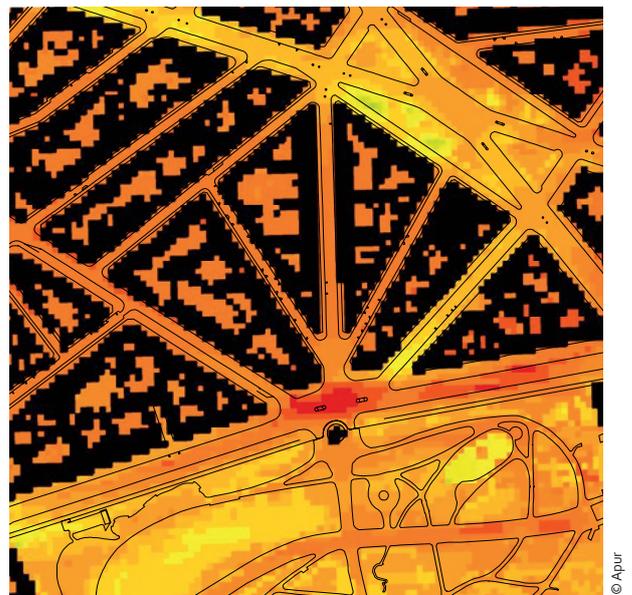
Évolution de la température du sol pour un piéton cheminant de la gauche vers la droite



Stress hydrique : le parc Monceau avec ou sans arrosage une nuit de canicule le 18 août à 23h



Parc avec arrosage nocturne : les sols perméables sont suffisamment humides pour évaporer, le rôle de régulateur climatique est assuré.



Parc sans arrosage : les sols perméables sont secs, la végétation est en stress hydrique et ne joue plus son rôle de climatiseur urbain.

Ainsi, le concepteur peut attendre, par le choix judicieux de matériaux adaptés, des gains allant jusqu'à 4 °C en température ressentie, ce qui est beaucoup. Les mesures in situ rapportent que, lorsque les écarts de températures entre Paris centre et la banlieue avoisinent les 8 °C, les parcs urbains se situent dans un entre-deux climatique n'ayant que 4 °C d'écart avec la banlieue, cet objectif est l'optimum auquel peut prétendre une mesure d'aménagement de l'espace public.

2.3.2 Les matériaux « ultra-réfléchissants »

Une solution parfois évoquée de façon alternative à l'usage de sol perméable est l'emploi de matériaux « ultra-réfléchissants ». Ces matériaux, censés réfléchir fortement l'insolation et donc débarrasser la ville de son problème de surchauffe estivale, apportent malheureusement plus de problèmes qu'ils n'en traitent en réalité, leur portée sur l'espace public parisien est faible⁽¹⁰⁾.

Le confort thermique n'est généralement pas lié à la seule température de l'air, il existe de nombreux paramètres qui interviennent dans la qualification du confort thermique, c'est pour cela que la présente étude, comme d'autres sur le même sujet, préfère retenir des indicateurs de confort thermique.

Dans le cas de ces nouveaux matériaux « ultra-réfléchissants », on observe dans le même temps une baisse de la température de l'air et une nette dégradation du confort thermique du piéton à cause des multiples réflexions solaires sur l'espace public qui non seulement éblouissent totalement le piéton mais aussi le réchauffe avec deux fois plus de radiations solaires. Cet effet est d'ailleurs bien connu des adeptes du ski qui peuvent ainsi, pendant les belles journées, pratiquer leur sport en manches courtes dans un environnement froid (moyennant crème solaire et lunettes !). Inutile de préciser que l'effet de ces matériaux s'avère désastreux en plein été. L'effet d'éblouissement est lui aussi conséquent, ce qui, dans une ville touristique comme Paris, doit être considéré comme disqualifiant. Les parcours touristiques s'effectuent même aux heures les plus ensoleillées. On estime aujourd'hui que le maximum d'éblouissement acceptable sur l'espace public parisien est atteint avec les stabilisés, aller au-delà serait imprudent. Ajoutons à ces points deux éléments supplémentaires, les matériaux réfléchissants sont totalement imperméables, ce qui ne va pas dans le sens d'une amélioration des capacités de rétention en eau du sol urbain, et enfin leur énergie grise⁽¹¹⁾ est vraisemblablement élevée car ces matériaux n'existent pas naturellement dans notre environnement, il faut donc les produire, ce qui a un coût énergétique.

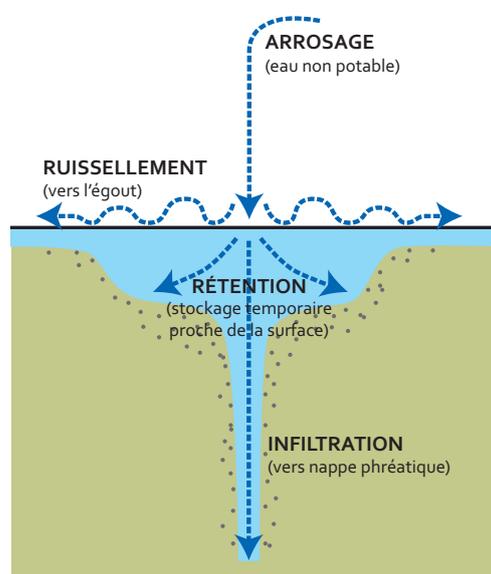
2.3.3 Usage de l'eau à des fins de rafraîchissement

Adéquation des matériaux avec l'eau

Si l'eau contenue dans les sols est employée par les végétaux à des fins d'évapotranspiration qui a pour conséquence un relatif rafraîchissement de l'air, l'idée de recréer des phénomènes d'évaporation sur sols dépourvus de végétaux peut être retenue. Comme l'espace public urbain ne peut être transformé dans son intégralité en pelouse ou en friche végétale, instrumenter l'évaporation en se passant du végétal est une formule nécessaire à l'adaptation des villes. Elle est actuellement testée à Paris et dans nombre de villes dans le monde.

L'intérêt de cette pratique est de pouvoir instrumenter l'évaporation, en particulier sa temporalité, afin de répondre aux questions de l'inconfort climatique selon les lieux et leurs usages de façon dynamique. Il n'en reste pas moins que la compatibilité des matériaux actuellement rencontrés à Paris avec les systèmes d'arrosage que l'on pourrait envisager doit être étudiée.

Ruissellement, rétention, infiltration : les trois cheminements de l'eau en contact avec le sol



RUISSELLEMENT : le ruissellement permet de refroidir la surface du sol par convection et très faiblement par évaporation.

RÉTENTION : la rétention se produit lorsque l'eau s'infiltre à proximité de la surface, alors l'eau peut être évaporée plus tard et être restituée à l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau moyennant un rafraîchissement de l'air et du sol.

INFILTRATION : si rien ne s'oppose au passage de l'eau celle-ci chemine jusqu'à la nappe phréatique.

Quel que soit le type de matériau recouvrant la voie, ces trois types de cheminements de l'eau liquide coexistent en permanence lorsque de l'eau est aspergée sur le sol. Par contre leur proportion dépend de la nature du matériau : les asphaltes induisent principalement du ruissellement, le sable induit plutôt de l'infiltration, alors que les stabilisés induisent les trois phénomènes en même temps avec prédominance de la rétention. La concurrence des trois phénomènes est aussi tributaire du type d'arrosage (lame d'eau, goutte à goutte, etc.) et des volumes engagés dans le procédé.

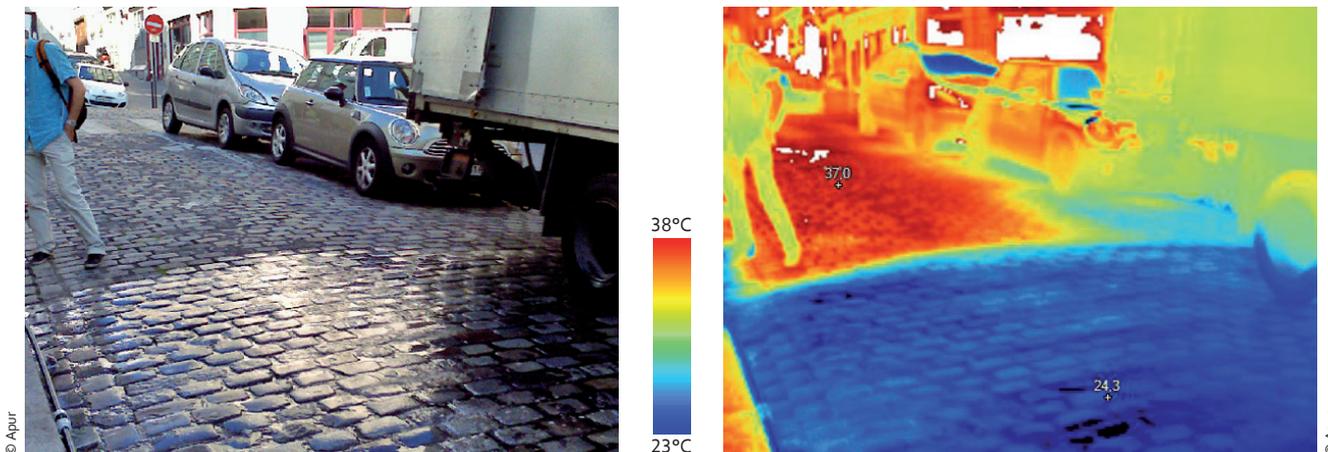
10- Ce constat est d'ailleurs partagé dans les simulations climatiques de l'étude « *Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met* » (cf. bibliographie).

11- L'énergie grise est l'énergie nécessaire à la fabrication du matériau, cette dernière devrait être plus que remboursée par les économies que le matériau génère lors de sa durée de vie.

Parmi les trois familles de revêtements de sols que nous avons répertoriées, la discussion porte sur les deux familles de matériaux exempts de toute végétation.

La première famille est celle des minéraux (granit, grès) et dérivés du pétrole (asphalte, bitume). Ces matériaux sont totalement imperméables, donc toute l'eau qui servira à leur arrosage sera pour une part rejetée à l'égout et pour une autre part évaporée. Du fait de leur caractère imperméable, ces matériaux n'ont pas de capacité de rétention d'eau et donc leur support n'est pas performant pour l'évaporation. L'arrosage crée certes un écoulement qui aura comme effet de refroidir le matériau avant évacuation de l'eau à l'égout. L'usage de l'eau n'est pas ici optimal, c'est principalement l'effet convectif (écoulement d'eau froide) qui sera la première plus-value du système d'arrosage.

Expérimentation d'arrosage menée rue Lesage (20^e arrondissement)



Expérimentation d'arrosage en journée durant l'été 2013 grâce à un branchement réalisé sur une bouche de lavage du réseau d'eau non potable. Clichés pris à 19 h.

Cet usage n'est pas pour autant à proscrire mais il est très spécifique et sera à réserver à certains cas seulement. Ici la plus-value du système est principalement diurne, car l'écoulement d'eau est un moyen très efficace de créer artificiellement des sols « froids » en pleine journée. Ainsi l'usage de lames d'eau sera à privilégier sur les lieux très dégagés, très exposés au soleil (parvis de gare, places, etc.). La lame d'eau actuellement employée place de la République rentre dans cette catégorie d'usage. Elle est alimentée à l'eau potable.

La deuxième famille de matériaux qui peut se prêter à l'arrosage concerne les matériaux sablonneux ou pulvérulents, parmi lesquels les stabilisés sont les plus intéressants. Ces matériaux ont des niveaux de stockage de l'énergie solaire extrêmement faibles, c'est leur premier avantage. Leur deuxième avantage tient en leur « relative » perméabilité. Cette relative perméabilité traduit le fait que le matériau possède des capacités de rétention de l'eau plus ou moins prononcées (cela dépend du type de stabilisé et de son entretien), mais il s'agit rarement d'une perméabilité totale, c.-à-d. permettant un lien direct avec la nappe phréatique. Dans le cas de la lutte contre les ICU, l'évacuation des eaux de surfaces en direction de la nappe phréatique n'est pas recherchée, car toute eau qui s'évacue en sous-sol n'est pas évaporée. La lutte contre les ICU s'accommodera surtout des dispositifs permettant de garder les sols humides le plus longtemps possibles afin de maximiser l'évaporation, on parlera alors de rétention d'eau.

L'arrosage des stabilisés portera surtout ses fruits la nuit, à l'inverse des asphaltes et bitumes qui gagnent avec l'eau en confort diurne. Le système d'arrosage est à lui seul un sujet, mais il devra être pensé afin de minimiser l'écoulement à l'égout. Cet arrosage peut être effectué au jet d'eau par des agents municipaux, ou par des dispositifs innovants intégrés aux espaces publics. Bien sûr l'arrosage par des engins mécaniques (« laveuses ») est à proscrire, comme nous l'avons vu précédemment les moteurs thermiques accentue l'ICU, on regarderait avec ironie une ville mettant en œuvre de telles mesures contradictoires en période de canicule.

Usage climatique de l'eau et fonctionnement du réseau d'égout.

Le réseau d'égout, de par son caractère unitaire, voit les eaux usées se mélanger aux eaux pluviales, peu ou pas polluées. Lorsque des fortes pluies surviennent, le réseau d'égout ne peut supporter les flux très importants auxquels il est soumis, le trop-plein est alors rejeté directement dans la Seine. Ainsi la rétention et l'infiltration de l'eau de pluie rejoignent l'objectif local de lutte contre les ICU et l'objectif global de l'amélioration du fonctionnement du réseau d'égout. Notons que l'infiltration et la rétention deviennent des outils incontournables dans la planification du devenir de l'espace

public parisien tant la situation actuelle est devenue critique. Le futur plan de zonage pluvial devra préparer cette évolution et proposer des solutions d'abattements pour les pluies courantes (8, 12 et 16 mm de pluie). Naturellement les logiques d'infiltration seront à moduler selon le risque posé par le sous-sol parisien, notamment lorsqu'il y a d'anciennes carrières de gypse.

Ainsi, les logiques d'infiltration et de rétention qui sont des pratiques essentielles à l'adaptation climatique des villes trouvent aussi leur justification dans l'amélioration globale de la partie urbaine du cycle de l'eau.

Valoriser la rétention d'eau en ville.

Les préoccupations récentes pour les économies d'énergies et le changement climatique font ressortir progressivement l'absurdité des pratiques urbaines mises en œuvre tout au long du XX^e siècle. Les théories hygiénistes qui considéraient l'eau et l'ombre comme vecteurs de maladies en ville ont profondément marqué toute la pensée moderne et avec elles plus d'un siècle de pratiques totalement désastreuses difficilement récupérables en peu de temps. Les urbanistes et architectes du XX^e siècle n'ont eu de cesse d'éradiquer l'eau dans la ville, cette ville que l'on considérait alors comme un endroit sale qu'il fallait assainir et assécher. La mise en œuvre de cette pensée s'est soldée par plus d'un siècle d'imperméabilisation de la ville.

Cette idéologie de la « ville sale » a la vie dure et, aujourd'hui encore, la mise à nu des sols et l'extension des lieux dédiés aux friches végétales sont encore mal vues.

Ces craintes se retrouvent aussi chez nombre de copropriétés parisiennes. Pour ces dernières les désordres liés à l'humidité sont déjà une source de problèmes permanents dans les logements, on imagine qu'elles pourraient voir d'un œil méfiant une réforme de l'espace libre (public ou privé) basée sur une « désimperméabilisation » des sols.

En effet, tout comme sur l'espace public, l'eau liquide et l'humidité sont vécues aujourd'hui comme le mal absolu dans les logements. On constate là le résultat des politiques de réhabilitation du bâti ancien menées depuis les années 1950. L'application de mesures inappropriées (application de peintures étanches sur les façades parisiennes, ravalement au ciment, généralisation du double vitrage sans traitement de la ventilation, isolation thermique intérieure étanche, etc.). Ces pratiques sont d'ailleurs à l'origine de l'état d'insalubrité de nombreux bâtiments en pans de bois à Paris, véritable menace pour les ouvrages et leurs occupants, puisque la stabilité même des édifices est engagée à terme. L'imperméabilisation des sols est d'ailleurs une pratique concomitante de celles qui sévissent dans les logements. Rappelons que la plupart des bâtiments parisiens ont été édifiés sur des sols perméables ou faiblement imperméables et qui le sont restés assez tard au XX^e siècle⁽¹²⁾.

Dans le cas de bâtiments anciens, les transferts d'eau liquide et de vapeur d'eau dans les ouvrages ne sont pas problématiques en soi. C'est l'empêchement de ces flux qui pose problème.

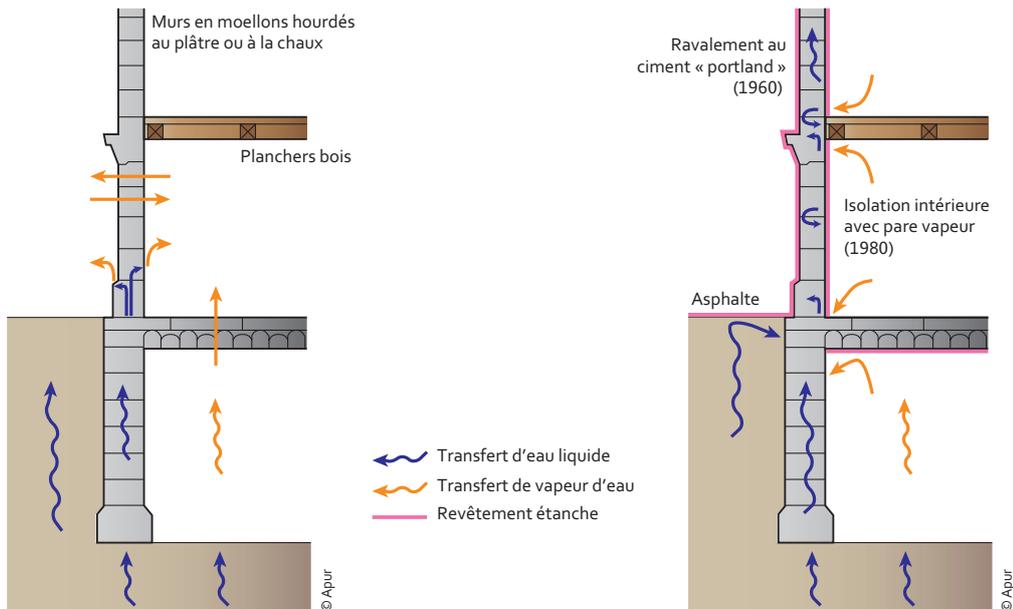
Ainsi nombre de problèmes de remontées capillaires dans les murs périphériques sont liés à deux choses : l'imperméabilisation totale du sol qui empêche l'évaporation de l'eau remontant par capillarité et l'usage de matériaux étanches appliqués sur les façades et dans les logements qui dégradent les ouvrages. Plus les bâtiments sont imperméabilisés et plus l'eau cherche à s'échapper en hauteur, dégradant de ce fait la structure. Rappelons que les bâtiments anciens ont été conçus pour cohabiter avec des sols potentiellement chargés en humidité : ainsi, aucun pan de bois parisien n'est édifié à même le sol, et les sous-sols et caves ne contiennent pas de plâtre.



Bâtiment en moellons et pans de bois.
Dégradation du mur périphérique par remontées capillaires (19^e arrondissement).

12- En 1949, 35 % des trottoirs parisiens sont encore perméables

Hygrométrie d'un mur parisien en moellons du XIX^e avant et après rénovation au XX^e siècle



Fonctionnement traditionnel : le mur est le siège d'échanges hydriques continus.

Fonctionnement perturbé par l'étanchéification des ouvrages : le ravalement des façades au ciment, l'isolation intérieure des logements et les revêtements étanches des voies parisiennes mettent en péril les murs maçonnés à terme, les flux d'eau ne transitent plus correctement.

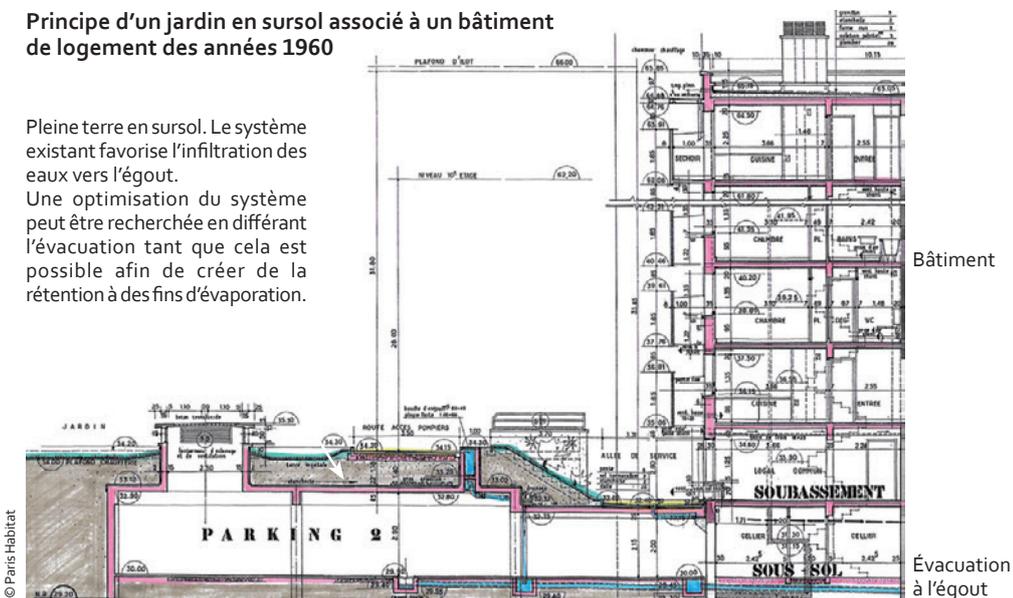
Les logiques d'isolation intérieure et d'imperméabilisation des sols contribuent à altérer le fonctionnement hygrothermique normal des murs anciens.

Valoriser les sursols des années 1960

Beaucoup d'espaces libres bordant les emprises bâties de barres et de tours édifiées dans les années 60 ont été aménagés en sursol au-dessus de vastes parkings. Ces sursols, moyennant quelques améliorations peuvent être valorisés à des fins de rétention d'eaux pluviales. Ils sont composés comme d'immenses bacs étanches en béton armé dans lesquels reposent d'importants volumes de terre. Actuellement l'eau pluviale qui irrigue les sursols est canalisée pour être évacuée au plus vite dans le réseau d'égout. Un dispositif serait à imaginer pour « bypasser » l'actuel dispositif et permettre à l'eau de saturer la pleine terre et à ne s'écouler qu'en cas de trop-plein. L'idée du dispositif serait de retarder au maximum le départ de l'eau de pluie dans le réseau d'égout. Certaines précautions doivent être mentionnées car si ces dispositifs de sursols en béton armé étaient plébiscités dans les années 60, beaucoup ont été mal réalisés et fuient. Le dispositif de rétention envisagé ici ne peut être mis en œuvre que si l'ouvrage est suffisamment étanche. Une expertise préalable sera toujours nécessaire mais des expérimentations de ce type devraient voir le jour.

Principe d'un jardin en sursol associé à un bâtiment de logement des années 1960

Pleine terre en sursol. Le système existant favorise l'infiltration des eaux vers l'égout. Une optimisation du système peut être recherchée en différant l'évacuation tant que cela est possible afin de créer de la rétention à des fins d'évaporation.



Coupe d'un sursol des années 1960, principe d'évacuation des eaux usées

Conclusion :

- La végétation de surface (pelouse, friches végétales, etc.) est le type de surface le plus efficient pour la régulation climatique d'une ville à condition qu'elle soit arrosée convenablement. Par contre, le stress hydrique des végétaux annule totalement leur plus-value climatique.
- Les stabilisés et autres matériaux pulvérulents sont eux aussi très intéressants du point de vue climatique, ils doivent être entretenus suffisamment (ratissage) afin de conserver des capacités de rétention d'eau. Leur arrosage peut être envisagé la nuit pour optimiser leur performance climatique. L'arrosage devrait être pensé avec des systèmes intégrés aux revêtements et/ou grâce aux agents municipaux à l'aide des bouches de lavage du réseau d'eau non potable. L'arrosage par camions et autres bennes doit être proscrit (pollution, dégagement de chaleur, etc.). La couleur des stabilisés doit faire l'objet aussi d'un choix de la part des concepteurs, si les stabilisés clairs sont climatiquement intéressants, ils sont souvent perçus comme trop réfléchissants. Un compromis entre confort visuel et agrément climatique devra être étudié par l'aménageur en fonction du type d'espace urbain concerné.
- Les nouveaux matériaux « ultra-réfléchissants » sont à proscrire. Ils créent plus de problèmes qu'ils n'en traitent. Ils dégradent notamment le confort thermique en journée des piétons, et leur niveau de réflexion solaire outrepassent largement le seuil d'éblouissement admissible en ville (le seuil à ne pas dépasser est celui des stabilisés).
- Les logiques de ruissellement, de rétention et d'infiltration, si elles sont des éléments incontournables de la lutte contre les ICU, se révèlent aussi nécessaires à l'amélioration globale du système d'assainissement et l'atteinte des objectifs qui seront définis dans le futur zonage pluvial.
- Les sursols et jardins sur dalle devraient faire l'objet d'expérimentations afin de valoriser les capacités de rétention d'eau de ces espaces, aujourd'hui la logique du « tout à l'égout » est appliquée alors qu'il est possible de différer et d'amoindrir les flux d'eaux pluviales.

Cet exposé sur les matériaux donne au lecteur quelques éléments généraux d'appréciation. Un travail de recherche en laboratoire mené par l'université Paris Diderot et la Ville de Paris est actuellement mené afin d'améliorer la connaissance de la question des revêtements de sol à Paris. Ces travaux feront l'objet du cahier#3 (à paraître).

2.4 Les usages de l'espace public

Les solutions de rafraîchissement doivent être mises en œuvre préférentiellement dans les zones où les usagers de l'espace public sont les plus exposés à l'îlot de chaleur urbain. Les simulations climatiques exposées dans la première partie de l'étude ont montré que l'îlot de chaleur est extrêmement variable dans l'espace et dans le temps. Pour l'aménageur, la difficulté est double puisqu'il lui faut proposer des solutions d'adaptation climatique qui seront mises en œuvre aux bons endroits et aux bons moments.

Prenons l'exemple de l'avenue de l'Opéra. Dans ce quartier il n'y a pas de vie résidentielle, l'avenue est fréquentée majoritairement par les touristes et les employés de bureau. La temporalité des usages sur cet espace public est exclusivement diurne : les employés de bureau fréquentent l'avenue de façon ponctuelle (embauche, pause déjeuner, débauche) et les touristes de façon constante. Ces deux types de population ne sont pas exposés au risque caniculaire tel qu'on l'entend au sens sanitaire⁽¹³⁾ car : les touristes évoluent dans des lieux essentiellement climatisés (musées, cars, hôtels, avions, aéroports, etc.), de plus ces populations de passages ne sont pas exposées aux vagues de chaleur sur le long terme (le parcours touristique parisien type est de quelques jours) ; les cadres et employés de bureau sont quant à eux protégés climatiquement toute la journée, les bureaux du quartier de l'Opéra (« triangle d'or ») sont aujourd'hui très équipés en climatiseurs⁽¹⁴⁾.

Les mesures d'adaptation climatique à mettre en œuvre dans ce type de quartier n'ont donc pas d'impact dans le cadre d'une lutte contre la surmortalité en période estivale, par contre certaines d'entre elles peuvent servir à l'amélioration globale du confort des usagers. Le ruissellement sur l'espace public le jour peut être envisagé car la sollicitation diurne est forte. La modification des matériaux au profit de matériaux plus clairs est évidemment proscrite, c'est bien sur ces espaces,

13- la définition que donne l'INSERM du risque caniculaire est : « L'exposition d'une personne à une température extérieure élevée, pendant une période prolongée, sans période de fraîcheur suffisante pour permettre à l'organisme de récupérer, est susceptible d'entraîner de graves complications ».

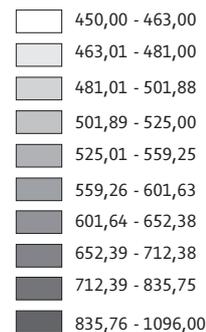
14- Un retour en arrière semble aujourd'hui peu probable car les bâtiments qui abritent des bureaux ont été terriblement transformés afin de s'adapter aux besoins du tertiaire moderne, dans nombre de cas le façadisme a été pratiqué, supprimant de facto les très bonnes qualités thermiques intrinsèques de ces édifices en été. Ce type de pratique de réhabilitation, bien qu'invisible depuis la rue, a profondément dégradé la performance thermique estivale de ces quartiers. Laisser carte blanche aux opérations de requalification des bâtiments tant que ça ne se voit pas depuis la rue relève d'une perception de la valeur patrimoniale des édifices particulièrement insuffisante.

parmi les plus photographiés de la capitale, qu'on se gardera de créer des situations d'éblouissement et d'inconfort visuel. Dans une logique d'appréciation coût/bénéfice dans laquelle on apprécierait la pertinence d'une mesure en rapportant le coût de la mesure d'adaptation à la réduction de la surmortalité, on se situerait ici dans une mesure d'adaptation relevant essentiellement de l'agrément.

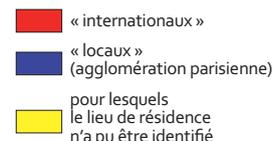
Inversement les quartiers à forte vocation résidentielle appelleront des solutions d'un type différent. Les solutions d'adaptation diurnes et nocturnes y auront une plus valeur différente. La spécificité de Paris est que l'habitat y est encore peu climatisé. L'intervention à des fins d'adaptation climatique de l'espace public peut avoir deux types d'impact : éviter la prolifération de climatiseurs, et éviter la surmortalité des populations les plus exposées aux vagues de chaleur. Dans les quartiers à vocation résidentielle, l'espace public et plus généralement les espaces libres (dont les cœurs d'îlots des ensembles des années 1960) peuvent devenir des lieux que l'on occupe en début de soirée car souvent plus frais que les appartements à ce moment-là. Ainsi les espaces libres en cœur d'îlots ou les pieds d'immeubles peuvent devenir des endroits où les techniques de rafraîchissement nocturne trouveront leur sens, ce qui incitera les habitants à se les approprier naturellement.

La période de canicule a ceci de spécifique qu'elle redéfinit le partage entre le temps passé entre les univers clos (logements) et les espaces extérieurs, ces derniers étant à certains moments beaucoup plus agréables. Bien sûr une analyse fine des modes d'habitat et de la vocation de l'espace public qui lui est associé sera à la base de l'analyse du concepteur.

Densités de population à l'hectare pour les secteurs les plus densément peuplés :

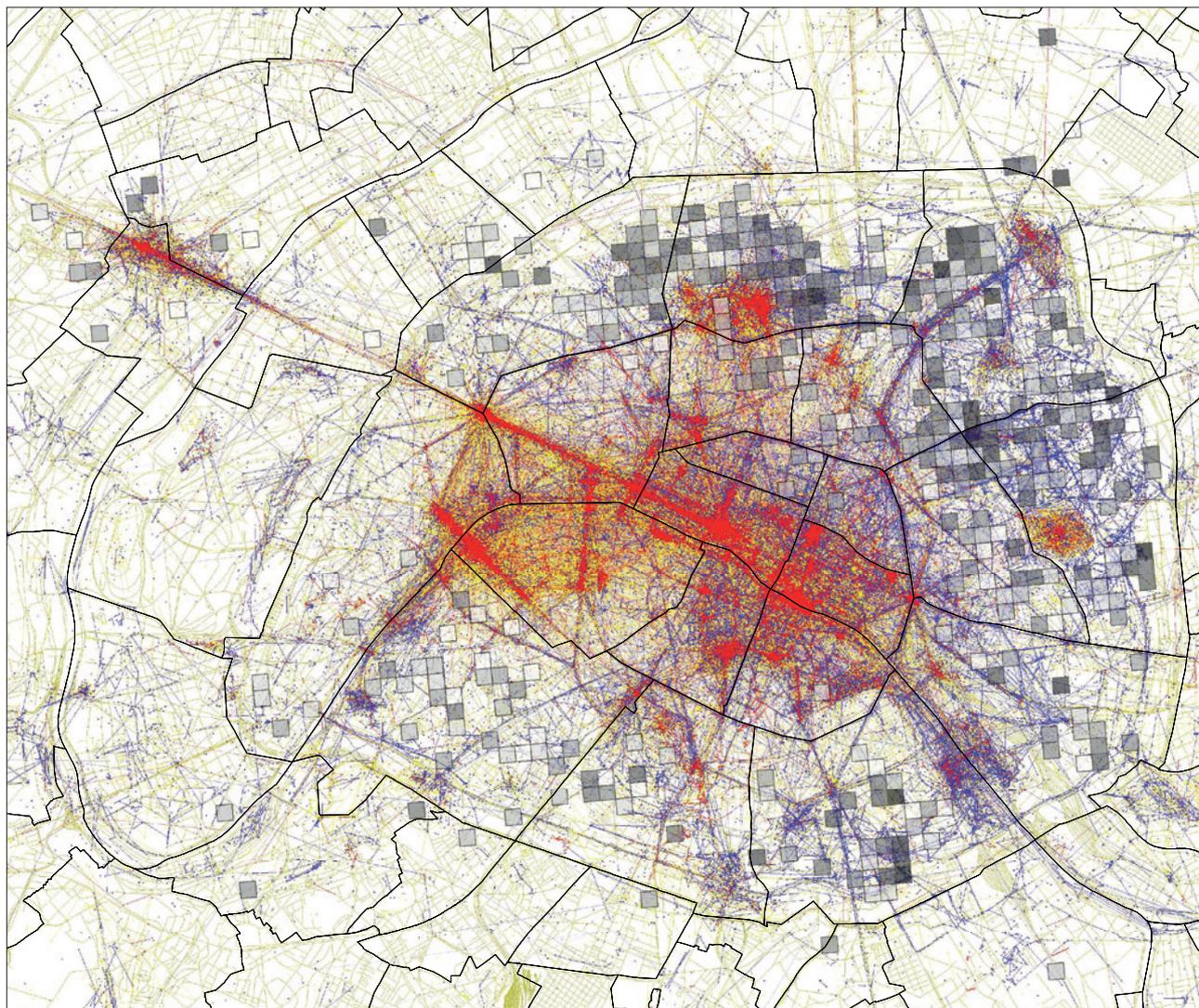


Clichés mis en ligne sur un compte Flickr par des touristes :



Source : Insee 2010.
CC by : Eric Fischer - SA.

Parcours touristiques et densité résidentielle



La relative spécialisation de l'espace public parisien peut être mise en évidence par la superposition de la densité résidentielle et du géo-référencement des clichés mis en ligne sur le site Flickr par les touristes selon leur provenance géographique. Une certaine division du territoire ressorts ici, avec : d'un côté les quartiers à fortes densités résidentielles et de l'autre les quartiers les plus touristiques. Ces derniers sont aussi les plus prisés de la capitale et ont été progressivement transformés au XX^e siècle en tissus à forte dominante tertiaire. L'analyse de la temporalité des sollicitations de l'espace public conduira les architectes-urbanistes à proposer des solutions d'adaptation microclimatiques différentes selon les quartiers.

Conclusion

À travers les quelques exemples que nous avons abordés, nous avons vu que les techniques d'adaptation climatique de la ville ne s'énoncent pas comme des dogmes ou des doctrines qui s'appliqueraient de façon mécanique selon les espaces urbains. Il s'agit au contraire d'une série d'outils, qui, lorsqu'ils sont confrontés à une analyse des sollicitations de l'espace public et à une analyse de la destination des bâtiments et de leurs qualités thermiques estivales, permettront aux architectes et urbanistes de définir de nouveaux espaces climatiquement confortables.

Une grande partie de la pensée hygiéniste a façonné la ville du XX^e siècle, ville dont nous héritons aujourd'hui. Le XX^e siècle a voulu assainir la ville. En imperméabilisant l'espace public urbain et en éradiquant toute place de l'eau dans la ville (disparition des flaques, de la boue), on a tenté d'aseptiser et de stériliser l'espace. Cette pensée relève d'une vision fonctionnaliste, celle d'un espace public qui n'a de cesse d'optimiser les flux, en particulier automobiles, en généralisant l'usage de l'asphalte et du bitume.

Cette vision de la ville dont nous héritons aujourd'hui a conduit à fabriquer une ville qui se comporte comme un immense radiateur la nuit en été.

L'ICU peut donc être défini comme un « problème de refroidissement nocturne » : la ville n'arrive pas à se refroidir la nuit contrairement aux zones périphériques.

Il s'agit alors de travailler avec deux stratégies : les stratégies diurnes et les stratégies nocturnes.

Les stratégies diurnes traitent le problème évoqué ci-dessus de façon préventive en empêchant la ville de s'échauffer : multiplication des ombres portées par les canopées urbaines, ruissellement d'eau non potable sur les revêtements de sols très exposés.

Les stratégies nocturnes consistent à accélérer le refroidissement nocturne de la ville en multipliant les sols perméables suffisamment imbibés d'eau à des fins d'évaporation.

Comme toutes ces solutions ne peuvent être appliquées partout, et tout le temps, il faudra faire des choix. En fonction des solutions choisies, les espaces urbains gagneront en confort thermique à certaines heures mais pas à d'autres. Alors comment effectuer ces choix ? Les espaces publics parisiens ayant leurs spécificités, la stratégie consistera à faire coïncider les stratégies d'adaptations avec les usages et leurs temporalités.

À la suite de ce travail, le cahier#3 fera le point sur les qualités thermiques des revêtements de sol à Paris et le cahier#4 traitera de la question des brises thermiques nocturnes.

Bibliographie

Apur, *Les îlots de chaleur urbains à Paris*, cahier#1 (2012).

Apur, *Essai de bilan sur le développement des arbres d'alignement dans Paris* (2010).

Apur, *Principes de composition de la rue, guide l'espace public*, Ville de Paris (1994).

Apur, *Étude sur le devenir du réseau d'eau non potable* (2011).

Apur, *Du réseau d'eau non potable à l'optimisation de la ressource en eau* (2013).

Apur, *Nouvelles approches de l'espace public parisien* (2014).

Comité Scientifique et Technique de la Ville de Paris, *L'histoire de la rue, journée organisée par la direction de la voirie le vendredi 24 mars 1995*. DAU, APUR, DPJEV, Archives de Paris (1995).

Fredet J., Laurent J.-C., *Guide du diagnostic des structures dans les bâtiments d'habitation anciens Ouvrages types – Capacité structurale – Pathologies*, Editions du Moniteur (2013).

Huttner S., *Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met*, Mainz University (2012).

ISO Standard 7730: *Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD Indices and specification of the Conditions for thermal comfort*, International Organization for Standardization, Geneva (1994).

Sites internet :

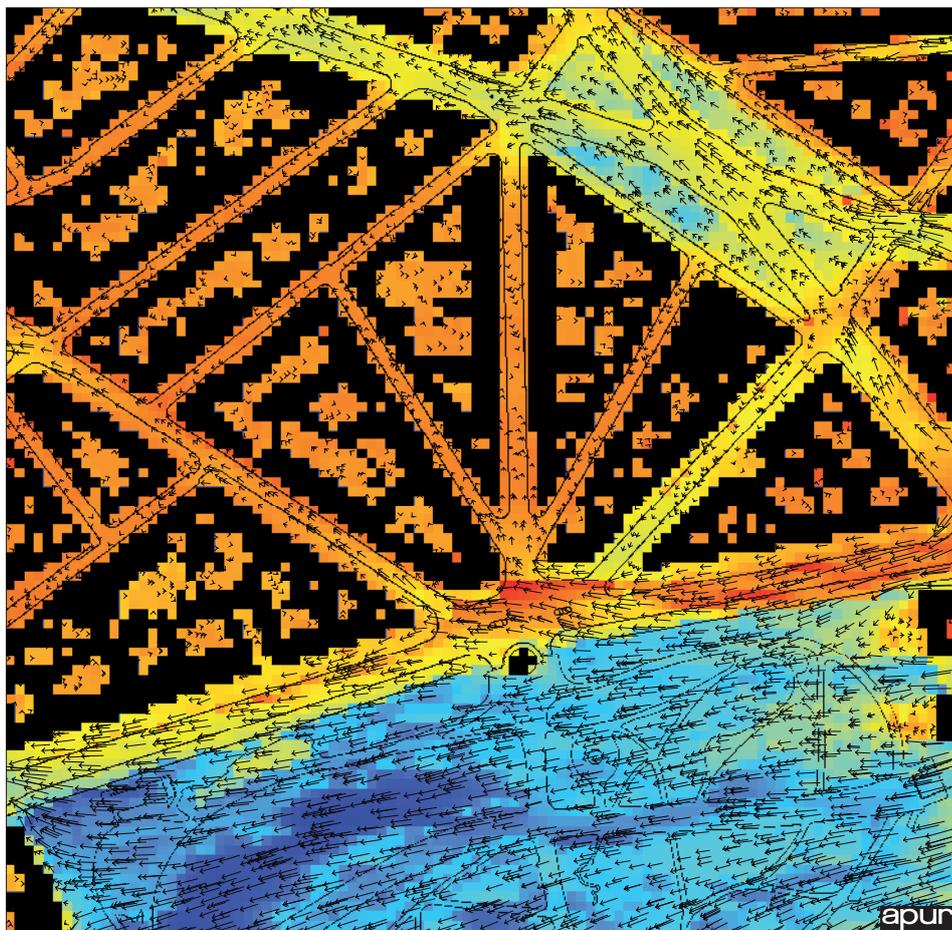
UTCI (Universal Thermal Climate Index) : <http://www.utci.org/>

ENVI-met model : <http://www.Envi-met.com>

Solweig model : <http://www.gvc.gu.se/english/staff/staff/thorsson-sofia/current-projects/the-solweig-model/>

Annexe

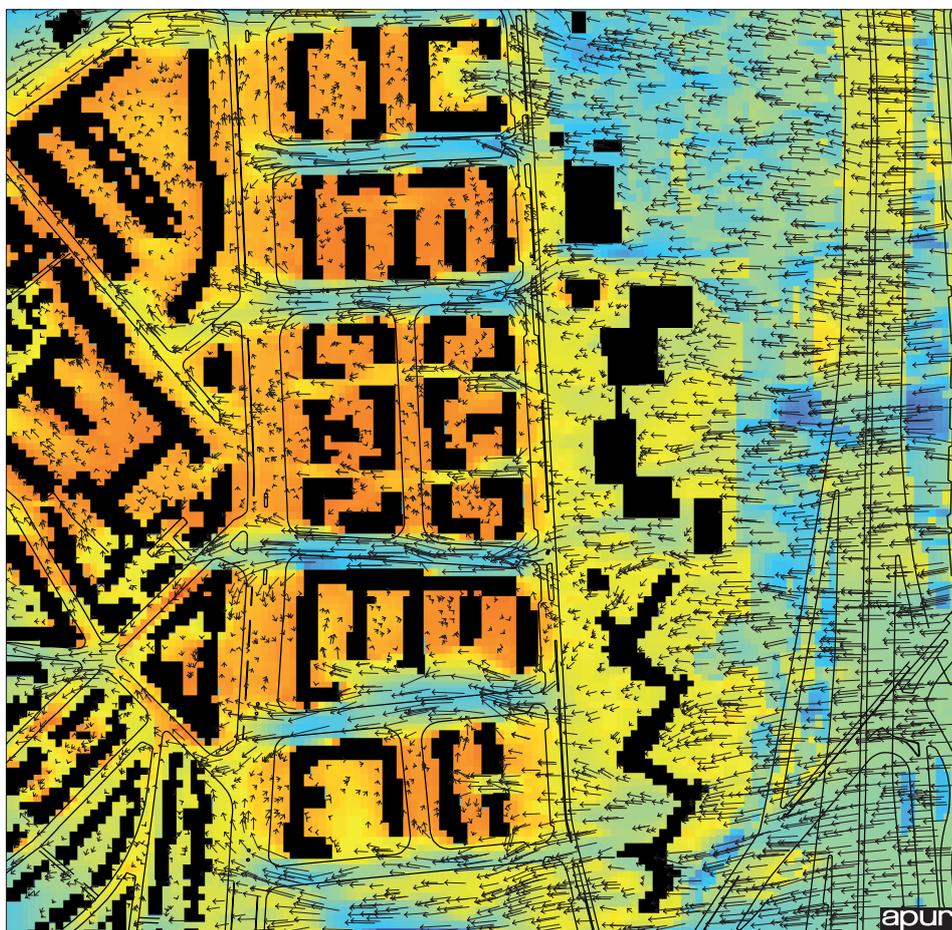
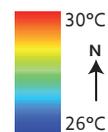
Brises thermiques et confort climatique



Brises thermiques

- ← 0,30 m/s
- ← 0,60 m/s
- ← 0,90 m/s
- ← 1,20 m/s
- ← 1,50 m/s

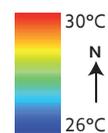
Températures ressenties à
02 heures du matin un 18 août
au parc Monceau

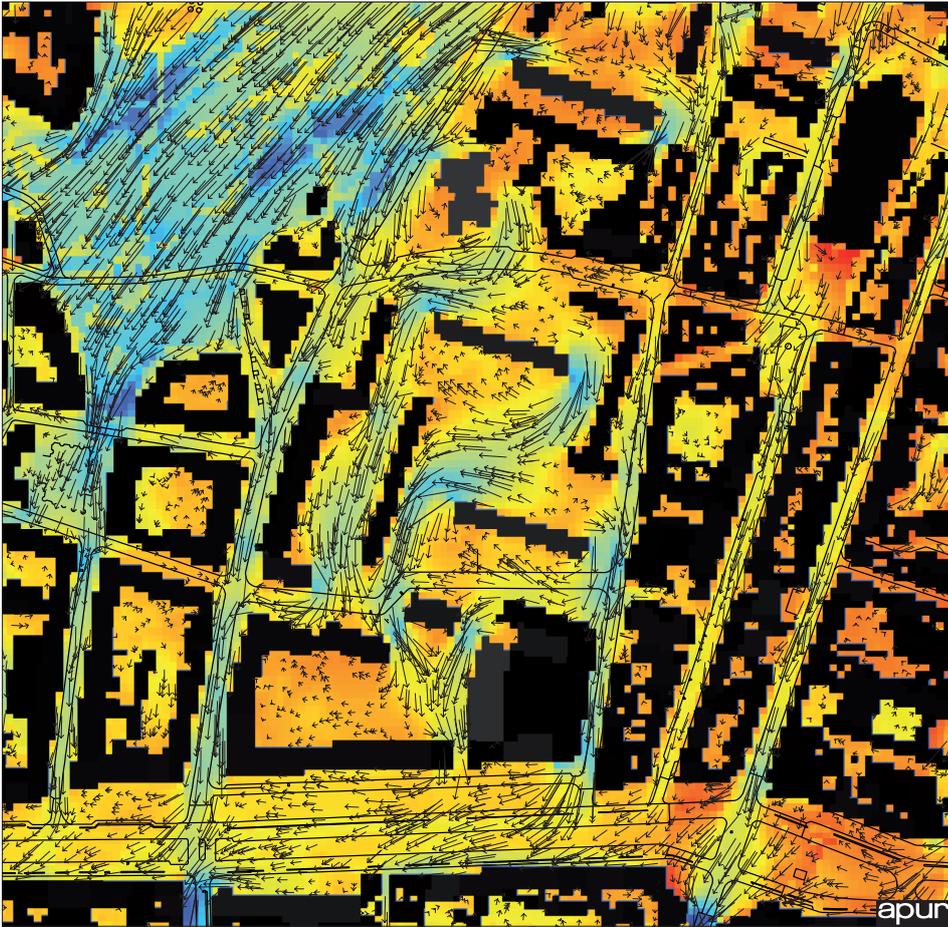


Brises thermiques

- ← 0,30 m/s
- ← 0,60 m/s
- ← 0,90 m/s
- ← 1,20 m/s
- ← 1,50 m/s

Températures ressenties
à 02 heures du matin un
18 août au Nord de la porte
de Bagnolet

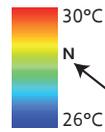




**Brises
thermiques**

- ← 0,30 m/s
- ← 0,60 m/s
- ← 0,90 m/s
- ← 1,20 m/s
- ← 1,50 m/s

Températures ressenties à
02 heures du matin un 18 août
au Sud du parc de Belleville



Les îlots de chaleur urbains à Paris

Cahier#2 : simulations climatiques de trois formes urbaines parisiennes et enseignements

Réalisé en lien avec la Direction de l'Urbanisme de la Ville de Paris, ce cahier#2 de l'Apur sur les îlots de chaleur urbains propose une lecture critique des modèles numériques climatiques. Elle tente de capitaliser les enseignements qui peuvent être tirés sur ces outils sur trois exemples de tissus parisiens et une série de voies. La pertinence des mesures d'adaptation, comme l'usage de l'eau ou de la végétation, est discutée selon les spécificités des espaces urbains, leurs temporalités, leurs usages.

L'Apur, l'Atelier parisien d'urbanisme, est une association 1901 qui réunit la Ville de Paris, le Département de Paris, l'État, la Région Ile-de-France, la Chambre de Commerce et d'Industrie de Paris, la Caisse d'Allocations Familiales de Paris, la Régie Autonome des Transports Parisiens, l'Établissement public d'aménagement Orly-Rungis-Seine-Amont et Paris Métropole.