

Les îlots de chaleur urbains à Paris

Cahier#4 : influence climatique des revêtements de sol à Paris



Préambule

Le Plan Climat de la Ville de Paris a été adopté en 2007 et révisé en 2012. Ce texte décrit les divers dispositifs permettant de mettre en œuvre une réduction de 75 % des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050. Ce Plan relève de stratégies dites d' « atténuation ». Il pose la question de la responsabilité du territoire parisien en termes de contribution au changement climatique global et propose la décroissance à long terme de cette contribution. Comme il existe un important décalage temporel entre les mesures prises et leurs effets escomptés en matière de dérèglement climatique, des plans décrivant des mesures immédiates d' « adaptation » sont adoptées par nombre de territoires. C'est le cas pour Paris qui adopte en 2015 un « Carnet Adaptation » décrivant les mesures à prendre sur le territoire afin de prendre en compte le changement climatique, tout du moins sa part acquise et inéluctable dans l'aménagement et l'organisation du territoire.

Cette quatrième étude de l'Apur portant sur les îlots de chaleur urbains consacrée aux revêtements de sol parisiens apporte des éléments de compréhension de l'influence du choix des revêtements de sol dans le cadre de l'adaptation au changement de Paris. Afin de mieux comprendre le rôle des matériaux de sol, l'Apur a commandé au Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain (LIED) de l'université Paris-Diderot une étude portant sur la mesure des propriétés thermiques de 5 matériaux d'emploi courant à Paris. Cette expérimentation a été menée en partenariat avec le Laboratoire d'Essai des Matériaux de la Direction de la Voirie et des Déplacements de la Ville de Paris.

L'étude se compose de 5 grandes parties :

- 1/ Tout d'abord une explication de la nomenclature des revêtements de sols employés couramment à Paris qui détaille quelques-unes de leurs spécifications techniques.**
- 2/ Une présentation d'une expérimentation réalisée en laboratoire par l'université Paris Diderot sur 5 échantillons de matériaux de revêtements de sols parisiens. Cette étude permet d'exposer les caractéristiques intrinsèques des grands types de matériaux rencontrés à Paris.**
- 3/ Une analyse de ces résultats et de leurs implications pour Paris.**
- 4/ Une mise en perspective et une illustration du comportement de ces matériaux sur la base de clichés de thermographie aérienne réalisés en 2015. Il s'agit ici d'exposer comment les matériaux se comportent in-situ, c'est-à-dire comment la forme urbaine arbitre la pertinence dans le choix de matériaux au regard de leurs caractéristiques climatiques propres.**
- 5/ Une synthèse sous forme de tableau propose une évaluation climatique des propriétés de chaque matériau.**

Directrice de la publication : Dominique Alba

Étude réalisée par : Julien Bigorgne, Martin Hendel (LIED - Paris Diderot)

Sous la direction de : Christiane Blancot

Cartographie : Marie-Thérèse Besse

Maquette : Apur

Infographies : © Apur, sauf mention contraire

www.apur.org

Sommaire

Préambule	2
Introduction	4
1/ Typologie des revêtements de sols parisiens usuels	5
2/ Expérimentation et mesures	9
3/ Interprétations, perspectives	12
3.1 Interprétations	12
3.2 Perspectives	15
4/ Illustration de quelques espaces publics parisiens	18
4.1 Avenues et rues larges orientées est/ouest.....	18
4.2 Places	23
4.3 Rues étroites, impasses	28
Synthèse	31
Conclusion	33
Bibliographie	34

Introduction

L'îlot de chaleur urbain est un phénomène inhérent à toute forme d'urbanisation. Créer des voies de circulation bordées de bâtiments, remplacer la pleine terre de ces voies par des matériaux minéraux afin de faciliter les déplacements, tous ces actes participent à la création de l'îlot de chaleur urbain. Ainsi l'îlot de chaleur existe que dès l'urbanisation d'un territoire est engagée, et ce, indépendamment de toute considération relative au changement climatique. Cet îlot de chaleur urbain existe à Paris tout au long de l'année, il est vécu de façon bénéfique en hiver puisqu'il rend la ville moins froide que sa périphérie, ce qui se traduit de manière directe par des consommations d'énergie pour le chauffage des bâtiments plus modérées. En revanche, pendant les épisodes caniculaires estivaux, la surchauffe urbaine de l'îlot de chaleur se fait sentir et des écarts de température parfois importants se mesurent entre la ville et sa périphérie, essentiellement la nuit.

Dans cette optique, le changement climatique et ses occurrences climatiques extrêmes ont tendance à multiplier les épisodes durant lesquels l'îlot de chaleur urbain se révèle un problème climatique typiquement urbain. L'adaptation au changement climatique est une pratique neuve et expérimentale, elle est souvent considérée dans les aménagements urbains comme une contrainte venant se greffer dans les projets, mais elle est rarement intégrée en amont de la conception. De façon caricaturale, on peut dire que les efforts pour la prise en compte de l'adaptation au changement climatique dans les projets d'aménagements se traduisent souvent par un « verdissement » plus ou moins prononcé des projets. La critique qui peut être faite à l'égard de ce raisonnement est son caractère binaire, voire moral, qui associe le végétal à une pratique urbaine vertueuse et l'absence de végétal à son contraire. Si la plus-value du végétal en terme climatique est réelle, la question posée par l'adaptation climatique est plus globale et réinterroge la façon de produire la ville et ses espaces fonctionnels. La difficulté posée est celle de l'articulation entre des usages urbains et la recherche d'une qualité climatique. À cet égard une perception quantitative des effets climatiques des matériaux de voirie selon les types d'espaces est nécessaire. Dans certains espaces le choix porté sur l'un ou l'autre des matériaux sera décisif dans d'autres il sera mineur. Toute la subtilité de l'aménagement est de comprendre, pour chaque espace, ses caractéristiques microclimatiques et d'en proposer l'évolution en même temps que se pose la question de l'évolution des usages qui lui sont dévolus.

Dans ce contexte, l'espace urbain possède des qualités fonctionnelles, et c'est bien pour ça qu'une grande partie du territoire parisien est revêtue de matériaux minéraux aptes à répondre aux sollicitations actuelles. Des matériaux comme le bitume ou l'asphalte sont traditionnellement adoptés depuis plus d'un siècle pour leurs qualités mécaniques : résistance aux contraintes de la circulation automobile, facilité de mise en œuvre, etc. Les matériaux sont aussi choisis pour leurs qualités esthétiques, sensées se fondre dans le décor parisien. Il est intéressant de s'interroger sur la pertinence du choix de ces matériaux voire, de la remettre en question au regard des impératifs climatiques actuels et de l'ambition d'adaptation de la ville au changement climatique.

1/ Typologie des revêtements de sols parisiens usuels

L'usage généralisé de revêtements de sols pour les espaces publics parisiens remonte à la deuxième moitié du XIX^e siècle. Il coïncide avec les grands travaux de modernisation de la ville et l'arrivée des grands réseaux. Le « tout à l'égout » entraîne l'apparition de la chaussée bombée pavée. Le pavage s'inscrit dans une logique fonctionnaliste qui permet de gérer le ruissellement des eaux vers les égouts, on évite ainsi les flaques, on imperméabilise la ville, on facilite les transports.

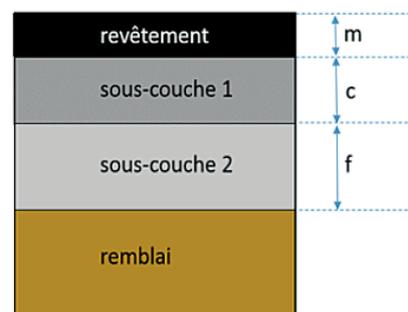
Les produits dérivés du pétrole comme le bitume s'imposent par la suite. Leur grande résistance mécanique et leur facilité de mise en œuvre en feront des matériaux privilégiés après la seconde guerre mondiale. Les trottoirs qui avaient jusqu'alors relativement échappé aux logiques d'imperméabilisation seront peu à peu asphaltés. Cette logique est aussi concomitante du développement généralisé des réseaux électriques, gaz, télécom qui sont accueillis très souvent sous les trottoirs. Le trottoir asphalté forme une protection mécanique des réseaux et une protection contre les infiltrations d'eau. Les événements de mai 1968 permettent de mesurer à quel point les pavés peuvent être utilisés très simplement comme projectiles. C'est ainsi que nombre de voiries encore pavées seront recouvertes d'asphalte.

Aujourd'hui les matériaux de sol couvrant l'espace public obéissent à une nomenclature. Chaque matériau est employé pour répondre à des sollicitations bien spécifiques. Ce sont les « usages » de l'espace public qui déterminent non seulement la nature des matériaux de surfaces mais aussi la nature et le dimensionnement des différentes sous-couches.

	trottoir		mixte	chaussée			m	c	f
asphalte noir (trottoir)	P	P+	M				2cm		10 à 15cm
béton bitumineux				t	T	T+	4cm	10 à 12cm	25 à 30cm
pavés granit "à l'ancienne"				t	T	T+	10 à 14cm	4 à 10cm	15 à 20cm
pavés granit sciés	P	P+	M				7cm	4cm	10 à 20cm
dalles de granit	P	P+	M				8 à 12cm	4cm	10 à 20cm
stabilisé		P+						10cm	
gazon									

Légende :

P	circulation piétonne exclusivement
P+	circulation piétonne et occasionnellement véhicule
M	circulation piétonne et véhicules, voie mixte
t	circulation véhicules, faible trafic
T	circulation véhicules; fort trafic
T+	circulation véhicules, trafic poids lourds très dense



Quelques matériaux récurrents de l'espace public parisien

► Asphalte noir (trottoir)

L'asphalte noir est employé couramment à Paris. Il est utilisé à la fois pour les chaussées et les trottoirs. Nous avons choisi de l'étudier en laboratoire uniquement pour les trottoirs. Dans cette configuration une couche d'asphalte de 2 cm repose sur une dalle de béton d'environ 10 cm.

Le trottoir asphalte est un matériau étanche, facile à poser et facile à démonter. La présence de nombreux réseaux sous les trottoirs parisiens fait de cette dernière exigence un impératif.

► Béton bitumineux

Employé exclusivement pour les chaussées. Le béton bitumineux (4 cm) repose sur deux sous-couches: un enrobé à module élevé (10 à 12 cm) puis des matériaux à base de liants hydrauliques (25 à 30 cm). La taille des sous-couches est dimensionnée selon le niveau de sollicitations mécaniques, en particulier dues aux poids lourds. Ce matériau a été retenu pour les analyses en laboratoire.



© Apur

Trottoir asphalte



© Apur



© Apur - David Boureau

Chaussée en béton bitumineux



© Apur

► Pavé de granit « à l'ancienne »

Le pavé de granit est le matériau « historique » des chaussées parisiennes. Il n'est plus posé à Paris aujourd'hui que dans des lieux très spécifiques, dans beaucoup d'endroits ce matériau ancien a été recouvert d'asphalte. Traditionnellement ce pavé de 10 à 14 cm de hauteur repose sur un lit de sable (4 à 10 cm), lui-même sur une couche de béton (15 à 20 cm). Ce qui est intéressant avec ce matériau c'est sa durabilité, il résiste durablement à l'usure, beaucoup plus que les enrobés, quels qu'ils soient. Son autre caractéristique est liée à sa technique de pose, dite en « queue d'aronde » qui garantit sa grande résistance aux efforts causés par les véhicules. Le pavé n'a pas été étudié dans le protocole expérimental que nous avons mis en place*.

► Pavé de granit scié

Ce pavé est employé sur les trottoirs ou les voies peu circulées. Il correspond à une relecture moderne de l'esthétique du pavé parisien. Néanmoins la principale différence avec le pavé « à l'ancienne » est la technique de pose. Le pavé de granit scié est posé en boutisse, ce qui lui donne une faible résistance mécanique à l'arrachement. Les joints par conséquent jouent un rôle prépondérant dans l'adhérence. Ces pavés font 7 cm de hauteur, ils reposent sur un mortier de 4 cm reposant sur une dalle de béton de 10 à 20 cm. Ces pavés n'ont pas été étudiés en laboratoire.

(*) : Le protocole mis en place propose des mesures climatiques unidirectionnelles. Ce protocole a semblé inadapté au cas des sols pavés qui sont par nature hétérogènes, faits à la fois de pavés et de joints)



© Apur

Chaussée en pavés de granit « à l'ancienne »



© Apur



© Apur

Rue piétonne en pavés de granit scié



© Apur

► Dalles de granit

Les dalles de granit sont employées pour les trottoirs des quartiers historiques. Elles se présentent sous la forme de dalles brutes (dalles de fendage ou dalles clivées) aux formes variées ou bien sous la forme de dalles parfaitement découpées aptes à la réalisation de motifs. Ces dalles ont une épaisseur de 8 à 12 cm, elles reposent sur un mortier (4 cm), lui-même posé sur une dalle de béton de 10 à 20 cm. Ces dalles sont particulièrement résistantes et durables, si elles sont correctement posées et les joints bien exécutés. Elles sont donc une réponse appropriée à la forte sollicitation piétonne des quartiers touristiques. Ce matériau a été retenu dans l'expérimentation en laboratoire.

► Stabilisé

Le stabilisé est très employé à Paris, notamment pour les allées des squares, les contre-allées piétonnes de certains grands axes, mais aussi les quais de la Seine et des canaux. Le stabilisé est un béton clair d'environ 10 cm. Il est réservé la sollicitation piétonne. Ce matériau possède une très légère perméabilité. Ce matériau a été retenu dans l'expérimentation en laboratoire.

► Gazon

Le gazon n'est pas à proprement parler un matériau d'espace public. Il est très employé dans les espaces verts parisiens. Il a été retenu dans l'expérimentation comme une référence climatique par rapport à laquelle seront comparés les autres matériaux.



© Apur

Trottoir en dalles de granit



© Apur



© Apur

Stabilisé dans un square



© Apur



© Apur

Gazon dans un jardin



© Apur

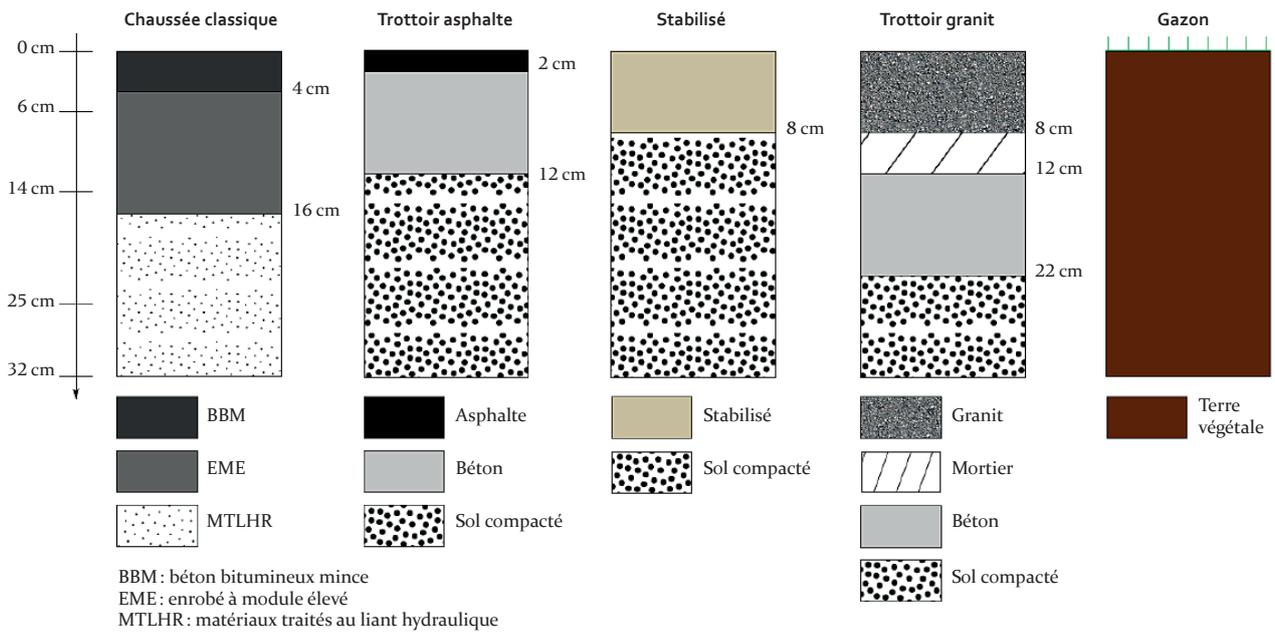
2/ Expérimentation et mesures

Il a été choisi de mener en laboratoire une série de mesures des propriétés thermiques de 5 matériaux de sol typiques rencontrés à Paris. On oppose généralement la mesure en laboratoire à la mesure in situ, c'est-à-dire sur l'espace public parisien. Les deux protocoles ont leurs avantages et inconvénients. La mesure in situ est assez complexe à mener car il faut installer sur un même site une palette de matériaux. Il faut aussi être opportuniste pour profiter des bonnes conditions climatiques. La mesure en laboratoire est par nature complexe puisqu'il s'agit de reconstituer de manière artificielle l'environnement thermique dans lequel sont plongés les matériaux « dans la vraie vie ». L'avantage de cette technique est la maîtrise des paramètres thermiques par l'opérateur et la reproductibilité des expériences.

L'expérimentation qui a été retenue consiste à étudier les carottages de 5 revêtements associés à leurs sous-couches. Si les revêtements de surface sont étudiés, c'est aussi ce qui se passe en profondeur qui doit être étudié car une grande part du comportement climatique de tel ou tel matériau traduit aussi le comportement thermique des sous-couches sur lesquelles il repose.

Les carottages sont enfermés dans un caisson étanche, thermiquement isolé dans lequel tous les paramètres climatiques sont contrôlés et mesurés. Un protocole s'étalant sur 24 h a été défini : il consiste en 8 h successives d'ensoleillement artificiel pour lesquelles la température est fixée à 35 °C et l'humidité relative à 35 %, suivies de 16 h sans lumière à la température de 25 °C pour une humidité relative de 70 %. Des capteurs situés dans les carottes de matériaux, entre les différentes couches, permettent de suivre l'évolution des différents paramètres thermo-climatiques.

Échantillons de revêtements parisiens retenus pour l'expérimentation



Conditions météorologiques appliquées aux échantillons

	jour (ensoleillement)	nuit (ombre)
Durée	8 h	16 h
Température de l'air	35 °C	25 °C
Humidité relative	35 %	70 %
Rayonnement visible (0,3-3 µm)	1 300 W/m ² environ	0
Rayonnement infrarouge (3-100 µm)	300 W/m ² environ	400 W/m ²

Le travail mené en laboratoire permet en premier lieu de mesurer les grandeurs physiques intrinsèques des matériaux : l'albédo et l'émissivité. Leur mesure permet de qualifier leur capacité de réflexion de l'insolation directe (albédo) et de mesurer leur capacité à émettre du rayonnement infra-rouge (émissivité).

Mesures de l'albédo et de l'émissivité (à l'exception du gazon pour lequel les données proviennent de la littérature)

Échantillon	Chaussée classique	Trottoir asphalté	Stabilisé	Trottoir granit	Gazon
Albédo	0,098	0,155	0,369	0,313	0,25-0,30
Émissivité	0,99	0,93	0,91	0,99	0,98

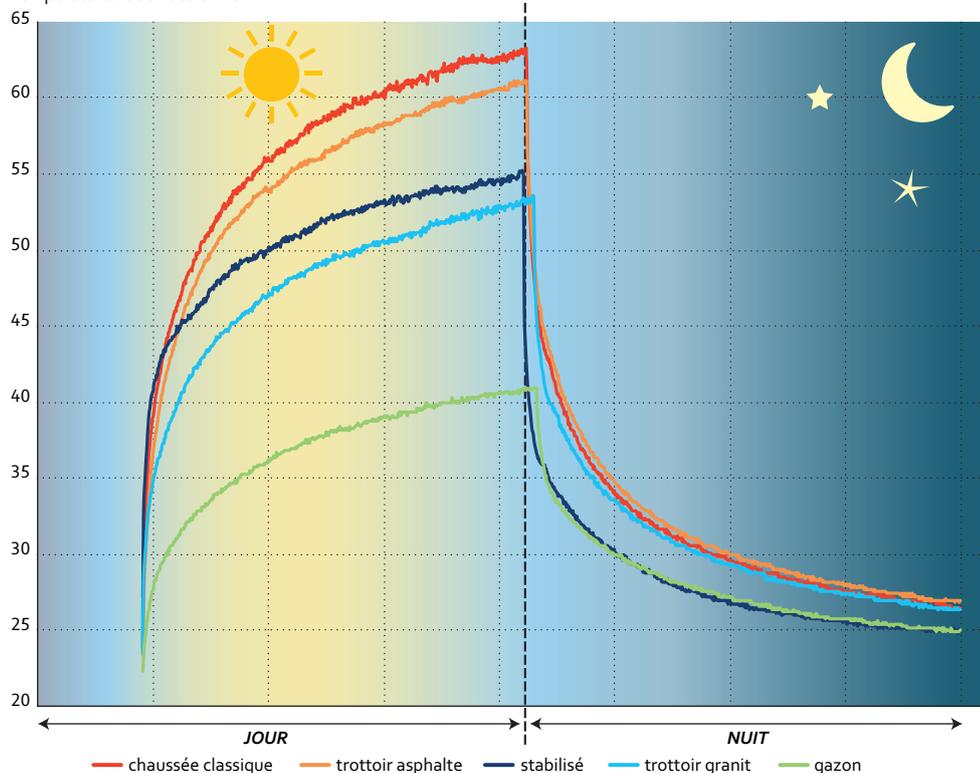
Les valeurs d'albédo mesurées montrent que la chaussée bitume et le trottoir asphalté sont très absorbants. Une grande part de l'énergie solaire qu'ils reçoivent est transmise dans le matériau. En revanche le stabilisé, le trottoir granit et le gazon sont deux fois plus réfléchissants. Une part de l'énergie qu'ils reçoivent (environ 30 %) est réfléchi et ne participe pas à l'échauffement de la matière.

L'émissivité, qui caractérise notamment la capacité des matériaux à rayonner la nuit et donc à se refroidir, est équivalente pour tous les matériaux. Elle est très bonne et proche de 1, on parle alors de « corps noirs ». À ce stade le granit pose un certain nombre d'interrogations car la mesure en laboratoire se base sur un matériau neuf, qui a été rendu rugueux industriellement pour assurer une bonne adhérence du piéton. En réalité, dans Paris, les dallages granit s'usent vite et présentent un aspect assez lisse, ce qui fait chuter leur émissivité et donc notre capacité à interpréter les mesures de rayonnement.

Les mesures permettent de suivre l'évolution de la température de surface des matériaux en fonction du temps, cette évolution est représentée sur 24 h pour chacun des échantillons.

Évolution de la température de surface de cinq revêtements parisiens sur 24 h

Température de surface en °C



Il y a deux moments bien distincts dans ces courbes : la phase diurne pendant laquelle les matériaux sont ensoleillés et s'échauffent et la phase nocturne pendant laquelle la décroissance de température s'effectue.

En journée les matériaux peuvent se rassembler en 3 grandes familles :

- les matériaux « très chauds » comme la chaussée bitume et le trottoir asphalte, ils dépassent les 60 °C en fin de journée,
- les matériaux « modérément chauds » comme le trottoir granit et le stabilisé, leurs températures se situent entre 50 et 55 °C en fin de journée,
- la référence climatique, le gazon, est un matériau « frais », il atteint les 40 °C en fin de journée.

Il existe une différence de plus de 20 °C entre les matériaux les plus chauds et le gazon en fin de journée. Notons qu'en tout début de journée c'est le stabilisé qui a la plus rapide progression de tous les matériaux.

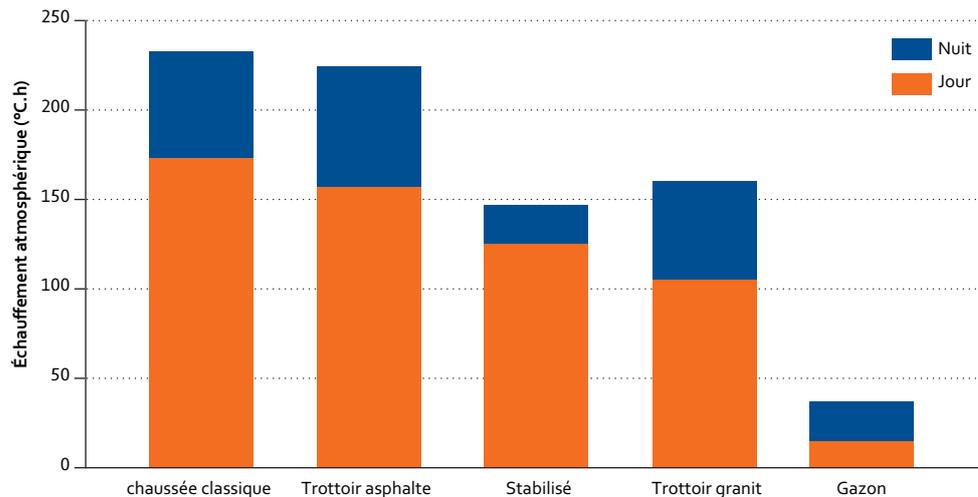
La nuit les matériaux se regroupent en seulement deux familles :

- Les matériaux chauds : chaussée, trottoir asphalte et granit
- Les matériaux frais : gazon et stabilisé.

La nuit les différences entre matériaux dits « chauds » et « frais » sont dans des ordres de grandeur très différents de ce qui se passait en journée. Ici une différence de quelques degrés est constatée. Le trottoir en asphalte qui était en journée moins chaud que le bitume devient le plus chaud des matériaux la nuit.

La température de surface permet de comprendre l'influence climatique des matériaux et notamment la façon dont ils participent à l'échauffement de l'air ambiant. On peut représenter cet échauffement de façon synthétique pour la période diurne et la période nocturne.

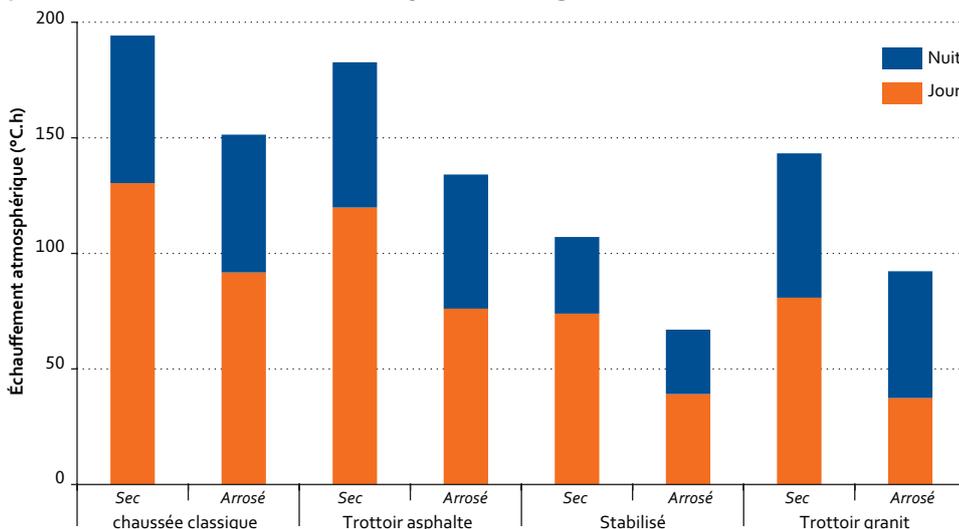
Contribution à l'échauffement atmosphérique



En marge de ce travail, il a été tenté de comprendre l'impact de mesures d'arrosage sur les matériaux durant la phase d'insolation. Dans cette phase du protocole, le travail consiste à asperger avec un vaporisateur de l'eau sur les matériaux et de réitérer cette aspersion dès que l'eau est évaporée. Les baisses de températures de surface constatées vont jusqu'à 9 °C, ce qui est cohérent avec les observations de terrains. En revanche il n'a pas été possible de démontrer un effet de l'arrosage diurne sur les températures nocturnes, alors que cette baisse est constatée dans les mesures in situ.

Structure	ΔT (Moy) (°C)	ΔT (Max) (°C)
Chaussée classique	3,0	9,1
Trottoir asphalte	3,0	7,7
Stabilisé	2,5	7,8
Trottoir granit	3,2	7,8
Trottoir thermosensible	2,5	8,1

Contribution à l'échauffement atmosphérique par le revêtement avec (droite) et sans (gauche) arrosage



3/ Interprétations, perspectives

3.1 Interprétations

Chaque échantillon de matériau répond à la sollicitation de l'ensoleillement de façon bien particulière. La nature du revêtement de surface ne permet pas à elle seule d'expliquer les phénomènes, pour cela il faut aussi s'interroger sur les matériaux qui composent les différentes sous couches qui ont des capacités plus ou moins grandes de stockage de l'énergie.

► Trottoir asphalte / chaussée bitume en condition « sèche »

Le trottoir en asphalte et la chaussée bitume ont des réponses climatiques problématiques en termes d'ICU. On constate que ces matériaux participent à l'échauffement de l'air de jour comme de nuit. Deux paramètres permettent d'expliquer ce phénomène particulièrement défavorable : la couche de surface est très absorbante et la couche souterraine est dense donc apte au stockage de l'énergie. De façon simplifiée, on peut dire que le matériau de surface joue le rôle de capteur de l'énergie solaire et le matériau sous-terrain joue le rôle de réservoir de l'énergie. Ces deux rôles sont assumés de façon très performante, ce qui explique un comportement défavorable de l'ensemble en termes d'échauffement atmosphérique.

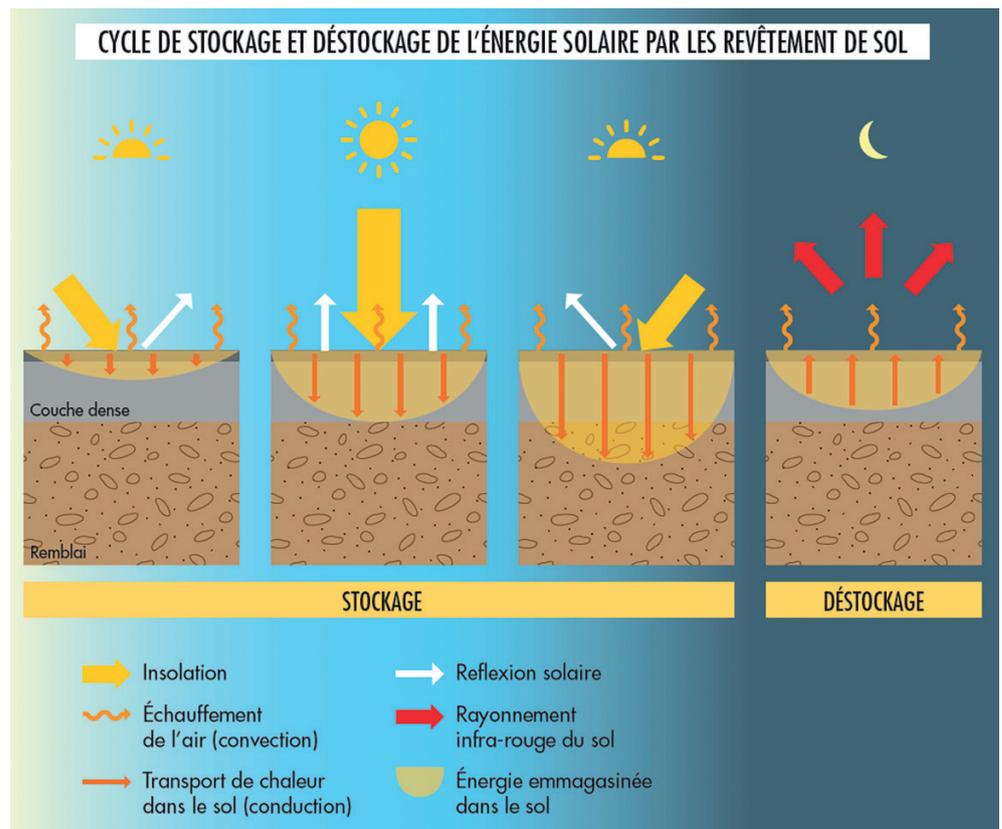


Coupe d'un trottoir asphalte : l'asphalte en surface joue le rôle de capteur de l'énergie solaire et la couche de béton, d'une dizaine de centimètres, joue le rôle de réservoir

La dynamique de ces mécanismes peut être décrite de la manière suivante :

- 1/ Au lever du jour on suppose les matériaux des différentes couches frais. Lorsqu'ils commencent à être éclairés, le soleil est encore bas dans le ciel. La couche superficielle commence à s'échauffer et de l'énergie se transmet petit à petit en sous-sol.
- 2/ À midi, l'insolation est presque verticale et beaucoup plus intense. L'échauffement de surface se poursuit, et le stockage en sous-sol passe dans une phase particulièrement active.
- 3/ Au coucher du soleil, l'insolation diminue. La température des revêtements continue d'augmenter mais beaucoup moins vite. En sous-sol, on atteint un maximum à ce moment-là. On peut comparer les sous-couches à des réservoirs d'énergie qui terminent leur remplissage en fin de journée. Selon la nature des matériaux de sous-sol, les réservoirs seront plus ou moins importants.
- 4/ La phase nocturne est la phase durant laquelle les matériaux se vident de leur énergie.

Ce raisonnement permet de décrire également le cas de la chaussée pavée recouverte d'enrobé qui n'a pas été étudié dans l'expérimentation.



► Dalles de granit

Le granit est un matériau qui obéit aux mêmes cycles de stockage et déstockage de l'énergie vus précédemment. La particularité du granit est que la dalle assume à elle seule les rôles de captage et de stockage, dans le cas du trottoir asphalté c'est deux matériaux différents qui jouent ces rôles.

Le granit est assez réfléchissant, une partie de l'énergie solaire est renvoyée par le matériau, une autre est captée. Le granit est extrêmement conducteur et possède une grande capacité de stockage, c'est pour cela que sa température de surface reste modérée et que la montée en température est lente.

Le granit est donc typiquement un matériau de jour, il est « intrinsèquement » frais tant qu'on ne l'éclaire pas trop longtemps. Cette sensation de frais propre au matériau se retrouve de façon analogue avec les faïences que l'on utilise en revêtement à l'intérieur de l'habitat dans le sud de l'Europe pour se préserver du chaud, à ce titre le granit est dit « effusif ».

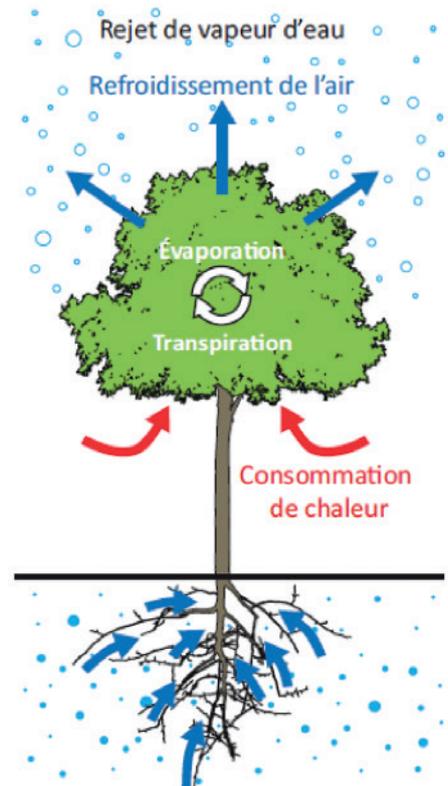
Sur l'espace public, le granit reste frais assez longtemps même avec du soleil le matin, cette qualité s'estompe au fil de la journée. La nuit il reste chaud durablement, et sa contribution à l'échauffement atmosphérique est du même ordre que les bitumes et les asphaltés.

► Stabilisé

Dans le cas du stabilisé les mécanismes de stockage/déstockage communs aux matériaux précédents ne sont plus valables. La couche superficielle du stabilisé est claire, ce qui implique qu'une grande part de l'énergie solaire est réfléchiée, la part restante n'est pas transmise à la sous-couche en béton souterraine en raison du caractère pulvérulent du matériau. C'est ainsi qu'on explique le caractère relativement frais du stabilisé la nuit. Ce matériau n'a aucune capacité de stockage de l'énergie solaire, bien qu'il soit assez chaud en journée.

► Gazon

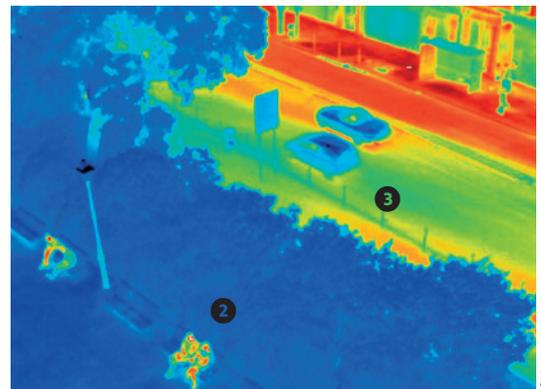
Dans le cas du gazon, les mécanismes de stockage et déstockage sont totalement absents. Le végétal se comporte de façon active vis-à-vis de l'insolation. Une part de l'énergie solaire est captée par le végétal dans le processus de la photosynthèse, l'eau contenue dans le sol est alors consommée et « transpirée » par la plante. Le mécanisme est dit « endothermique », il consomme de l'énergie, ce qui induit un rafraîchissement local de l'air ambiant. Ce mécanisme est particulièrement utile puisqu'il permet au végétal de se maintenir à des niveaux de température acceptables et d'éviter la surchauffe, c'est ce qui explique que les relevés de température de surface soient si bas dans les mesures en laboratoire : un peu plus de 40 °C quand la chaussée bitume dépasse les 60 °C. Ainsi le végétal se comporte comme un régulateur climatique local dont le fonctionnement est assujéti à la présence d'eau dans le sol. La nuit, le végétal n'est plus actif, seule subsiste l'évaporation de l'eau contenue dans le sol.



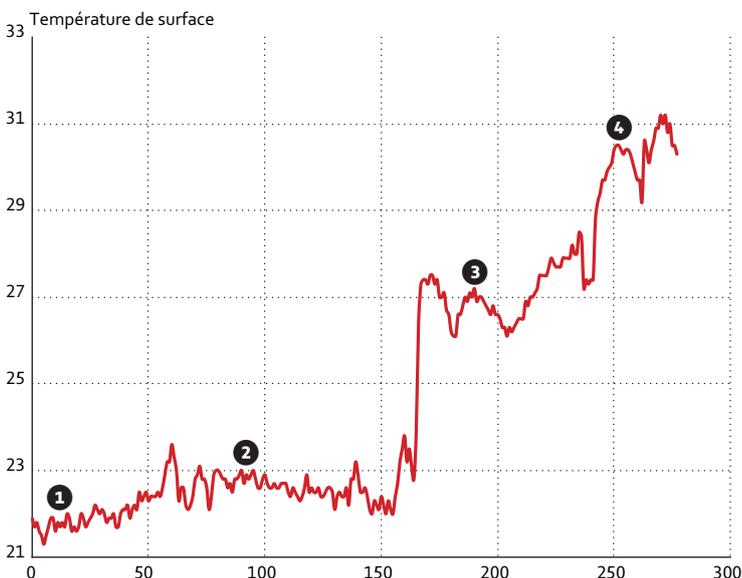
Principe de fonctionnement de l'évapotranspiration d'un arbre. Les mêmes mécanismes sont en jeu dans le cas du gazon

Différences de températures de surfaces d'une série de matériaux en fin de journée, au square St-Jacques et la rue de Rivoli (Paris 4^e)

- ❶ Stabilisé (22 °C)
- ❷ arbres (22,5 °C)
- ❸ chaussée en bitume (27 °C)
- ❹ trottoir granit (32 °C)



© Apur



© Apur

3.2 Perspectives

Les matériaux étudiés en laboratoire appartiennent chacun à des familles de comportements climatiques distincts.

La chaussée bitume et le trottoir asphalte sont les plus problématiques car ils possèdent un fonctionnement de type captage/stockage : la couche de surface capte très bien l'insolation et la couche souterraine joue le rôle de réservoir en raison de sa densité.

Le granit a beaucoup d'inertie ce qui lui permet de bien se comporter sur les insulations courtes, en particulier celle du matin. Le stabilisé est, parmi les matériaux minéraux, le plus efficace en raison de son absence totale de stockage. Le gazon quant à lui est le matériau le plus frais le jour en raison du rôle « actif » de la végétation en tant que refroidisseur, il est par contre équivalent au stabilisé la nuit, quand la végétation est inactive.

	JOUR	NUIT
asphalte noir (trottoir)	très chaud	chaud
béton bitumineux	très chaud	chaud
dalles de granit	modérément chaud	chaud
stabilisé	modérément chaud	frais
gazon	frais	frais

Ces considérations peuvent être qualifiées d'« intrinsèques », elles caractérisent les matériaux indépendamment de toute autre considération, notamment le type de contexte urbain dans lequel ils se trouvent. À ce stade on peut déjà réfléchir à des processus d'amélioration de ces matériaux dans le contexte actuel, c'est-à-dire en dehors de toute forme d'innovation technologique.

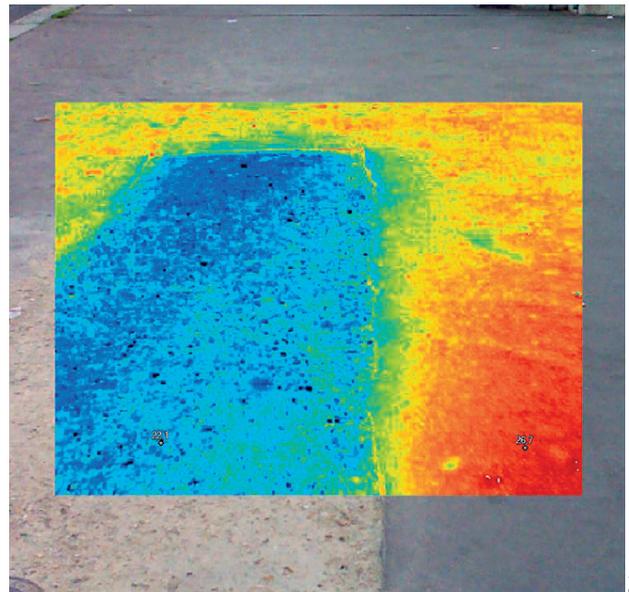
► Réinterroger le rôle de l'asphalte

Le trottoir asphalte présente de nombreuses possibilités d'amélioration. Elles sont d'ailleurs visibles dès que des travaux sont réalisés lors de la réfection des réseaux. Le seul fait de déposer la couche d'asphalte et de ne garder que le béton comme matériau apparent modifie complètement le rôle climatique du trottoir, la surchauffe est considérablement atténuée, le comportement ressemble alors à celui du stabilisé. Si en plus de cela une certaine porosité caractérise la couche de béton, on est alors en présence d'un complexe extrêmement efficace dans lequel de l'eau peut s'infiltrer et être restituée à l'air grâce à l'évaporation dans un processus de rafraîchissement.



© Apur

Mise à nue de la couche de béton sous l'asphalte du trottoir après réfection d'une canalisation



© Apur

Après travaux la couche de béton est recouverte de gravillons. Le comportement thermique est drastiquement modifié, il est semblable à un stabilisé.

► Joints poreux pour les pavés

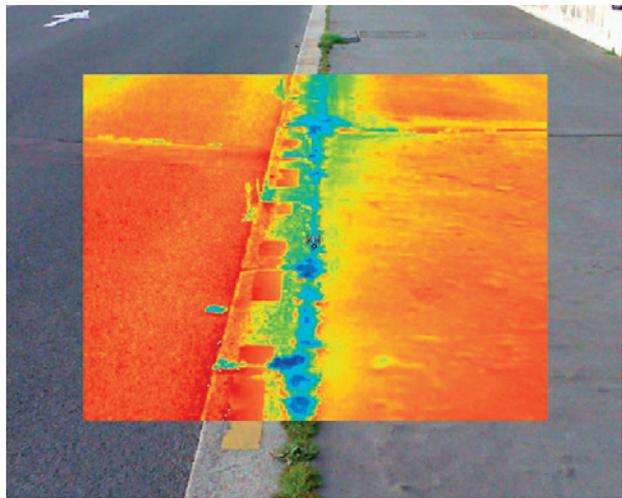
Si l'évaporation directe de l'eau sur l'espace public est souvent invoquée comme un moyen de rafraîchissement, il est a priori paradoxal d'arroser des surfaces imperméables comme les enrobés. Dans ce cas une grande part de l'eau est redirigée vers les égouts en pure perte, la partie restante est évaporée trop rapidement. La question de la rétention d'eau est donc fondamentale. Les anciennes chaussées pavées ont des possibilités intéressantes de rétention de l'eau. Dès que les joints sont usés l'eau peut s'infiltrer entre les pavés et imbiber le lit de sable souterrain. On est ainsi en présence d'un système de rétention d'eau efficace qui donne de la pertinence aux mesures d'arrosage en provoquant une évaporation sur la longue durée.

► Végétation interstitielle

Le végétal est le meilleur contributeur au rafraîchissement de l'atmosphère pour peu qu'il soit arrosé suffisamment. Il est par contre impossible d'envisager une chaussée ou des trottoirs qui ne seraient que végétalisés, il y a là incompatibilité d'usage. En revanche la végétation peut trouver sa place de façon partielle sur l'espace public : dans les défauts des matériaux, dans les joints des pavés, etc. Cette végétation interstitielle est souvent synonyme d'un manque d'entretien, elle est en réalité une contribution à la qualité climatique des revêtements.



© Apur
Végétation spontanée sur une voie peu circulée



© Apur
Végétation spontanée entre bordure granit et trottoir asphalte

► L'asphalte sur les pavés

L'asphalte a recouvert nombre de rue pavée. La performance climatique de cette pratique est très contestable car le système de captage/stockage de l'énergie solaire devient de ce fait particulièrement efficace, équivalent à une chaussée bitume. Néanmoins la durabilité de l'asphalte est faible, et l'érosion causée par le trafic routier tend à faire disparaître l'asphalte de façon perpétuelle. L'entretien de la couche d'asphalte est donc questionné.



© Apur

Érosion de l'asphalte d'une chaussée pavée

► Dimensionnement selon les niveaux de sollicitation

L'ambition d'avoir une voirie circulée et empruntée par des véhicules lourds a de nombreuses conséquences néfastes en termes d'ICU.

L'usage de véhicules induit l'emploi de matériaux comme le bitume ou l'asphalte qui sont ceux qui participent le plus à l'échauffement atmosphérique le jour et la nuit. À cela s'ajoute le fait que l'usage d'un véhicule à combustion produit un dégagement de chaleur qui est aussi un facteur aggravant de l'ICU. Enfin, la pollution atmosphérique (dioxyde d'azote et ozone) générée par la combustion renforce l'effet de serre local ce qui atténue le refroidissement nocturne et donc renforce l'ICU. L'usage de véhicule à combustion en ville participe donc de 3 manières à l'augmentation de l'ICU. Lorsque des voiries très empruntées changent de statut pour devenir des voiries secondaires ou sont rendues inaccessibles aux modes motorisés alors il est très simple d'employer des matériaux aux caractéristiques climatiques bien meilleures : pavés aux joints poreux engazonnés, stabilisé.

4/ Illustration de quelques espaces publics parisiens

Dans cette partie sont étudiées quelques typologies d'espaces publics parisiens afin de comprendre le rôle des revêtements de sol dans l'expression du climat urbain. En 2015, une thermographie aérienne de Paris a été réalisée à la demande de la Ville de Paris. Deux clichés ont été réalisés dans la nuit du 18 au 19 août, l'un à minuit et l'autre à 5 h du matin. La situation climatique représente une situation typique d'ICU estival. Bien que la nuit retenue ne soit pas caniculaire, la présence de l'ICU est visible ce qui permet d'éclaircir certains aspects de l'influence des matériaux sur le climat urbain.

Les espaces urbains étudiés sont présentés à titre illustratif, ils permettent de comprendre comment les matériaux sont susceptibles de jouer un rôle dans le climat urbain et dans quel contexte. Ont été choisies des situations urbaines dans lesquelles des surchauffes notables sont constatées la nuit :

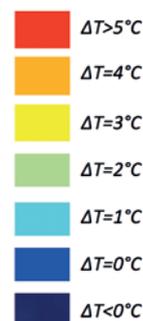
- avenues et rues larges (au-delà de 20 m de large) orientées Est-Ouest
- places
- rues étroites et impasses

Les clichés thermographiques donnent une restitution de la température de surface des matériaux. Cette température n'est pas un indicateur suffisant pour qualifier le confort thermique tel que le ressent le piéton. Néanmoins cette température permet de documenter les processus en cours dans les matériaux de sol. Généralement, un matériau qui est « chaud » la nuit est en train de restituer de la chaleur emmagasinée à l'air ambiant, il s'agit d'une situation défavorable liée à la nature du matériau et à la durée d'exposition solaire qu'il a subie. Les écarts de température relevés dans la nuit du 18 au 19 août 2015 font apparaître à minuit des écarts de température allant jusqu'à 5 °C.

Les points les plus chauds ($\Delta T > 5$ °C) correspondent aux zones de surchauffe qui sont particulièrement intéressantes à traiter par des mesures d'adaptation climatique lorsque cela est possible. Il s'agit souvent de zones très ensoleillées la journée et qui restituent la chaleur la nuit, mais cela peut concerner aussi des zones de dégagement de chaleur liées à l'activité humaine.

Les points les plus frais ($\Delta T = 0$ °C) correspondent à la valeur idéale de température la nuit, elle est atteinte par les revêtements stabilisés et les gazons.

Enfin des zones apparaissent comme nettement plus froides que les autres ($\Delta T < 0$ °C), il s'agit de revêtements impossibles à interpréter sur la thermographie, il s'agit en général de matériaux métalliques comme le zinc des toitures, mais aussi les toits de voiture, et enfin des pavés et dalles lorsqu'ils sont quelque peu réfléchissants dans l'infra-rouge.



4.1 Avenues et rues larges orientées est/ouest.

► Exemple 1 : rue Ampère et avenue de Villiers (Paris 17^e)

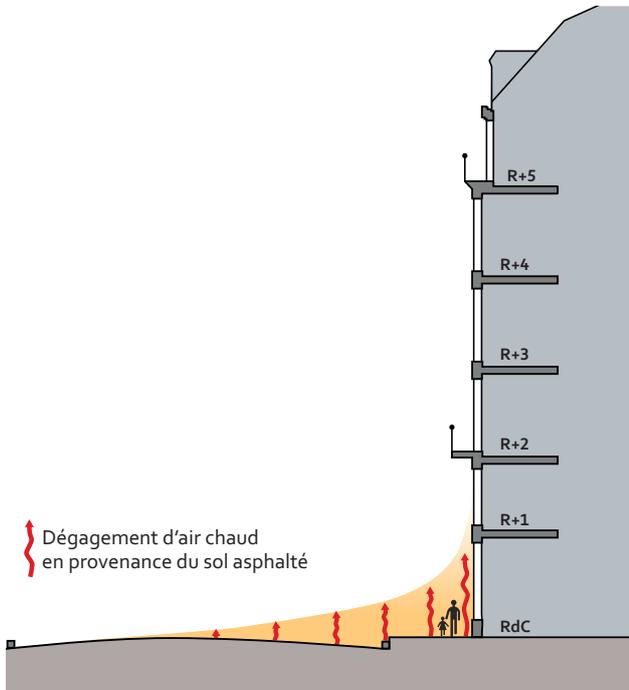
La rue Ampère et l'avenue de Villiers représentent des situations urbaines parisiennes critiques et assez récurrentes. Les niveaux de surchauffe constatés sont parmi les plus élevés que l'on rencontre la nuit en été à Paris. En effet, l'orientation Est-Ouest est défavorable sur les grands axes car le soleil y pénètre presque toute la journée, en particulier sur la rive nord.

Le cliché des rues Ampère et avenue de Villiers montre bien que l'inconfort climatique est le fait du trottoir nord. Plus les piétons cheminent le long du front bâti nord et plus ils se trouvent dans une situation d'inconfort climatique. À cela deux raisons :

- le sol asphalté a été largement ensoleillé, il restitue de la chaleur emmagasinée la nuit
- le front bâti au nord des axes a lui aussi été très ensoleillé.

Le cliché pris en fin de nuit montre bien que les pieds d'immeuble restent tardivement chauds. La présence d'une canopée constituée d'arbres à moyen développement est insuffisante pour contenir la sensation de surchauffe sur l'avenue de Villiers.

Nombre d'axes sont dans une situation comparable à celle de l'avenue de Villiers et de la rue Ampère. On peut citer : l'avenue des Ternes (75017), l'avenue de la Grande Armée (75008), boulevard Haussmann (75008), boulevard Saint Germain (75006), boulevard Garibaldi (75007), boulevard de Port-Royal (75005), etc.



Profil du trottoir nord de l'avenue de Villiers

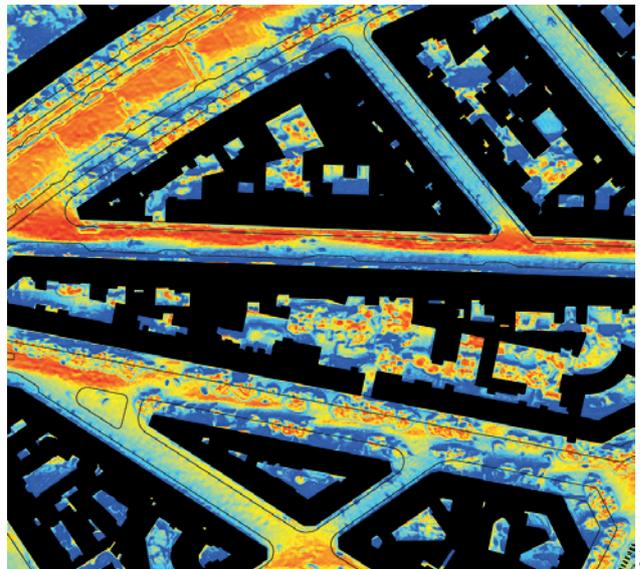
La zone de surchauffe nocturne se trouve au pied des immeubles, un endroit très ensoleillé en journée qui peine à se refroidir la nuit en raison du « piège radiatif » formé par la paroi du bâtiment

Rue Ampère et avenue de Villiers (Paris 17^e)



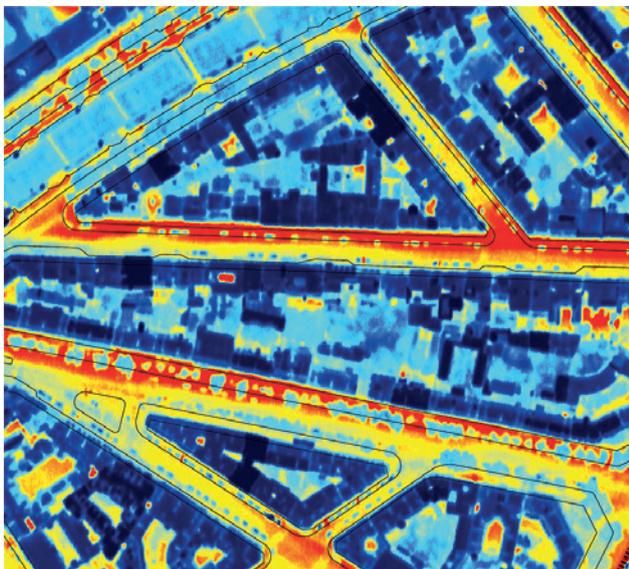
© InterAtlas 2012

Orthophoto de 2012



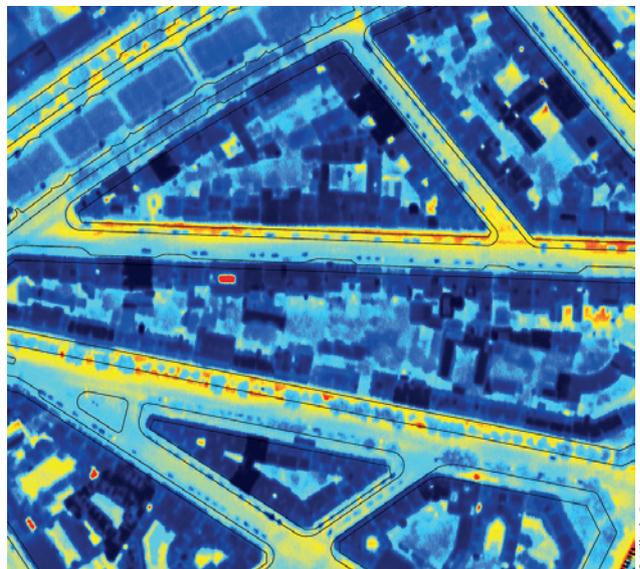
© Apur

Ensoleillement cumulé journalier d'un 19 août



© Ville de Paris

Thermographie d'été du 19/08/2015 à minuit



© Ville de Paris

Thermographie d'été du 20/08/2015 à 5 h

► Exemple 2 : avenue Foch (Paris 8^e)

La situation de l'exemple 1 est très défavorable, notamment en raison d'un emploi exclusif d'enrobés. L'exemple 2 est celui de l'avenue Foch, il s'agit d'une avenue particulièrement large de 120 m, il s'agit donc d'un espace ouvert très ensoleillé. Cette avenue est intéressante car elle est composée d'une grande gamme de revêtements usuels à Paris : enrobés, stabilisé, gazon, et pavés. Son étude montre comment l'exemple 1 peut être amélioré en jouant sur la nature des matériaux.

En ❶, on retrouve l'effet d'une chaussée très exposée au soleil sur la rive nord. Ici les pieds d'immeuble sont des petits jardins privatifs. La situation critique de l'exemple 1 n'est donc pas reproduite ici.

En ❷, la chaussée apparaît assez hétérogène, mélange d'enrobés et pavés. Il s'agit en fait d'une ancienne chaussée pavée recouverte d'enrobé qui s'érode au fil du temps, ainsi à certains endroits les pavés apparaissent. Ce phénomène d'érosion est total en ❸. On constate ici que cette zone apparaît comme plus « fraîche », néanmoins l'interprétation de la thermographie est ici sujette à caution, en raison de l'émissivité des pavés.

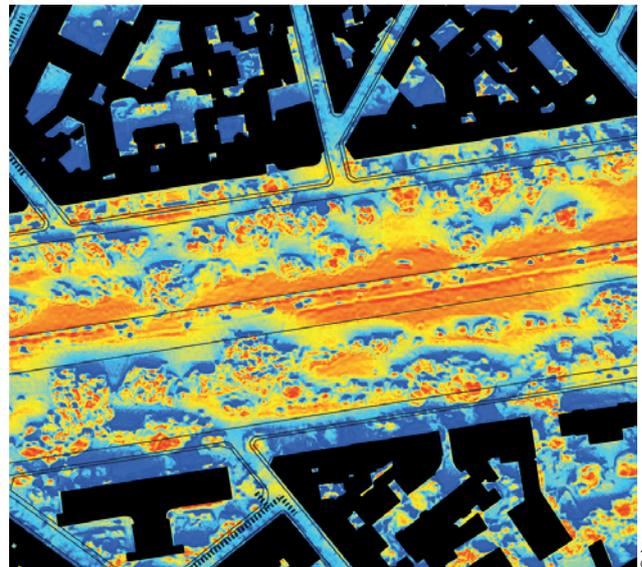
En ❹ et ❺, le stabilisé et le gazon montrent leur grande efficacité climatique nocturne, tel que cela a été présenté dans l'expérimentation en laboratoire.

La variété des matériaux employés induit une variété de réponses climatiques nocturnes. Sur l'exemple 1, des substitutions de matériaux offriraient donc des perspectives pour le traitement des zones les plus chaudes.

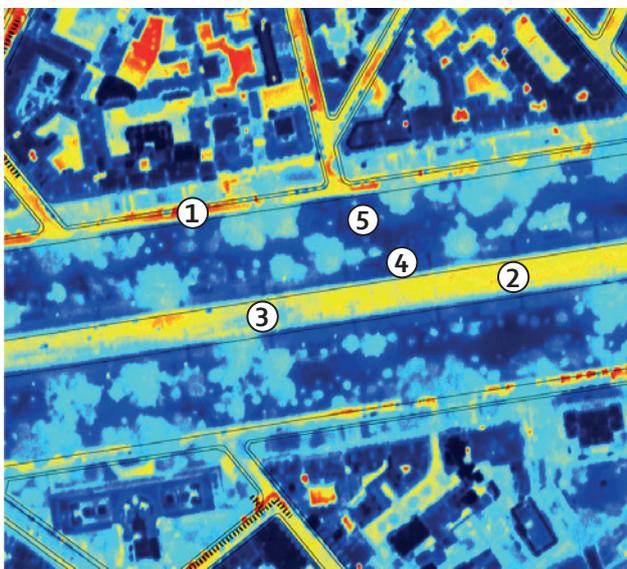
Avenue Foch (Paris 8^e)



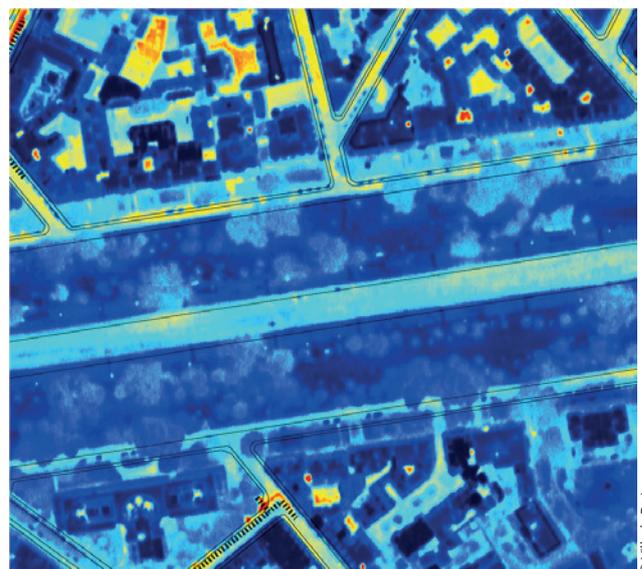
Orthophoto de 2012



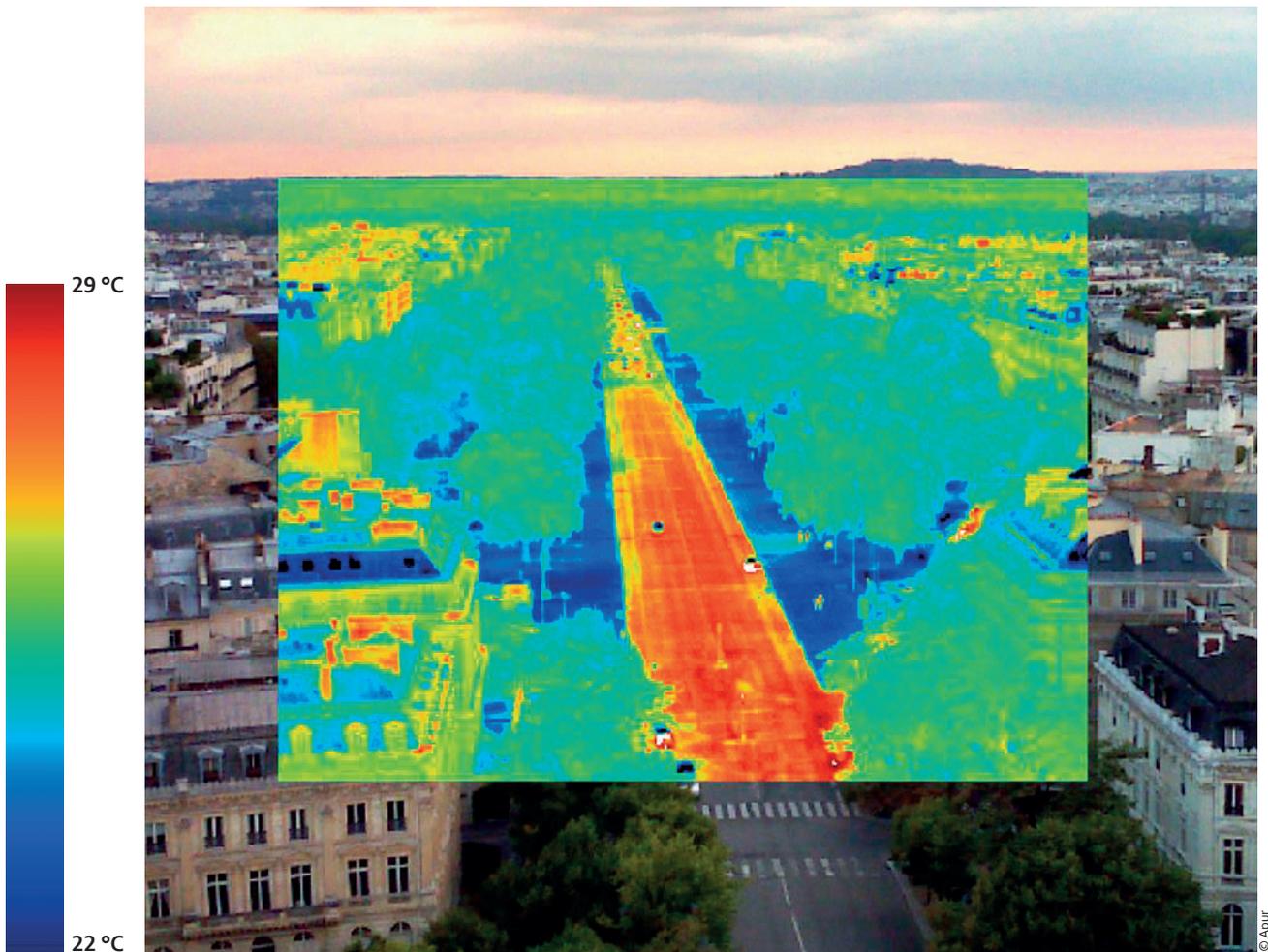
Ensoleillement cumulé journalier d'un 19 août



Thermographie d'été du 19/08/2015 à minuit



Thermographie d'été du 20/08/2015 à 5 h



Cliché de thermographie de l'avenue Foch vue depuis l'Arc de Triomphe le 3 août 2011

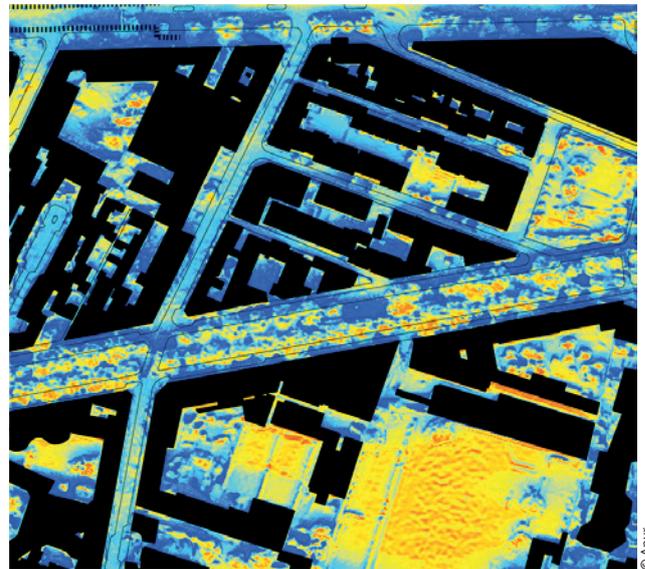
► Exemple 3 : le mail Belliard (Paris 18^e)

L'exemple 1 est une situation climatique critique notamment parce que l'espace public est très exposé à l'insolation. La présence d'une strate végétale haute peut apporter une réponse efficace à l'inconfort climatique. L'exemple 3, celui du mail Belliard, montre la plus valeur d'arbres à grand développement. Ici les piétons déambulent préférentiellement sur le terre-plein central sous une canopée très bien fournie. L'espace public est peu exposé aux surchauffes. Le report de la circulation automobile le long des immeubles avec des petits trottoirs permet la mise en œuvre de cet aménagement. L'effet de surchauffe en pieds d'immeuble étudié sur l'exemple 1 disparaît presque totalement ici : la canopée est haute, et les piétons évoluent préférentiellement sur l'espace central.

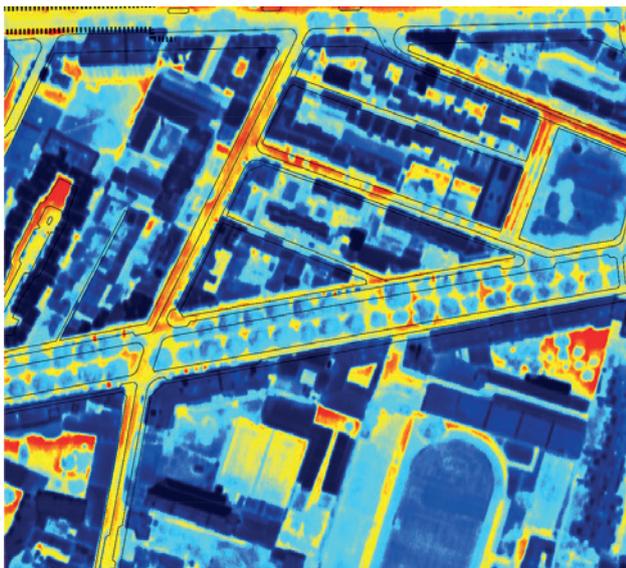
Rues Leibnitz et Belliard (Paris 18^e)



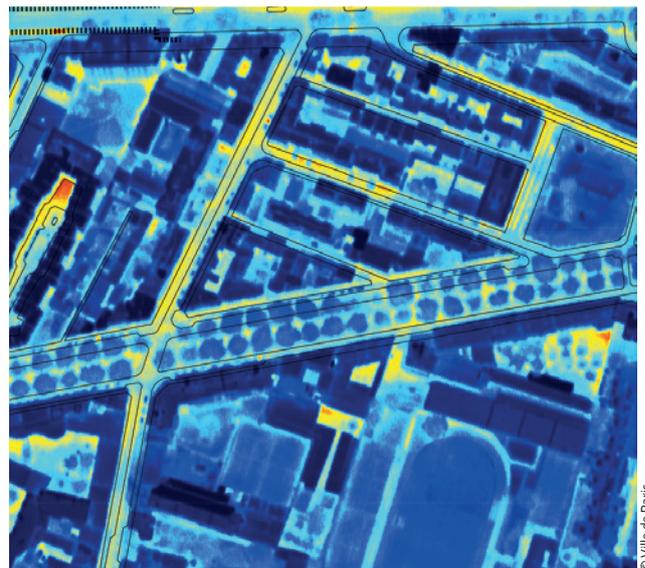
Orthophoto de 2012



Ensoleillement cumulé journalier d'un 19 août



Thermographie d'été du 19/08/2015 à minuit



Thermographie d'été du 20/08/2015 à 5 h

4.2 Places

► Exemple 4 : place des Victoires (Paris 1^{er} et Paris 2^e)

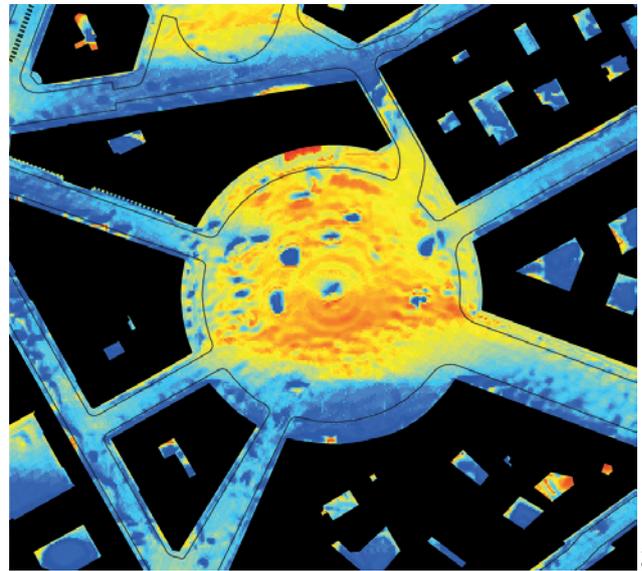
La place des Victoires est l'une des places royales de Paris. Elle mesure 70 m de diamètre, il s'agit donc d'une petite place si on la compare aux grandes places parisiennes produites au XIX^e siècle. Sa composition est assez simple : des petits trottoirs bordent les façades, l'essentiel de l'espace est dévolu à la circulation automobile. Les matériaux employés sont exclusivement à base d'enrobés. La simplicité de l'aménagement actuel de la place permet de comprendre le phénomène thermique en jeu dans la surchauffe de cet espace. L'ensoleillement est prononcé sur les $\frac{3}{4}$ de la place, seule la partie sud bénéficie de l'ombrage des bâtiments. Le refroidissement nocturne est particulièrement ralenti aux pieds des bâtiments, en particulier au nord-est de la place ; ce phénomène est similaire à celui rencontrés sur les trottoirs nord dans l'exemple 1.

Place des Victoires (Paris 1^{er} et 2^e)



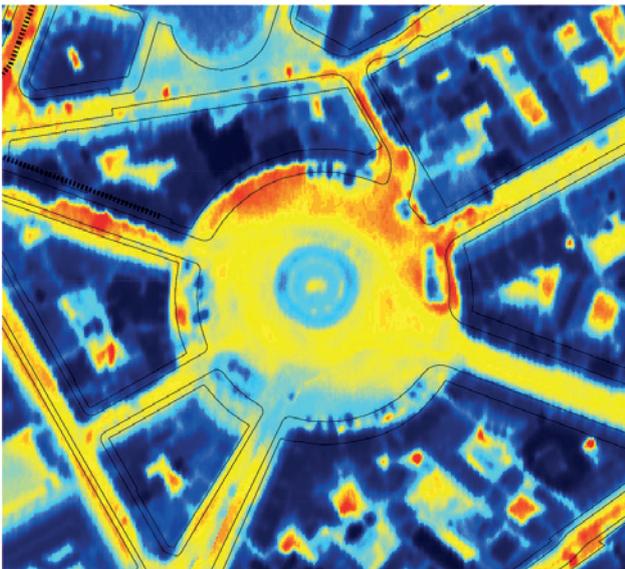
© InterAtlas 2012

Orthophoto de 2012



© Apur

Ensoleillement cumulé journalier d'un 19 août



© Ville de Paris

Thermographie d'été du 19/08/2015 à minuit



© Ville de Paris

Thermographie d'été du 20/08/2015 à 5 h

► Exemple 5 : place du Palais Bourbon

La place du Palais Bourbon présente une configuration urbaine proche de la place des Victoires. Sa principale différence est la variété de matériaux qui composent la place.

Tous les axes menant à la place sont en enrobés alors que la partie centrale de la place et la voirie sont recouvertes de pavés de grès. Les trottoirs sont en dalles granit.

Une première lecture de la thermographie montre que cette différence de matériaux se traduit par une différence de température des revêtements de sol. La partie centrale de la place est réservée aux piétons. Le pied du Palais Bourbon reste le point chaud de la place, et ce, malgré l'usage de dalle de granit. La conclusion que l'on peut tirer est que lorsqu'une dalle de granit est positionnée au pied d'un bâtiment fortement ensoleillée, elle a, tout comme, les enrobés, de grandes difficultés à se refroidir la nuit.

Un examen à petite échelle de la partie sud de la place permet d'approfondir l'analyse de la qualité thermique des matériaux. Ici un quadrillage est dessiné par des pavés de granit ❶ au centre duquel une statue est érigée. Le traitement de l'espace central est assez uniforme, des pavés de grès sont employés partout et seule une chaîne ❷ marque la séparation entre la partie centrale piétonne et la chaussée. Les piétons et les véhicules n'approchent pas de la chaîne, ainsi autour de la chaîne les pavés sont moins usés, moins salis ; ils sont donc beaucoup plus clairs. La différence en termes d'albédo est notable et se traduit par une différence de température visible sur la thermographie. Ceci confirme que la couleur d'un matériau est un facteur déterminant du confort climatique. Les pavés de grès salis captent plus l'énergie solaire que les pavés non salis.

Notons que de façon marginale, les pavés de grès accueillent une végétation spontanée dans les joints lorsqu'ils sont usés. Si la plus-value de cette végétation n'est pas perceptible sur le cliché aérien. Il s'agit d'un levier intéressant qui permet d'introduire de façon diffuse une végétation qui participe de façon bénéfique à l'ambiance climatique.

En ❸, une source de chaleur est détectée il s'agit vraisemblablement des rejets d'air chaud d'une climatisation. Cette contribution dite « anthropique » n'est pas anecdotique puisqu'elle crée de façon très localisée l'un des points les plus chauds de la place.

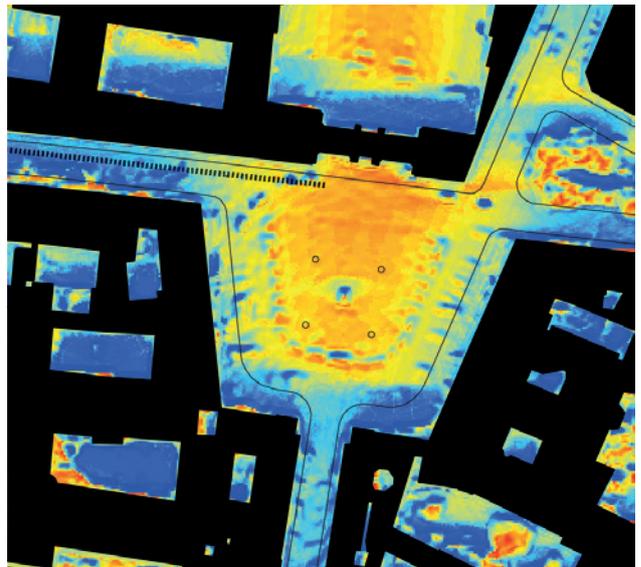
Plusieurs conclusions peuvent être tirées de cet exemple :

- Les points chauds comme les pieds d'immeubles sont présents avec les dalles granit comme on l'a constaté sur les exemples précédents avec les enrobés.
- La couleur des pavés de grès influence notablement la température des surfaces. Les sollicitations de l'espace public tendent à assombrir les pavés de façon irrémédiable et donc à augmenter leur capacité de transmission du rayonnement solaire sous forme de chaleur dans le sol.
- La température apparemment basse des dalles de granit en ❹ ne doit pas être interprétée comme fraîche pour des questions d'émissivité.

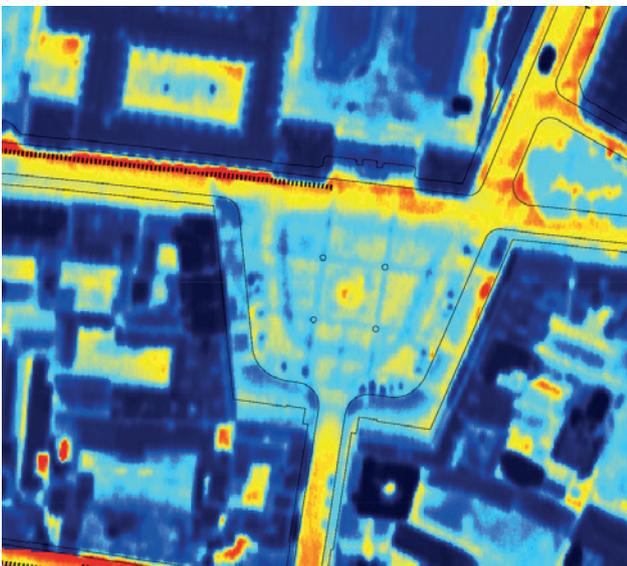
Place du Palais Bourbon (Paris 7^e)



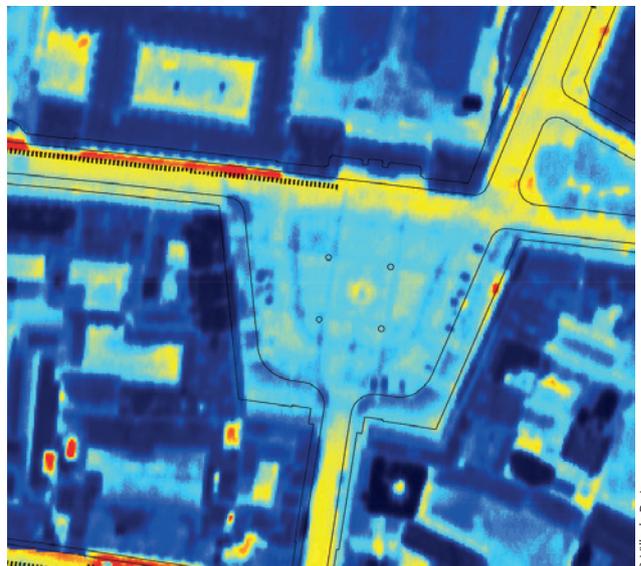
Orthophoto de 2012



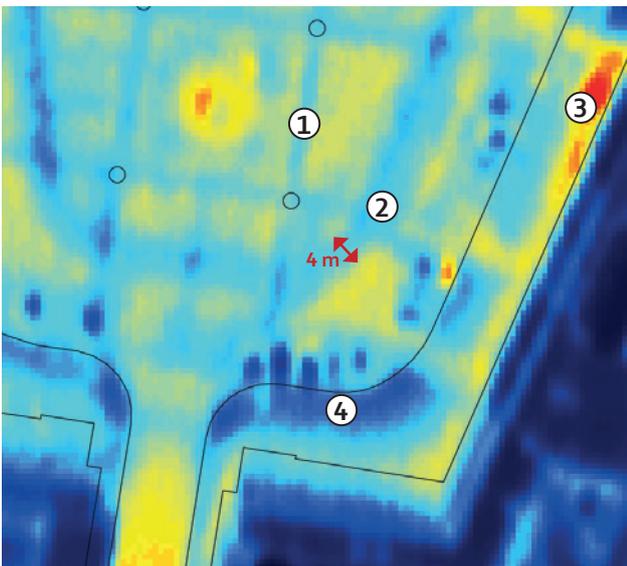
Ensoleillement cumulé journalier d'un 19 août



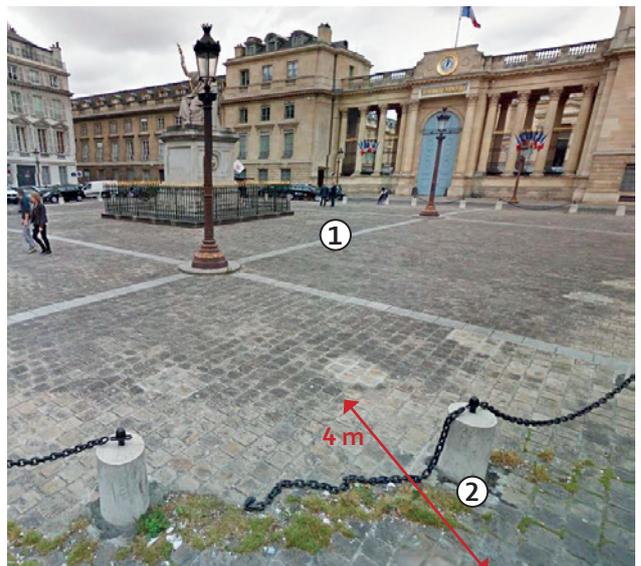
Thermographie d'été du 19/08/2015 à minuit



Thermographie d'été du 20/08/2015 à 5 h



Zoom thermographique d'été du 19/08/2015 à minuit



Vue depuis le sud-est de la place

► Exemple 6 : place de la Nation (Paris 11^e et Paris 12^e)

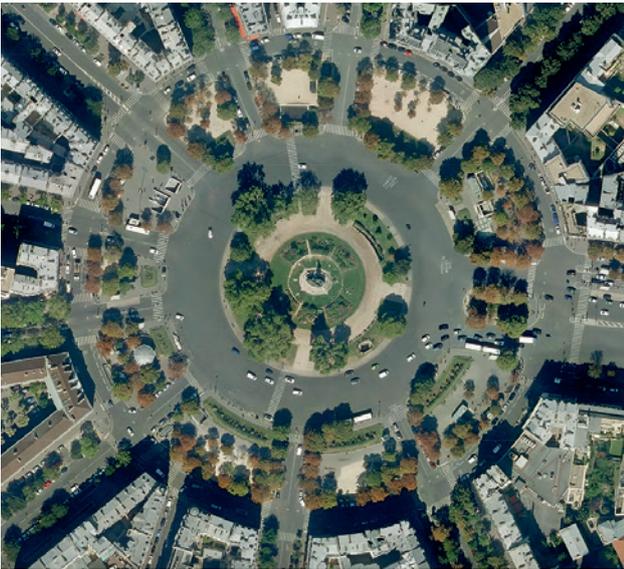
L'aménagement actuel de la place de la Nation est typique des grands aménagements réalisés à Paris au XIX^e siècle. Il s'agit d'une place très large de 250 m de diamètre où des axes majeurs de Paris se rencontrent.

La place fonctionne comme un giratoire double : les voitures peuvent circuler autour du square situé au centre de la place, ou le long des immeubles. Ces deux systèmes giratoires sont séparés par onze terre-pleins de tailles variables. Ces terre-pleins sont soit recouverts d'enrobé soit de stabilisé. La végétation haute est très présente sur les terre-pleins et dans le square.

La thermographie aérienne estivale fait ressortir une surchauffe imputable à l'insolation journalière dans le quart nord-est de la place ❶, le long des immeubles. C'est le même phénomène qui en jeu sur la place des victoires (exemple 4). En revanche les terre-pleins créent des interruptions ponctuelles de la zone de surchauffe, en particulier le terre-plein ❷ qui est recouvert de stabilisé et qui est arboré. L'insolation du 18 août ne se répercute pas sur ces espaces. À l'inverse le terre-plein ❸ qui est recouvert d'enrobé restitue la chaleur diurne et participe à la surchauffe de l'espace. Les arbres positionnés sur les différents terre-pleins participent activement à la définition du climat de la place de la Nation. Ces arbres jouent des rôles antagonistes. Le jour, ils protègent l'espace public du soleil et rafraîchissent activement l'air ambiant par évapotranspiration. La nuit leur rôle inverse : ils ne sont plus des rafraîchisseurs actifs, car l'évapotranspiration est arrêtée en l'absence de soleil, et surtout ils ralentissent le rafraîchissement nocturne des espaces qu'ils jouxtent à cause de leur canopée. Cet effet d'« obstruction radiative » des arbres est particulièrement sensible au pied des faces Sud des arbres ❹. Lors d'un aménagement urbain le positionnement des arbres est ultra-stratégique : il convient de penser leur positionnement en fonction des ombrages créés le jour et en prévoyant les pièges radiatifs qu'ils peuvent créer la nuit.

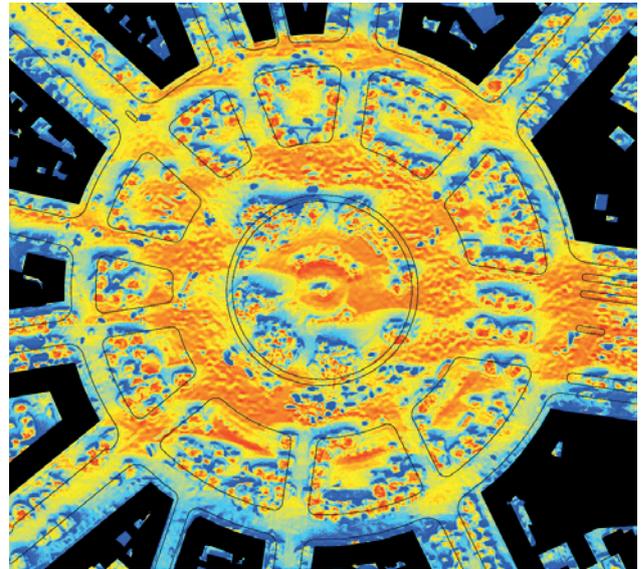
La deuxième source d'inconfort sur la place provient des rejets dits anthropiques, la chaleur provenant des activités humaines. Sur la partie Sud-Est ❺ de la place on observe une zone de surchauffe qui n'est pas due à l'insolation mais à un rejet de chaleur lié à la présence d'un supermarché, il s'agit des rejets d'une climatisation. La thermographie estivale de Paris a été prise à la mi-août, donc à un moment de l'année où la ville est particulièrement vidée de ses occupants, ce qui se traduit par une baisse notable de la circulation automobile. Le reste de l'année cette place est particulièrement circulée. Une canicule qui interviendrait au mois de juin se produirait dans un contexte où les rejets de chaleur des véhicules auraient une influence notable sur l'îlot de chaleur. Un cliché de thermographie d'hiver, du 6 mars 2009, témoigne de l'importance de la circulation automobile en tant que contributeur à l'ICU. Les allers et venues des véhicules et leurs rejets de chauds sont matérialisés en ❻. Au nord de la place le passage piéton ❼ se matérialise par une zone plus chaude, zone où les voitures s'arrêtent quand le feu est rouge. La chaleur des moteurs des véhicules chauffe le sol de façon durable et répétée à cet endroit. On remarque que la circulation est plus marquée sur le sud de la place ce qui témoigne bien des flux routiers Ouest-Est de début de soirée.

Place de la Nation (Paris 11^e et 12^e)



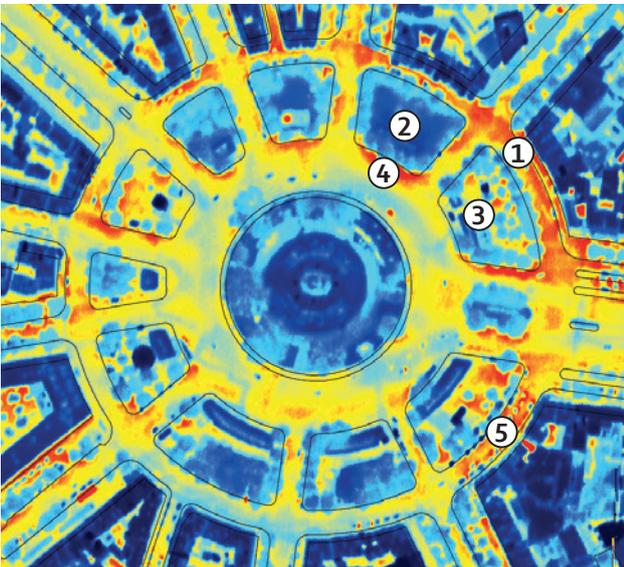
© InterAtlas 2012

Orthophoto de 2012



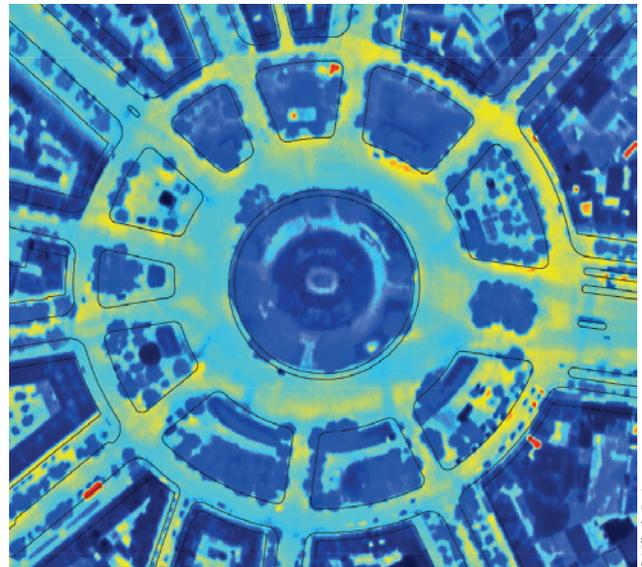
© Apur

Ensoleillement cumulé journalier d'un 19 août



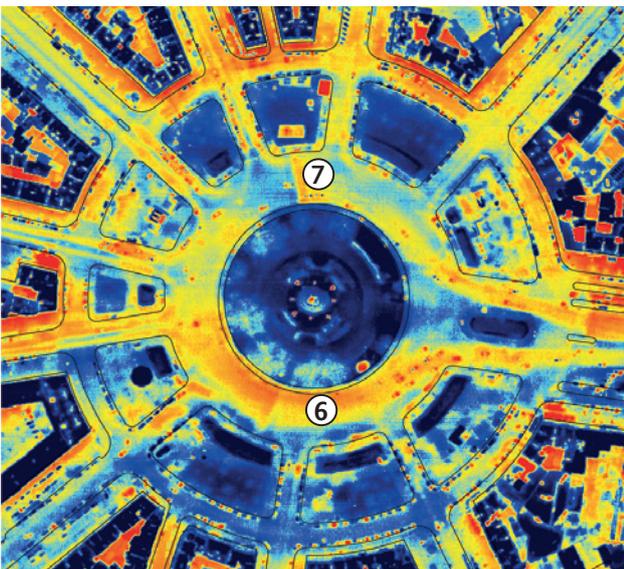
© Ville de Paris

Thermographie d'été du 19/08/2015 à minuit



© Ville de Paris

Thermographie d'été du 20/08/2015 à 5 h



© Ville de Paris

Thermographie d'hiver du 06/03/2009 en début de soirée

4.3 Rues étroites, impasses

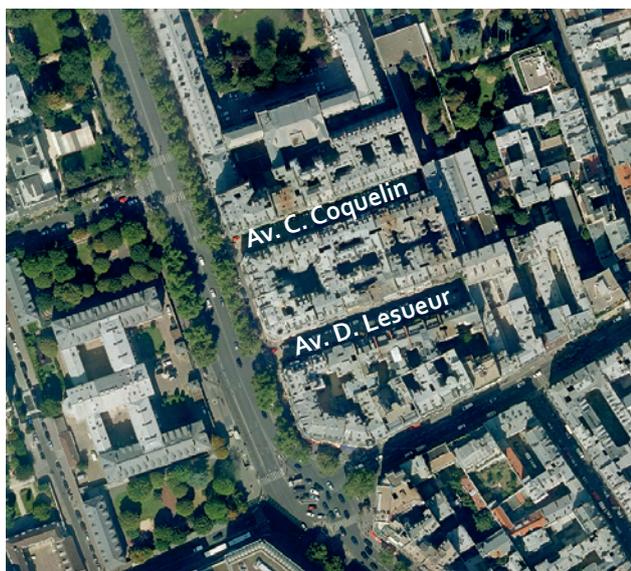
► Exemple 7 : avenues Constantin Coquelin et Daniel Lesueur (Paris 7^e)

Elles ont été réalisées dans les années 1900, il s'agit de voies de lotissement inachevées. Aujourd'hui ce sont des impasses bien qu'elles soient encore nommées avenues. Ces voies font 14 m de larges et les bâtiments atteignent R+6. Ces voies sont donc relativement encaissées. Le règlement de 1902, alors en vigueur lors de l'édification des bâtiments, a permis de prospects étroits et des cours intérieures aux îlots très resserrés. Ces avenues présentent trois caractéristiques défavorables d'un point de vue climatique :

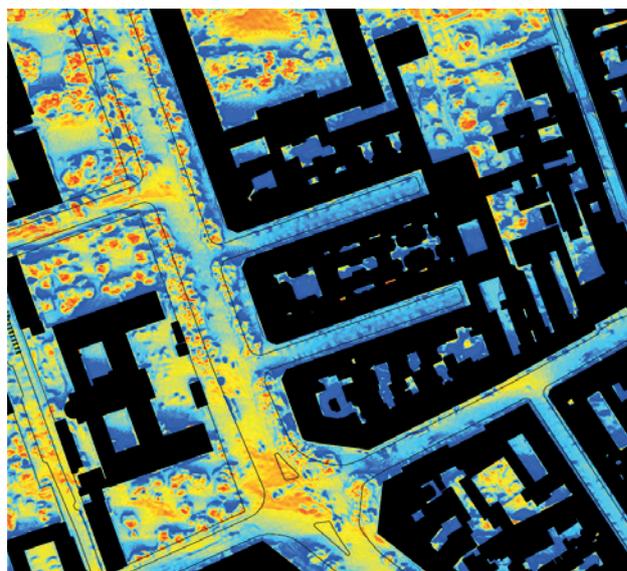
- il s'agit d'impasses, donc d'espaces clos dans lesquels l'air a tendance à stagner. Ces espaces sont protégés des vents et des brises ce qui participe à l'inconfort estival.
- Le caractère enclavé de l'espace (bâtiments hauts pour une voie moyennement large) crée un effet « canyon » qui ralentit le refroidissement nocturne.
- Le sol est recouvert de dalles de béton. Un matériau peu usité à Paris en tant que revêtement de sol mais vraisemblablement apte à stocker la chaleur du jour.

La thermographie estivale prise à minuit fait ressortir l'effet de surchauffe ① résultant de la conjonction des 3 facteurs défavorables énumérés ci-dessus. L'effet de surchauffe est particulièrement fort au bout des impasses. Le cliché pris à 5 h du matin fait ressortir encore une surchauffe persistante ② avenue Constantin Coquelin. Il est intéressant de noter qu'il existe un mur végétal au bout de l'avenue Daniel Lesueur. Ce mur est une réponse très intéressante à l'effet de surchauffe. D'un point de vue théorique il permet d'atténuer la chaleur emmagasinée par le mur mitoyen qui ferme l'avenue. Cet effet de refroidissement est à peine visible sur la prise de vue aérienne car il affecte principalement la paroi verticale ③.

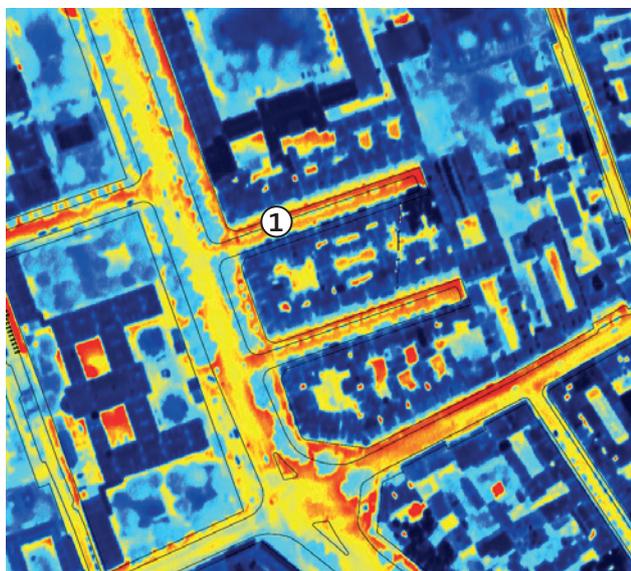
Avenues Constantin Coquelin et Daniel Lesueur (Paris 7^e)



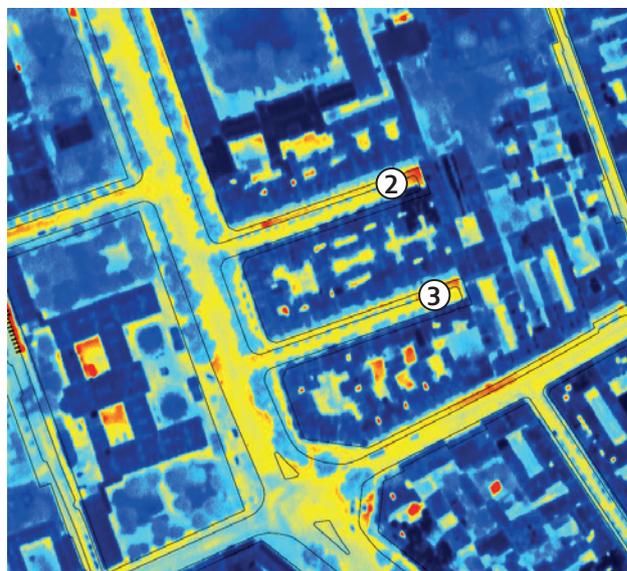
Orthophoto de 2012



Ensoleillement cumulé journalier d'un 19 août



Thermographie d'été du 19/08/2015 à minuit



Thermographie d'été du 20/08/2015 à 5 h

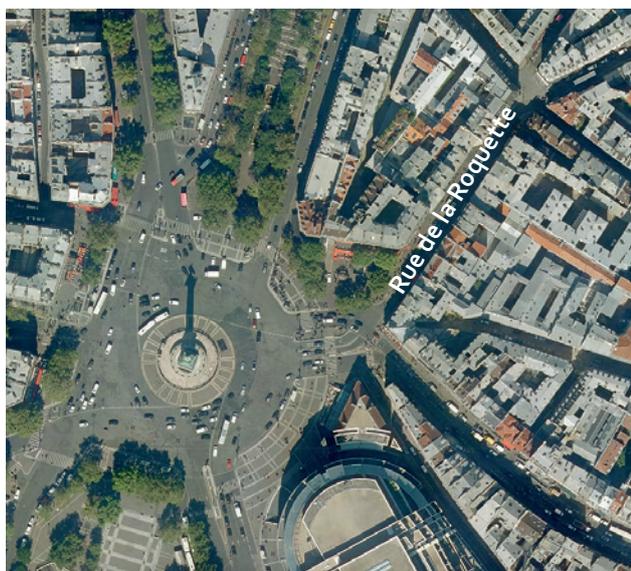
► Exemple 8 : début de la rue de la Roquette (Paris 11^e), à proximité de la place de la Bastille

La rue de la Roquette est une rue de faubourg. La portion étudiée ici est le démarrage de la rue au niveau de la place de la Bastille. Ici la plupart des bâtiments sont assez anciens (antérieurs au XIX^e) et relativement bas. On observe ponctuellement des surélévations de bâtiments qui ont eu lieu au XIX^e. Cette voirie forme donc un canyon urbain assez hétérogène en termes de prospect. La rue fait 14 m, elle est orientée nord-est/sud-ouest. Une orientation plutôt favorable en été car la durée d'ensoleillement n'est pas trop longue. La thermographie prise en été à minuit révèle une situation très anormale de surchauffe. Cette anomalie climatique ne peut être imputée à la seule forme urbaine, ni aux matériaux de sols (il s'agit ici d'enrobés).

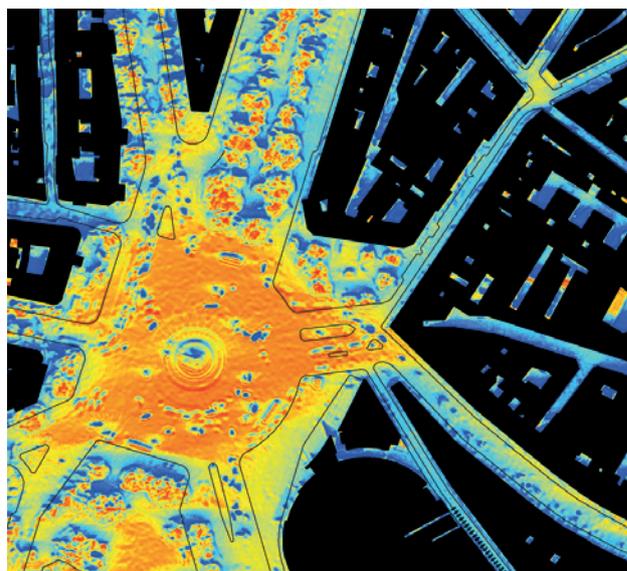
La rue de la Roquette est une rue très touristique avec une très grande densité commerciale. Beaucoup de bars, restaurants, supérettes se succèdent dans la rue. La densité est telle que la quasi-totalité des rez-de-chaussée sont affectés à l'activité commerciale. Ces commerces sont très majoritairement ventilés mécaniquement et climatisés. Les rejets d'air chaud s'effectuent directement dans la rue et dans les courettes des immeubles. Les courettes surchauffées sont visibles en **1** sur la thermographie. À l'inverse, en **2**, on observe le niveau de température « normal » d'une courette qui n'est pas affectée par des rejets d'air chaud. En **3**, la courette accueille un arbre, la réduction de température est sensible par rapport à **2**.

La rue de la Roquette est l'exemple d'une rue dans laquelle les mesures d'adaptation climatique « classique » (végétalisation, modification des revêtements, de sol, usage de l'eau, etc.) sont sans effets. La seule façon de traiter l'inconfort climatique réside dans la maîtrise des rejets de chaleur.

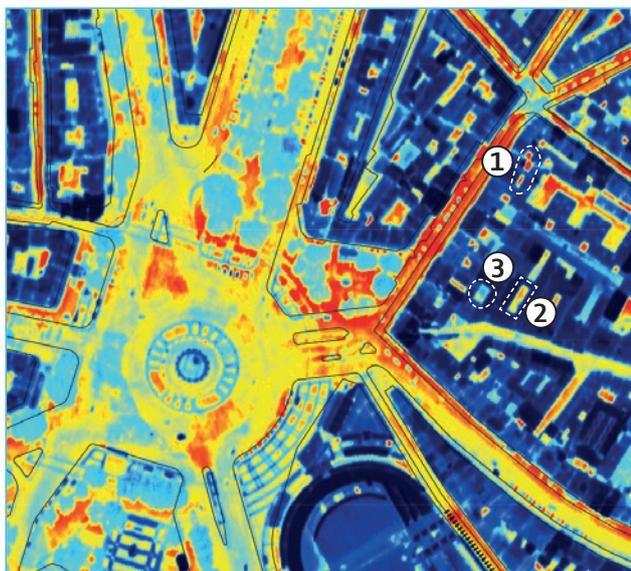
Début de la rue de la Roquette (Paris 11^e), à proximité de la place de la Bastille



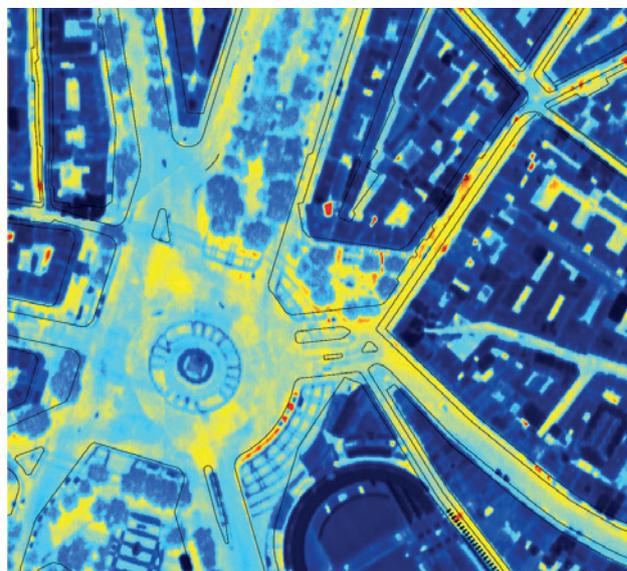
Orthophoto de 2012



Ensoleillement cumulé journalier d'un 19 août



Thermographie d'été du 19/08/2015 à minuit

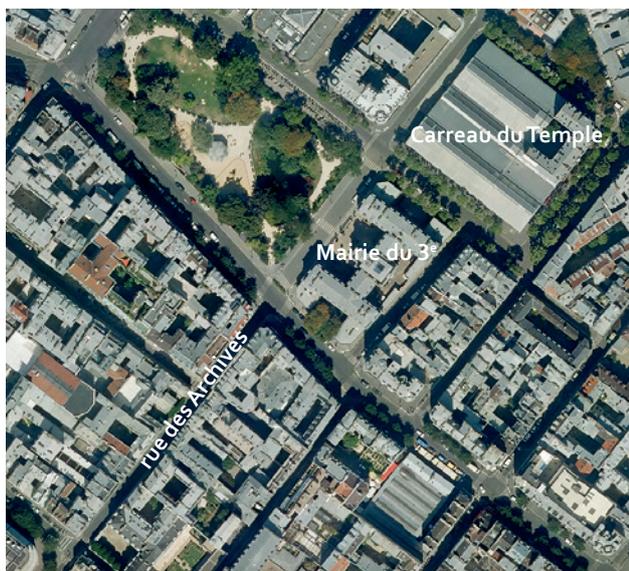


Thermographie d'été du 20/08/2015 à 5 h

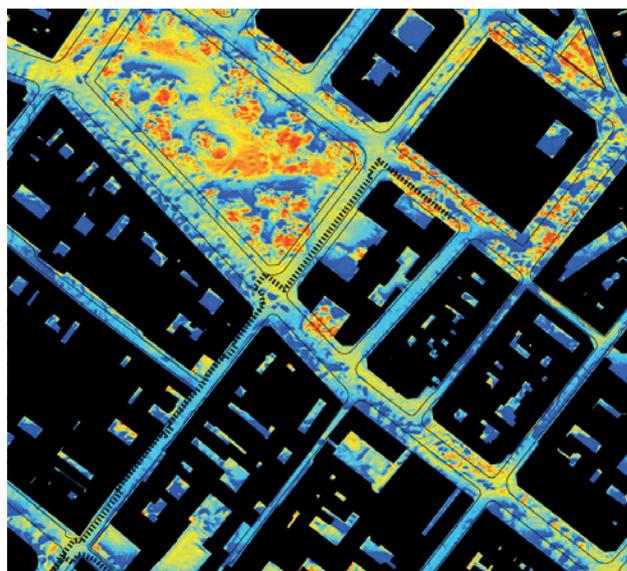
Exemple 9 : rue des Archives (Paris 3^e), à proximité de la mairie du 3^e arrondissement

La rue des Archives est située dans le Marais, un des quartiers anciens de Paris. La rue est étroite (8 m) mais les bâtiments sont relativement bas. En termes d'ensoleillement de l'espace public, cette situation urbaine est assez similaire à l'exemple de la rue de la Roquette. Le cliché thermographique révèle une surchauffe anormale qui n'est pas imputable à la configuration urbaine. Le problème vient de la présence d'un réseau de chauffage urbain enterré sous les trottoirs, qui fonctionne durant l'été pour assurer la livraison d'eau chaude des bâtiments. La canalisation qui passe rue des Archives sert au raccordement de la mairie du 3^e arrondissement. Le linéaire du réseau est très nettement visible sur la thermographie ①. Sur le cliché de 5 h du matin, il est intéressant de noter que seuls sont visibles les rejets de chauds liés aux activités: le réseau de chaleur ①, le carreau du temple en ②, et vraisemblablement un hôtel climatisé en ③. À cette heure tardive on constate que la chaleur provenant de l'ensoleillement qui a pu être stockée dans les matériaux de sol a très largement été dissipée. Ainsi, il paraît difficile dans une rue comme celle de la rue des Archives de proposer des solutions urbaines d'adaptation climatique, le réseau de chaleur reste un facteur très important de surchauffe. On notera que la végétalisation du 21 de la rue des Archives ④ apporte une solution de rafraîchissement climatique en cœur d'îlot tout à fait intéressante et ce malgré la proximité du réseau de chaleur.

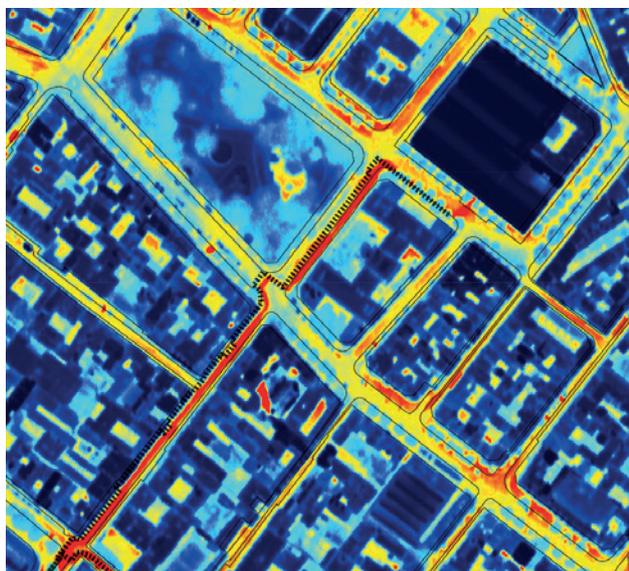
Rue des Archives (Paris 3^e)



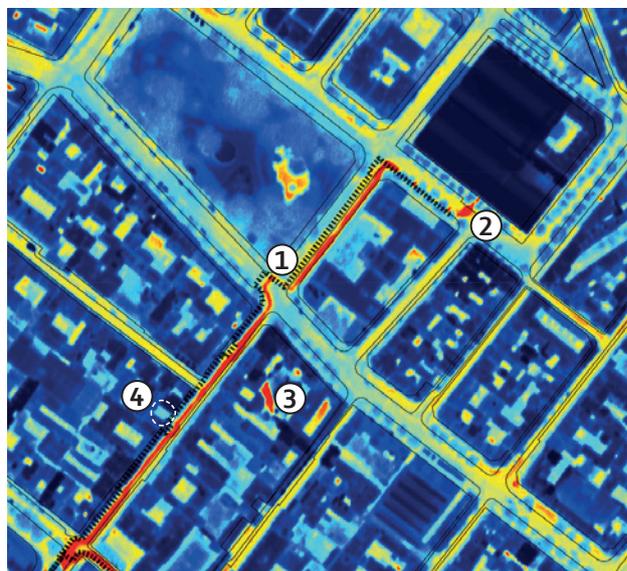
Orthophoto de 2012



Ensoleillement cumulé journalier d'un 19 août



Thermographie d'été du 19/08/2015 à minuit



Thermographie d'été du 20/08/2015 à 5 h

Synthèse

Les revêtements de sols dans une ville contribuent de façon remarquable à la qualité climatique des lieux. Mais leur influence doit être comprise selon le contexte urbain dans lequel ils sont employés. Ce contexte qui est celui imposé par la forme urbaine détermine le niveau d'ensoleillement et la capacité de refroidissement nocturne. A ceci doit s'ajouter les effets induits par les rejets de chaleur anthropique.

L'influence des types de matériaux de sol est particulièrement notable dans les lieux très exposés à l'insolation journalière.

Comportement climatique qualitatif de matériaux de sol suite à une insolation longue

	JOUR	NUIT
asphalte noir (trottoir)	très chaud	chaud
béton bitumineux	très chaud	chaud
dalles de granit	modérément chaud	chaud
stabilisé	modérément chaud	frais
gazon	frais	frais

La question globale de l'adaptation climatique à Paris peut se traduire par une volonté de réduction des points chauds, des substitutions entre matériaux et des expérimentations de nouveaux matériaux sont alors nécessaires.

Certains points chauds de Paris ne sont pas liés à une insolation forte ni à la présence de matériaux particulièrement stockant. On peut citer par exemple les zones avec des rejets de chaleur anthropique qui affectent particulièrement les espaces confinés et les petites rues. Si dans ces lieux il existe une circulation automobile forte ou une présence importante de climatiseurs ou le passage d'un réseau de chaleur alors ces problèmes doivent être considérés comme des problèmes de premier ordre qu'il faut résoudre avant toute mise en œuvre de solution d'adaptation climatique.

Lorsque les matériaux de sol ont une influence notable sur le climat urbain, il est légitime de poser la question de leur évolution voire de leur remplacement. Tout ceci doit être pensé avec les stratégies d'arrosage diurne qui permettent une évaporation qui rafraîchit l'atmosphère. Bien sûr dans ce cas, la perméabilité des matériaux est à optimiser afin d'allonger le plus possible le temps d'évaporation.

La classification fonctionnelle des matériaux réalisée en début d'étude peut être complétée par une classification climatique qui devient un élément supplémentaire de l'appréciation des avantages et inconvénients de chaque matériau. La plus-value des stratégies d'arrosage est documentée.

TYPES DE SOL	PROPRIETES CLIMATIQUES DES MATERIAUX	PLUS VALUE DE L'ARROSAGE
<p>béton bitumineux</p> <p>asphalte noir</p> <p>pavés de granit "à l'ancienne" recouverts d'enrobé</p>	<p>Ces matériaux stockent en profondeur l'énergie solaire qu'ils reçoivent, et la restitue sous forme de chaleur à l'atmosphère la nuit. Ils sont les moins performants des matériaux employés à Paris vis-à-vis de l'insolation.</p>	<p>L'arrosage de ces matériaux peut permettre une amélioration climatique en journée. Le caractère totalement imperméable des matériaux fait de l'arrosage une solution dont le rendement n'est pas optimal, une partie de l'eau ne s'évapore pas et part à l'égout. Le travail sur la perméabilité de ces sols est stratégique pour donner à l'arrosage sa réelle plus value.</p>
<p>pavés granit sciés</p>	<p>Les pavés sont lisses et assez réfléchissants. Lorsqu'ils sont ensoleillés, ils tardent à s'échauffer par rapport aux enrobés. En revanche, la nuit, ils restent durablement chauds. L'usage de joints robustes augmente les capacités de stockage de l'ensemble.</p>	<p>Cf. ci-dessus. Dans les rues étroites des quartiers historiques possédant une chaussée fendue, le coulage de caniveau apporte une plus value appréciable, quoique difficilement quantifiable.</p>
<p>pavés granit "à l'ancienne"</p>	<p>Ils sont posés sur lit de sable. La cohésion des pavés est assurée principalement par la technique de pose (en "queue d'arronde") et non par les joints. Ces derniers sont donc moins denses et moins capteur d'énergie que les pavés "sciés". Les pavés sont assez peu épais (10 cm), l'énergie stockable par ces pavés est moins importante que les dalles granit. La petite taille des pavés rend le refroidissement nocturne plus rapide que les structures massives de type dalles.</p>	<p>Dans le cas où les joints sont poreux ou défectueux, une infiltration d'eau est réalisable dans la sous-couche de sable. Cette eau peut théoriquement stagner et rester prisonnière dans le sable entre les pavés en surface et la dalle de béton en sous-face. Est ainsi formé un réservoir d'humidité, restituable par évaporation de façon différée.</p>
<p>dalles de granit</p>	<p>Les dalles de granit mettent du temps à s'échauffer le jour. Elles conviennent bien aux espaces peu exposés, notamment aux lieux qui ont une exposition exclusivement matinale. Leur capacité de stockage de l'énergie est très forte, donc lorsqu'elles sont surexposées, elles mettent du temps à se refroidir la nuit. Plus les dalles sont lisses et moins la capacité de refroidissement est bonne.</p>	<p>Cf. ci-dessus. Ici les joints occupent moins de place que dans le cas des pavés, l'infiltration est moindre.</p>
<p>stabilisé</p>	<p>Le stabilisé est pulvérulent en surface. Il n'a aucune capacité de stockage de l'énergie, il est un bon réfléchisseur d'insolation le jour (ce qui peut créer de l'inconfort visuel) et est immédiatement froid dès le coucher du soleil. Ses propriétés nocturnes sont proches de celle du gazon, c'est-à-dire excellente.</p>	<p>Le mouillage du stabilisé donne de meilleurs résultats qu'avec les matériaux imperméables. En revanche l'humidification de la surface reste de courte durée et peu profonde.</p>
<p>gazon</p>	<p>Le gazon est le meilleur type de sol, c'est la référence climatique. Il permet à la fois l'évapotranspiration et l'évaporation directe de l'eau du sol. Il n'a aucune inertie, il est immédiatement froid le soir.</p>	<p>L'arrosage est impératif, un gazon en stress hydrique perd toutes ses qualités climatiques et se comporte de façon équivalente aux enrobés.</p>

Comme nous l'avons exposé la question de la résistance mécanique est corrélée à la question climatique. Plus un espace public est apte à recevoir un fort trafic, notamment de camions, plus la sous-couche qui le compose doit être importante. Cette sous-couche agit comme un réservoir de chaleur qui est vidée la nuit. La question climatique amène à se poser la question de l'éventuel surdimensionnement de cette sous-couche. S'il y a surdimensionnement, il y a majoration de l'inconfort climatique.

Si la résorption de points chauds est associée à un projet d'aménagement, alors il y a de grandes chances pour que les usages des espaces publics soient redéfinis, ce qui peut être l'occasion d'une amélioration climatique des lieux par substitution entre matériaux aux qualités d'usage différentes.

Conclusion

La nature des matériaux de sols à Paris est responsable d'une part de l'inconfort estival ressenti à Paris en période caniculaire. Nombre de matériaux ont des capacités de stockage de l'énergie solaire comme les enrobés ou les matériaux minéraux. L'implication de ces matériaux sur l'inconfort estival est particulièrement forte dans certains lieux où la forme urbaine permet une insolation durable du sol. Cet inconfort est alors maximal au pied des bâtiments, comme par exemple sur la rive nord des places ou des larges avenues orientées est-ouest.

La stratégie d'adaptation au changement climatique peut se traduire par une volonté d'endiguer le stockage de chaleur dans le sol dans les lieux chauds les plus problématiques de Paris.

- La question des usages de l'espace public est intimement liée à la question climatique, car plus un espace est apte à recevoir un fort trafic, plus les matériaux employés possèdent de résistance mécanique et donc sont capteurs d'énergie solaire. Ainsi, les projets urbains qui redéfinissent les usages de l'espace public en transformant des voies circulées en voies peu ou pas circulées offrent la possibilité de substituer les matériaux existants par d'autres matériaux moins contributeurs à la surchauffe de la ville.
- Les trottoirs en asphalte ont une capacité de stockage de l'énergie solaire trop importante. Cette capacité s'exprime de façon critique en pieds d'immeuble sur les espaces très ensoleillés. Une évolution du trottoir asphalte est donc nécessaire. On s'interroge à ce stade sur l'intérêt de continuer à asphalter le sol alors que la couche de béton sur laquelle repose l'asphalte possède des qualités climatiques bien supérieures, comparables à celle des stabilisés qui sont parmi les matériaux les plus résilients de l'espace public parisien.
- Grâce au réseau d'eau non potable de Paris, un arrosage du sol peut provoquer un rafraîchissement de l'espace public, le jour en période de canicule. Les matériaux de sols aujourd'hui se prêtent mal à cette technique car ils sont pour la plupart imperméables. Si le béton peut être employé comme matériau de surface pour les trottoirs après abandon de l'asphalte, alors il convient de réfléchir à la porosité du béton afin d'offrir aux trottoirs une possibilité de stocker l'eau d'arrosage et de la restituer par évaporation. Concernant les chaussées, les anciennes voiries pavées offrent également de bonnes capacités de stockage de l'eau, pour peu que les joints soient poreux. Ces chaussées sont très présentes à Paris bien que relativement invisibles puisqu'elles furent recouvertes d'asphalte après-guerre. La réhabilitation de ces chaussées pavées semble une piste simple et peu coûteuse dans la stratégie de résilience de Paris.

Bibliographie

Apur,

* *Les îlots de chaleur urbains à Paris*, Cahier #1, 2012.

* *Simulations climatiques de trois formes urbaines parisiennes et enseignements*, Cahier #2, 2014.

* *Brises thermiques*, Cahier #3, 2017.

Mairie de Paris,

Matériaux de revêtements des chaussées et trottoirs. 1993.

Mairie de Paris,

Thermographie estivale témoin réalisée dans la nuit du 18 au 19/08/2015 à minuit et 5 h du matin.

Hendel, M., Grados, A., Colombert, M., Diab, Y., & Royon, L. (2015),

Quel est le meilleur revêtement pour limiter la formation des îlots de chaleur urbains ?

In Congrès Français de Thermique 2015 : la Thermique de l'Habitat et de la Ville.

26-29 mai 2015, La Rochelle, France. (In French)

Les îlots de chaleur urbains à Paris

Cahier#4 : influence climatique des revêtements de sol à Paris

Les revêtements de sol jouent un rôle décisif dans les phénomènes micro-climatiques urbains. Selon les situations urbaines dans lesquelles ils sont employés ils contribuent de façon variable à l'îlot de chaleur. Afin de mieux comprendre ces phénomènes, l'Apur a travaillé avec le Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain (LIED) de l'université Paris-Diderot et le Laboratoire d'Essai des Matériaux de la Direction de la Voirie et des Déplacements de la Ville de Paris afin de tester le comportement climatique de cinq échantillons de revêtements de sol à Paris.

Cette étude s'inscrit dans une série de quatre cahiers consacrés aux îlots de chaleur urbains du cœur de l'agglomération parisienne :

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

L'Apur, Atelier parisien d'urbanisme, est une association 1901 qui réunit la Ville de Paris, le Département de Paris, l'État (la DRIEA, l'Insee), la Métropole du Grand Paris, le Forum métropolitain du Grand Paris, la Chambre de Commerce et d'Industrie de Paris Ile-de-France, la Régie Autonome des Transports Parisiens, la Société du Grand Paris, l'Assistance publique - Hôpitaux de Paris, la Caisse des dépôts, Eau de Paris, l'Épaurif, Grand Paris Aménagement, Paris Habitat, Ports de Paris, le SIAAP, le SIPPEREC, SNCF Immobilier, le STIF, le Syctom, les territoires : Est Ensemble (T8), Grand-Orly Seine Bièvre (T12), Grand Paris Seine Ouest (T3), Paris Terres d'Envol (T7) et Plaine Commune (T6).

