

apur

Les îlots de chaleur urbains à Paris

Adapter la ville aux canicules

lundi 1^e avril 2019

FRAC - Orléans

111 avenue de France - 75013 Paris
tél : + 33 (0)1 83 97 64 00
<http://www.apur.org>

Sommaire :

1/ Le changement climatique global. Quel est le rapport avec les îlots de chaleur urbains (ICU) ?

2/ Qu'est qu'un ICU ?

3/ La végétation

4/ L'eau

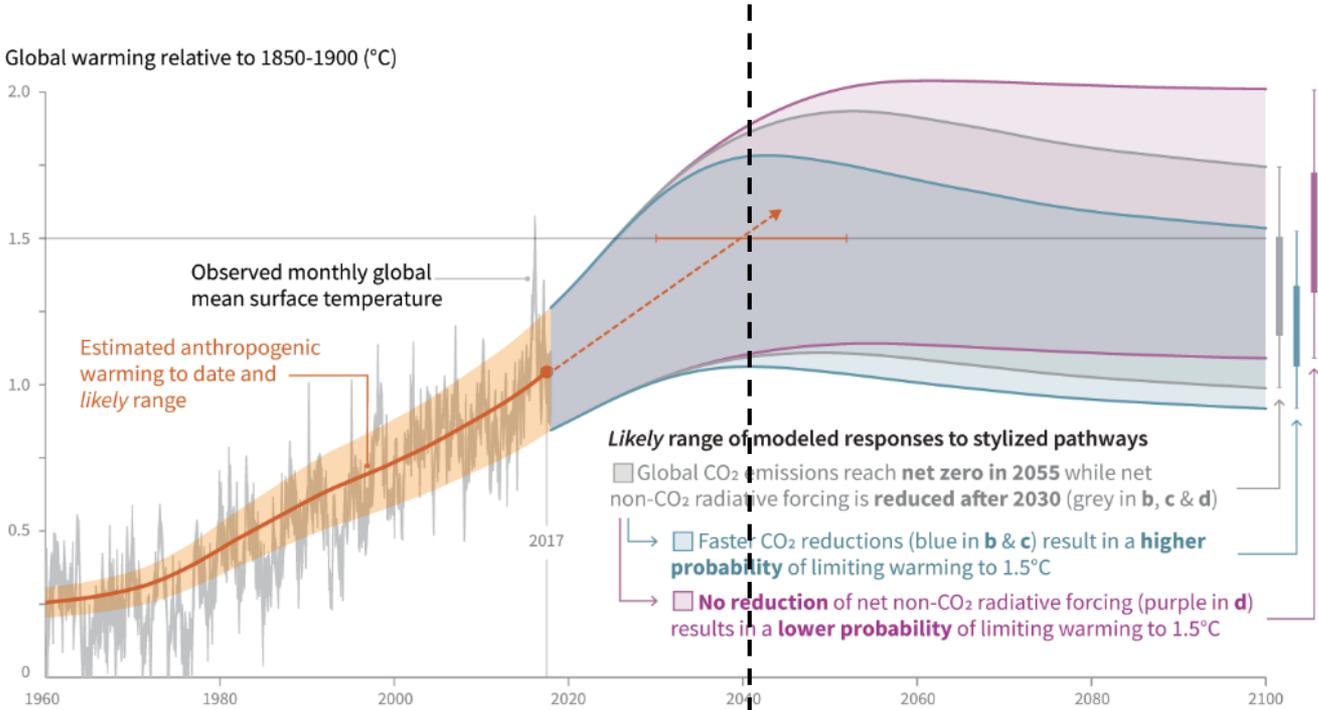
5/ Les matériaux de sol

6/ Chaleur anthropique

7/ Brises thermiques

Conclusions, Bibliographie

Changement climatique global : dernier rapport du GIEC



Source : IPCC (2018)



la couverture nuageuse est constante depuis des millions d'années... sinon on aurait eu la trace de changements climatiques intenses. Cette couverture vaut environ 50%. Son évolution est la principale source d'incertitude des modèles climatique.

Il existe un seuil critique fixé arbitrairement à 2°C. Au delà de ce seuil il existe des possibilités d'emballement du système (« rétroactions positives »), dans ce cas les courbes ne se stabilisent pas à une température donnée mais continuent d'augmenter de façon irréversible, ex : dégel permafrost, ralentissement du stockage carbone dans les sols et les forêts, disparition des nuages bas, etc...

Liens avec la question des ICU :

- Les ICU existent hors considérations sur le changement climatique,
- Le changement climatique accroît la problématique des ICU
- Toutes les considérations qui suivront sur les ICU n'ont plus de sens dans un monde qui franchit le seuil des 2°C. Puisque l'habitabilité du « système terre » est réinterrogée.

Changement climatique global : dernier rapport du GIEC

Les scénarios du GIEC pour un monde à 1,5°C.

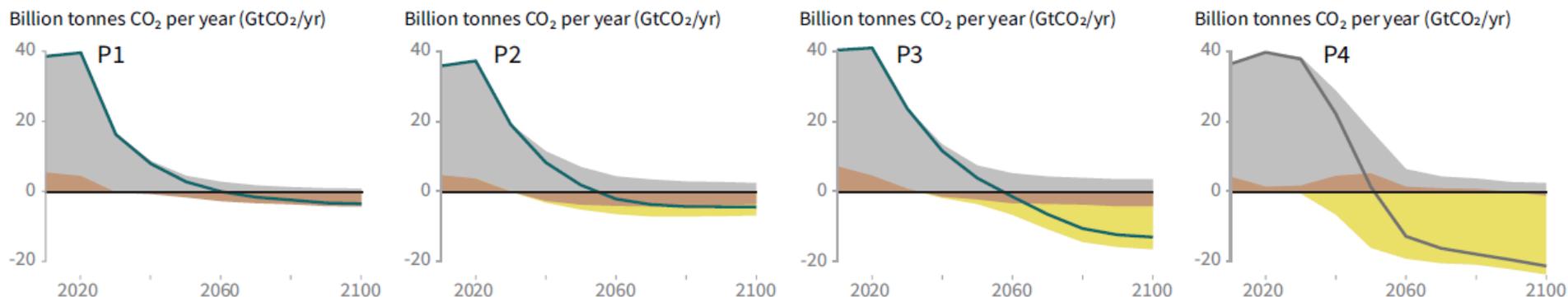
- annulation des émissions de CO₂ en 2050,
- multiplication par 10 des énergies renouvelables,
- augmentation du parc nucléaire (d'un facteur 2 à 5),
- reforestation,
- développement des technologies de captures du CO₂.

Commentaires :

- Ce qui attire l'attention, c'est l'importance des changements nécessaires sur un laps de temps assez court.
- la consommation finale d'énergie à l'échelle du monde n'est pas abordée comme une variable d'ajustement, elle baisse peu, voire continue d'augmenter dans 3 scénarios sur 4 (« pensée comme une variable non négociable dans un texte de consensus »)
- Pas d'intégration de la portée environnementale des solutions : consommation de ressources non renouvelables (métaux), impacts écosystèmes (mines, forages, etc.)

Breakdown of contributions to global net CO₂ emissions in four illustrative model pathways

● Fossil fuel and industry ● AFOLU ● BECCS

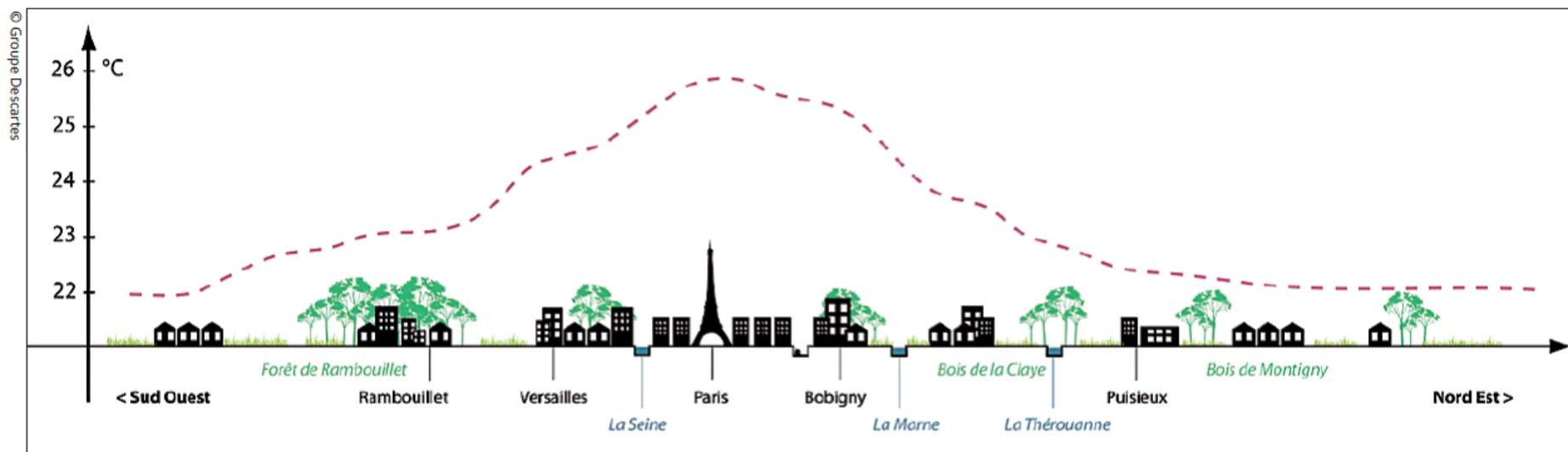


Définition de l'ICU

L'îlot de chaleur urbain désigne une **anomalie climatique** liée à l'**urbanisation**. Elle est **intermittente** et **multi-échelle** (régionale et locale).

L'îlot de chaleur manifeste la difficulté de refroidissement nocturne des villes

Courbe de chaleur 2008



Quand apparaissent les ICU ?

Les ICU nécessitent la conjonction de paramètres météorologiques particuliers.
On parle de conditions « radiatives »

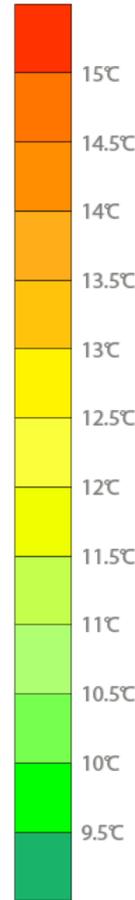
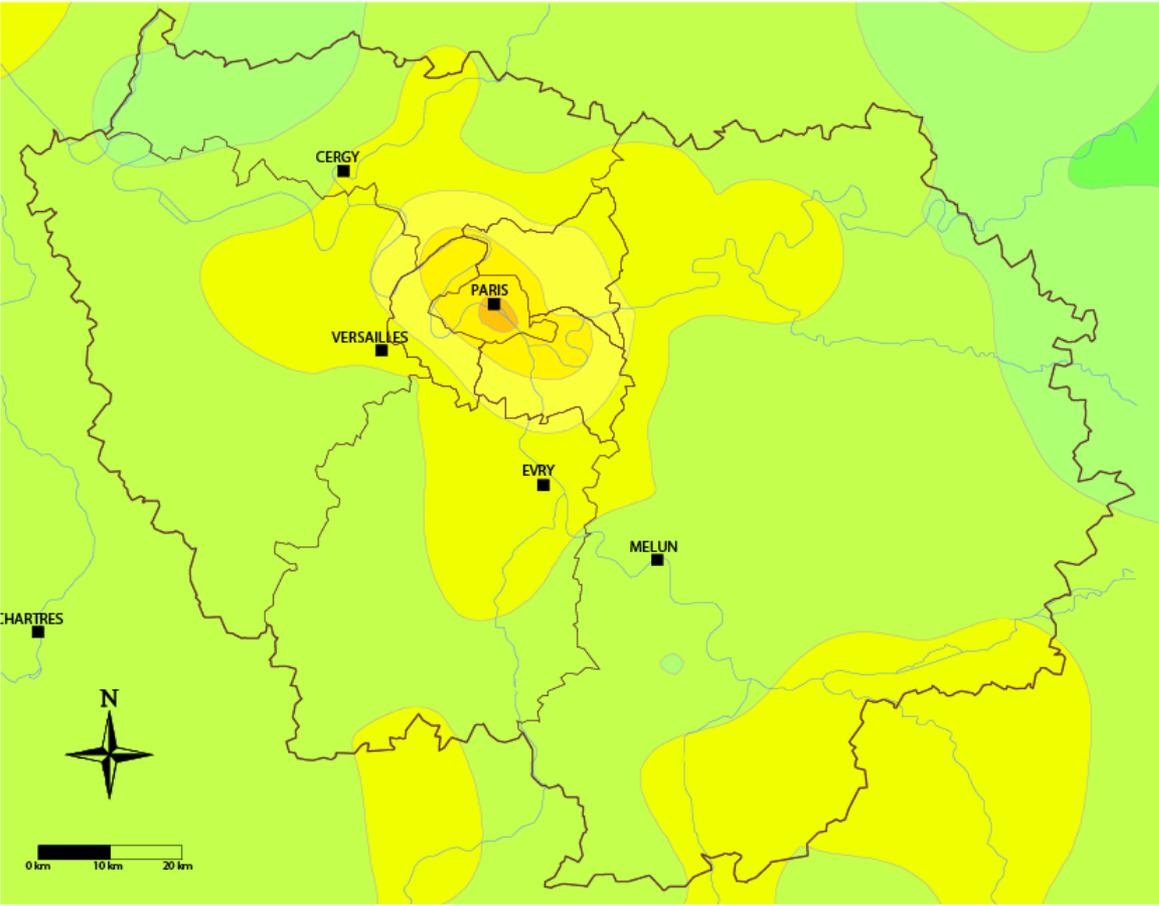


Conditions **défavorables** à l'apparition de l'ICU : vent fort, couverture nuageuse



Conditions **favorables** à l'apparition de l'ICU : absence de vent, ciel dégagé. Ces conditions sont aussi celles favorables aux pics de pollution de l'air.

Un ICU c'est 2,5°C en plus ?

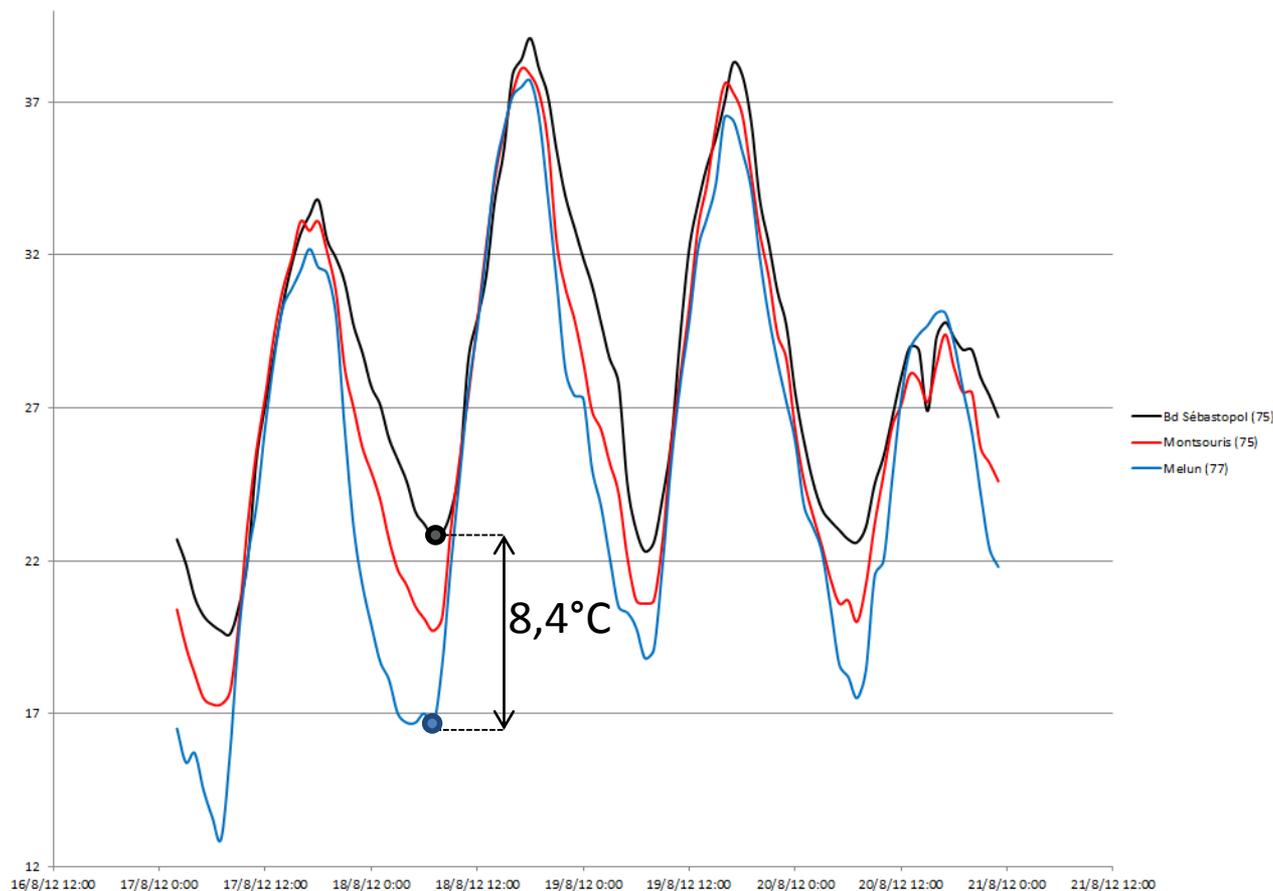


Une différence moyenne annuelle de 2,5°C est constatée entre Paris et les zones rurales de la région Ile-de-France.

← *Température moyenne annuelle à Paris*

← *Température moyenne annuelle les zones rurales de la région Ile-de-France*

Un ICU c'est 2,5°C en plus ?



Un ICU présent la nuit, absent le jour ... c'est sur les températures minimales nocturnes que l'écart se fait sentir

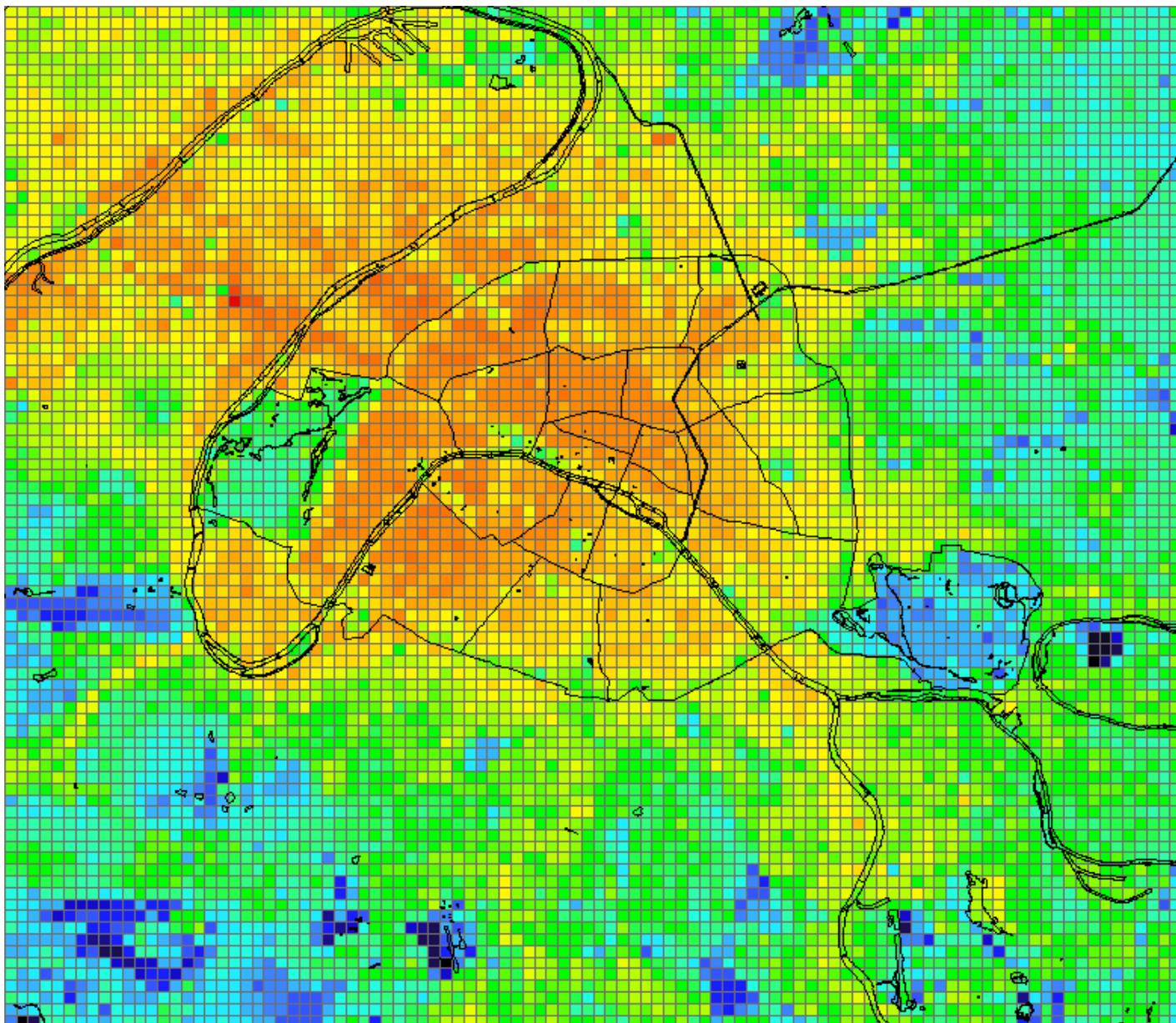
NB : les stations météo des services techniques (ou des amateurs) donnent des informations précieuses. Le maillage du territoire permet d'accroître la connaissance de l'ICU. A l'inverse les stations météo professionnelles sont souvent à l'abri de l'urbanisation et donc échappe partiellement au phénomène d'ICU.

Températures relevées du 18 au 20 aout 2012, sur les stations du Bd Sébastopol (75001), de Montsouris (75014) et de Melun (77)

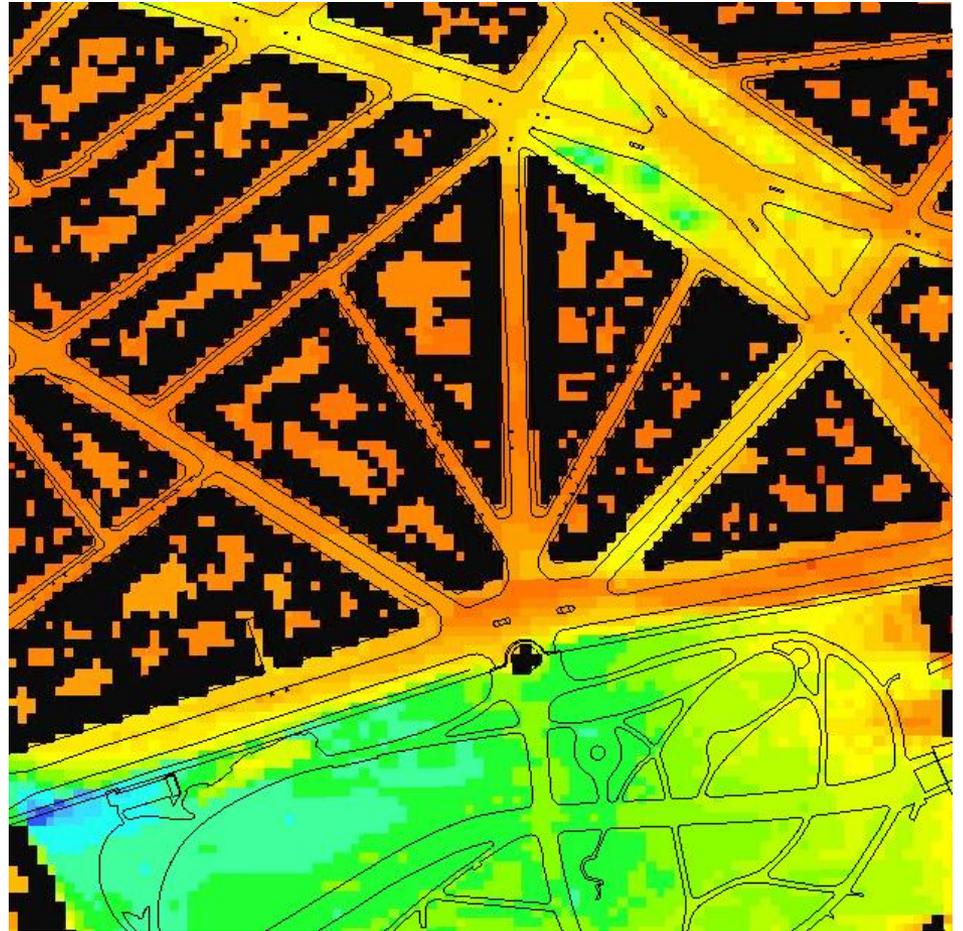
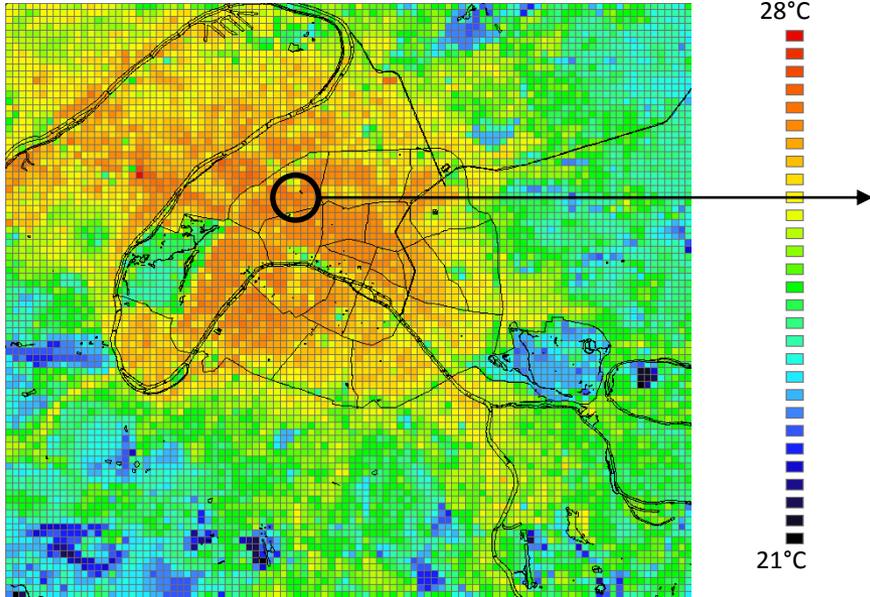
A quoi ressemble un ICU (nuit) à grande échelle :

Température à 2m du sol le
10 aout 2003 à 6h du
matin (4h UTC).

Les zones les plus fraîches
sont les plus végétalisées,
on notera qu'à ce moment
l'ICU se décale vers le
Nord-Ouest en raison de la
brise thermique dominante.



A quoi ressemble un ICU (nuit) à petite échelle:

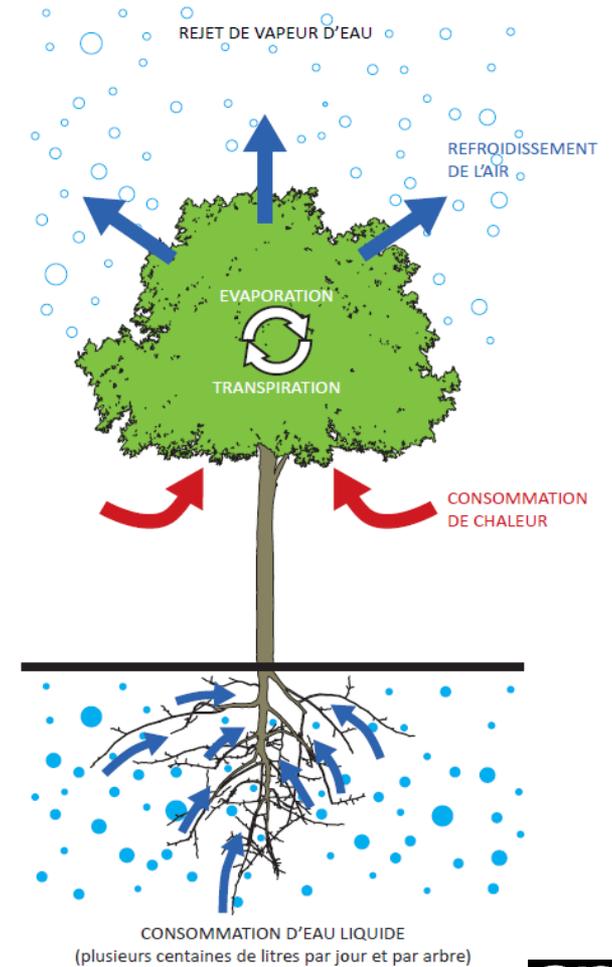
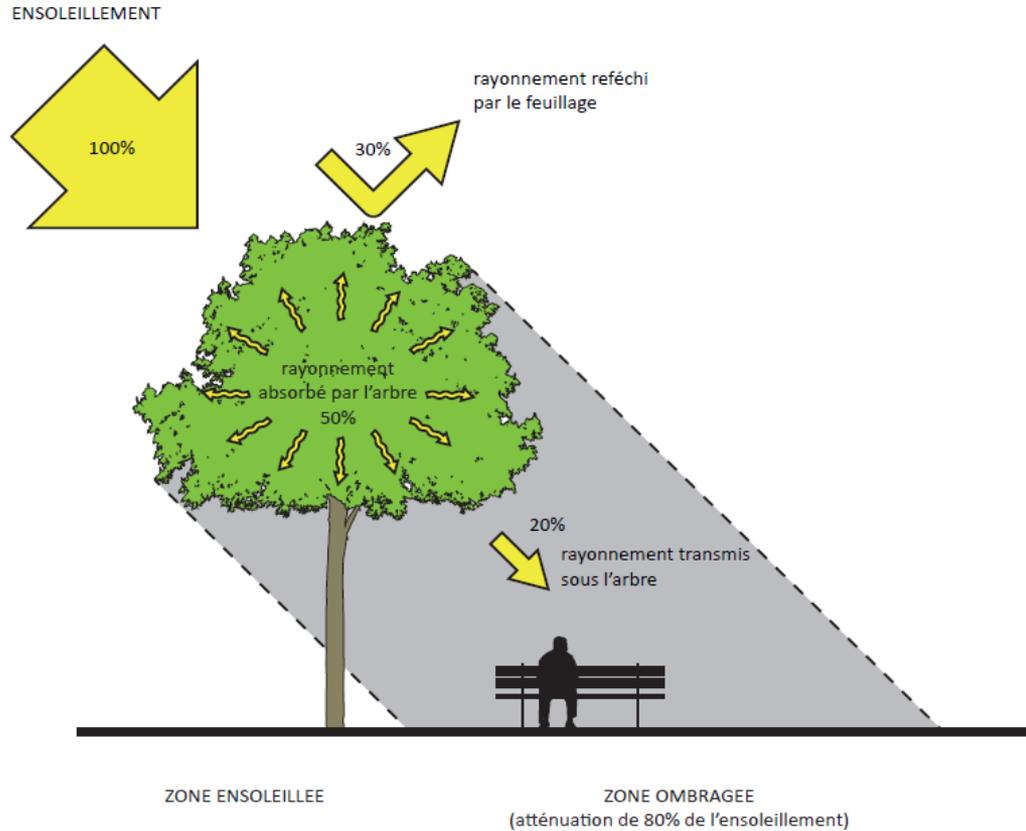


Parc Monceau (17^e) Confort thermique Nocturne

*(NB : on précisera la différence entre température à 2m du sol
et confort thermique)*

Rôle de la végétation

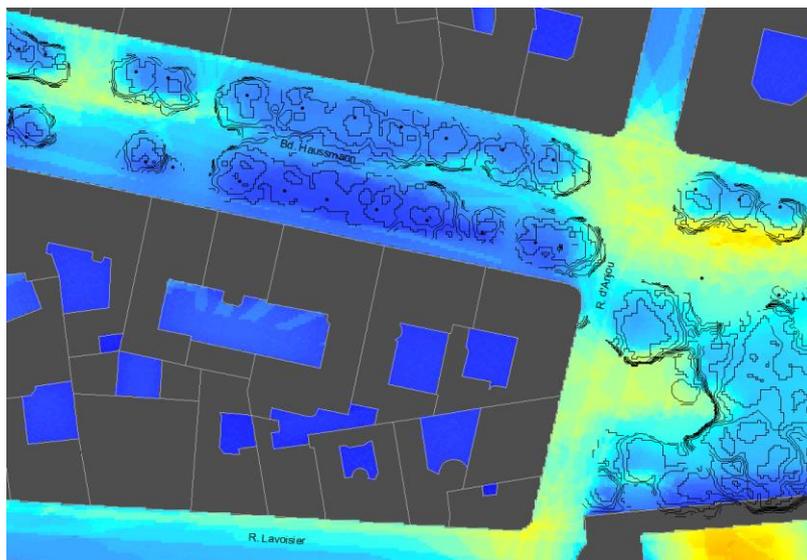
Végétation : évaporation, ombrage



Rôle de la végétation

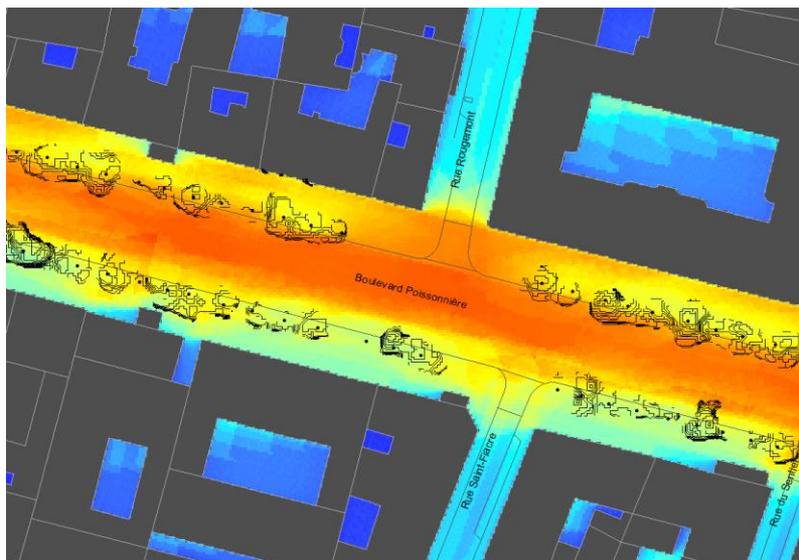
Exemple d'investigation de jour : la simulation du confort climatique

Alignement de Platanes (Bd Haussmann 9e)



Alignement dense de platanes Bb Haussmann (9^e). L'espace public est bien protégé par les arbres toute la journée.

Alignement de sophoras (Bd Poissonnière 10e)



Alignement de sophoras Bd Poissonnière (10^e). L'espace public est mal protégé par des sophoras car leur feuillage est trop clairsemé.

Température ressentie en moyenne journalière un 21 juin

60°C



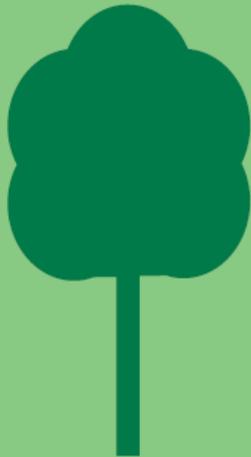
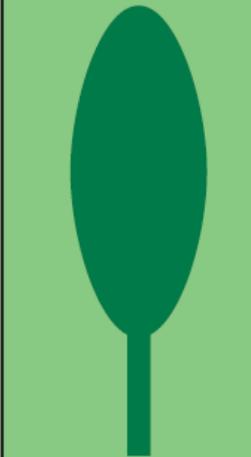
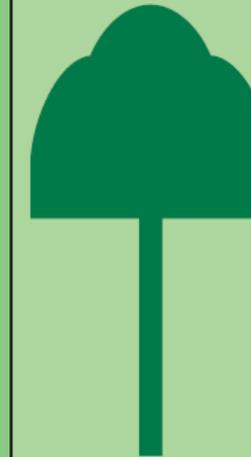
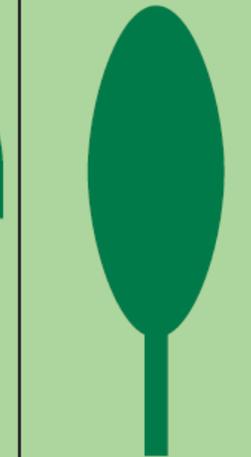
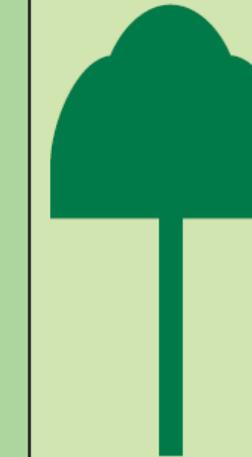
33°C

Rôle de la végétation

Le choix d'essences d'arbres d'alignement influence le climat urbain.

Doivent être pris en compte :

- Opacité du feuillage
- Volumétrie de la canopée
- Résistance aux épisodes de stress hydriques
- Etc.

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

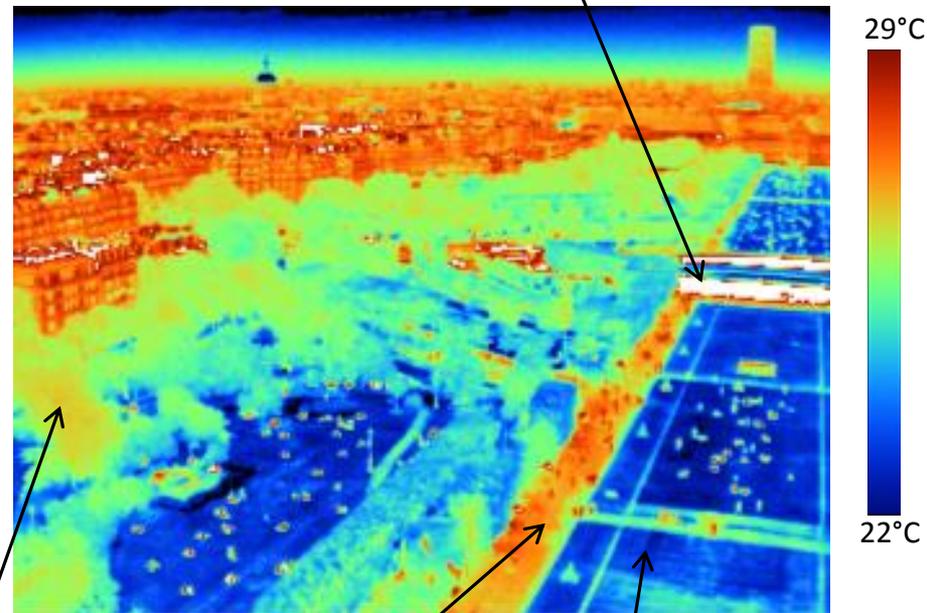
Rôle de la végétation

Exemple d'investigation en fin de journée : la thermographie



Vue aérienne du Champs de Mars prises le 2 août 2011 vers 20h (18h UTC) peu après le coucher du soleil.

La canopée des arbres possède encore la marque de l'irradiation solaire, de la journée.



Les revêtements bitumineux ont abondamment stocké de l'énergie solaire en cours de journée, ils resteront à des niveaux de températures élevés une partie de la nuit.

Les circulations piétonnes en « stabilisé » viennent juste de passer à l'ombre, leur niveau de température, encore élevée, s'estompera rapidement au fil des heures

La pelouse apparaît déjà très fraîche, l'ensoleillement subi dans la journée n'a pas été stocké par le végétal.

Rôle de la végétation

Importance de la **végétation diffuse** (pieds d'immeubles, végétalisation verticale, etc.)...

A Paris, la végétalisation verticale est très développée sur cours mais très peu sur rue.

Ainsi 95% des 30ha de végétation verticale à Paris est situé dans les cours....

Voir étude « ANR écoville ».



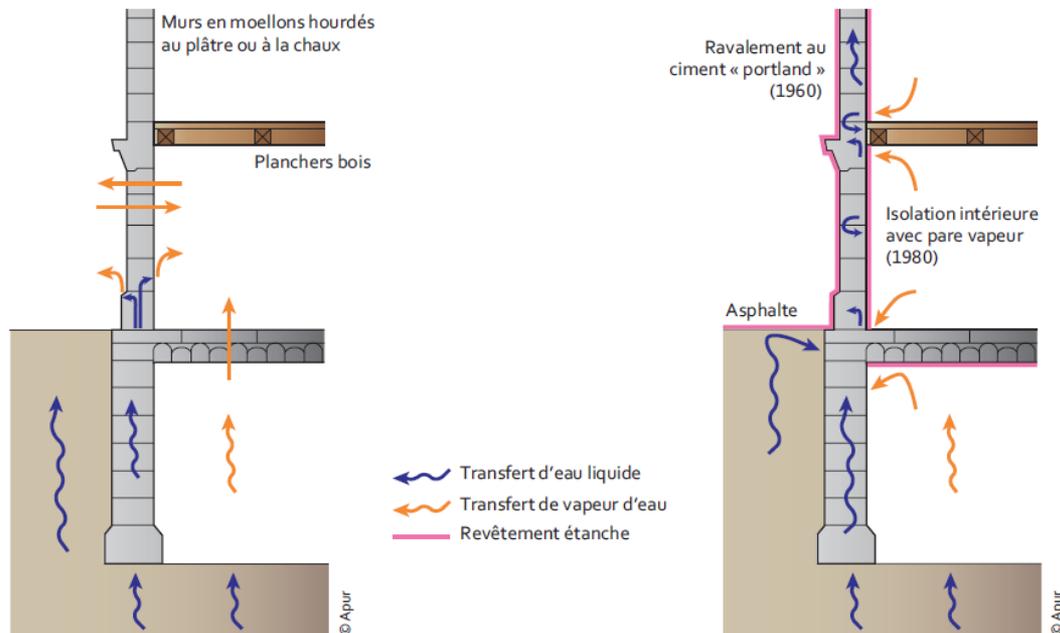
Rôle de la végétation

2 types de frein au développement du végétal associé au bâti chez les copropriétés parisiennes:

- Question patrimoniale : pourtant à Paris c'est dans les quartiers historiques qu'on en trouve le plus
- Question des pathologies : généralement infondée à l'inverse des réhabilitations hasardeuses engagées depuis 50 ans dans le bâti ancien qui participent à son étanchéification (ciments Portland, peintures pliolite, pares-vapeur, etc.)



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.

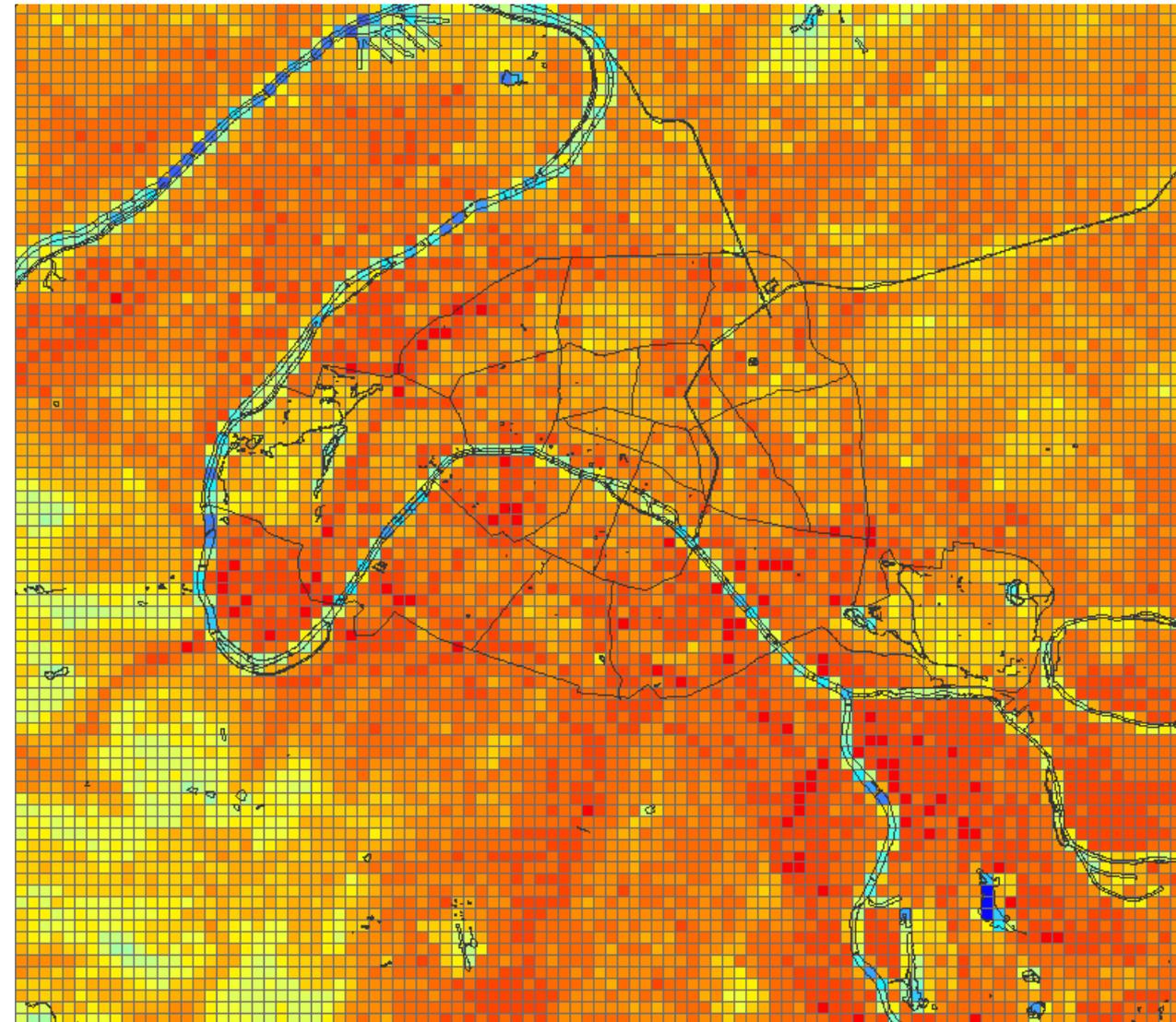
Rue du parc royal (75003)
Hiver 2015

Rue du parc royal (75003)
Printemps 2015

Rôle de l'eau

Eau : seine, canaux, fontaines, bassin, arrosage, etc.

Les seuls lieux frais en journée caniculaire sont proches de la Seine



35°C

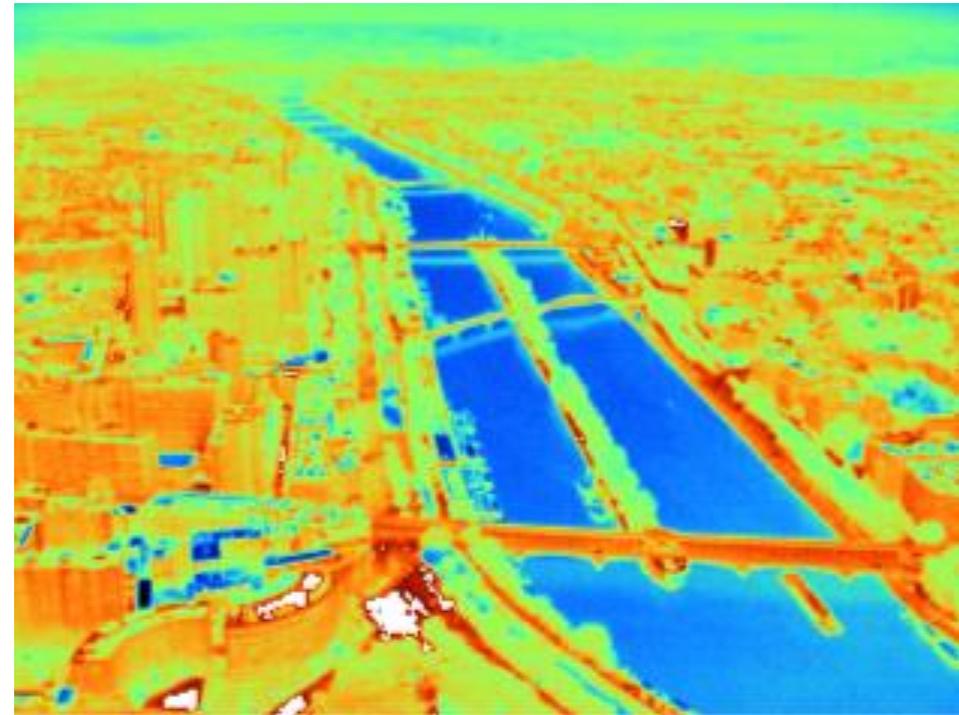


28°C

*Moyenne diurne de la
température de l'air à 2m
du 9 au 12 août 2003
Source : EPICEA (2012)*

Rôle de l'eau

Eau : seine, canaux, fontaines, bassin, arrosage, etc.



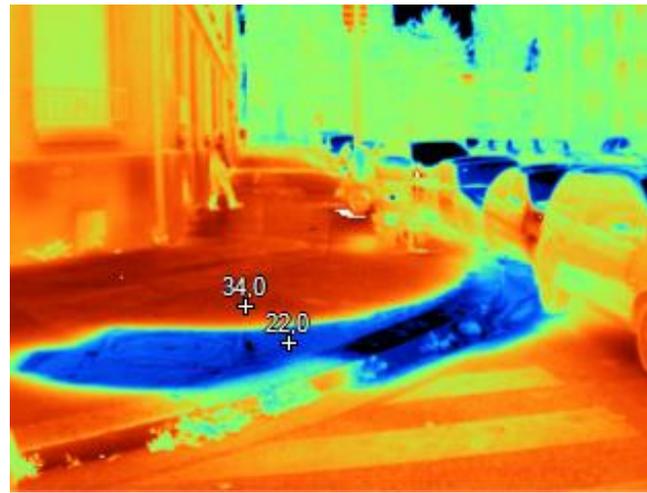
La Seine

29°C  20°C

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

Rôle de l'eau

Eau : seine, canaux, fontaines, bassin, arrosage, etc.

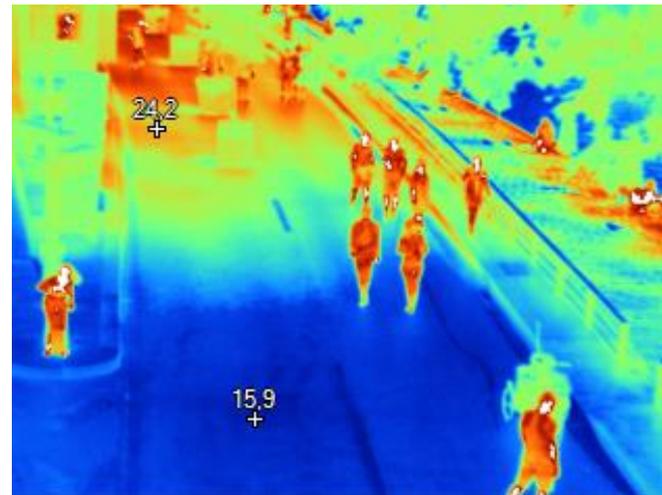
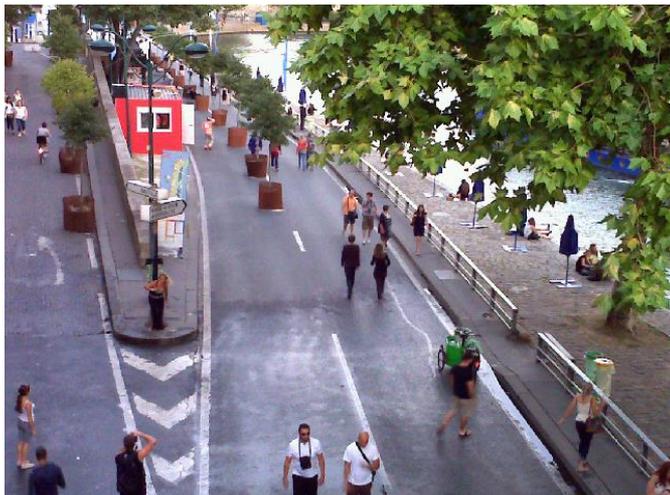


35°C



20°C

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



29°C



15°C

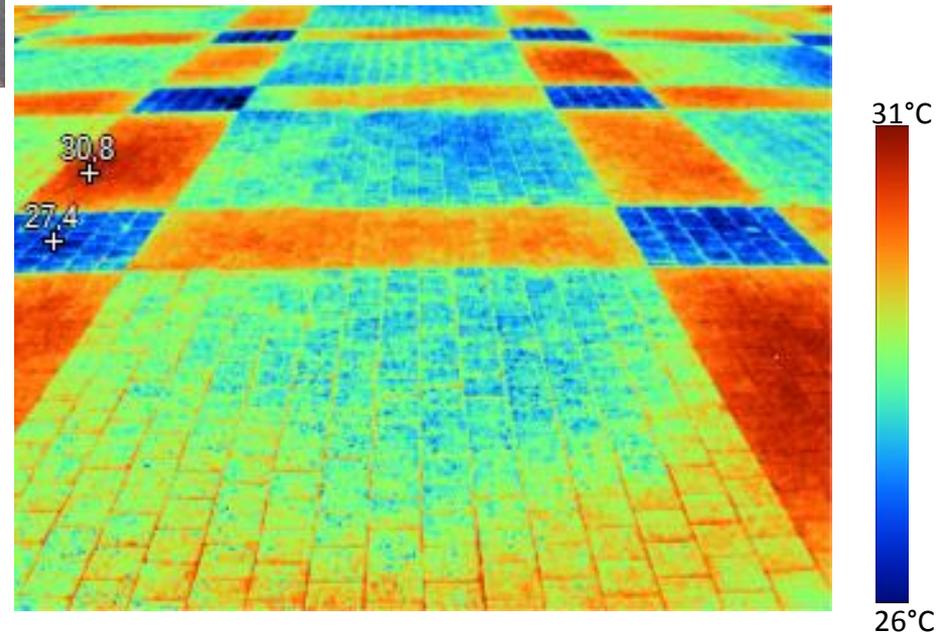
Port des Célestins le 31 juillet 2011 à 21h30 : effet de refroidissement après aspersion de la chaussée. La température de la chaussée chute d'une dizaine de degrés.

Les matériaux de l'espace public comme facteurs d'influence du climat



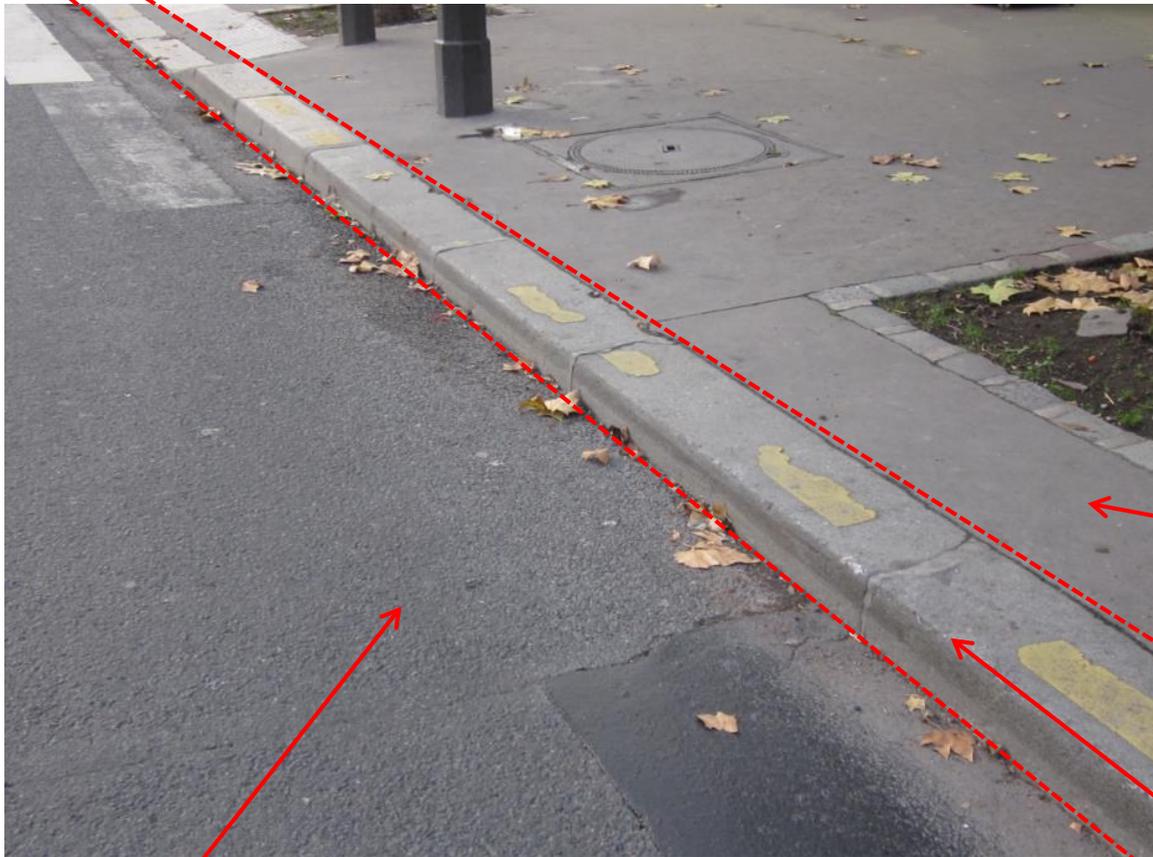
Signature radiative nocturne d'une composition de revêtement de sol à la ZAC de la Grange-aux-belles.

La couleur et la rugosité sont les propriétés physiques en jeu dans la réflexion solaire



Revêtements de l'espace public couramment employés à Paris

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



Chaussée en béton
bitumineux noir (ou
« enrobé »)

Le cas le plus fréquent rencontré à Paris est composé :

- D'une chaussée en « enrobé »,
- D'une bordure en granit marquant la séparation entre la chaussée et le trottoir,
- D'un trottoir en asphalte.

Trottoir en
asphalte

Bordure en granit

Matériaux de l'espace public parisien



Pavé de grès



Usages

*Quais.
Abords des monuments historiques*



*Stabilisé et
Béton désactivé*



*Espaces verts.
Quais.
NB : Le « stabilisé » et le « béton désactivé » ont des aspects assez similaires. Leurs propriétés mécaniques sont cependant différentes. De plus, le premier est perméable alors que le second est imperméable.*

Autres matériaux couramment rencontrés sur l'espace public parisien



Dalle de granit



Quartiers historiques



Pavé de granit scié



Voies piétonnes

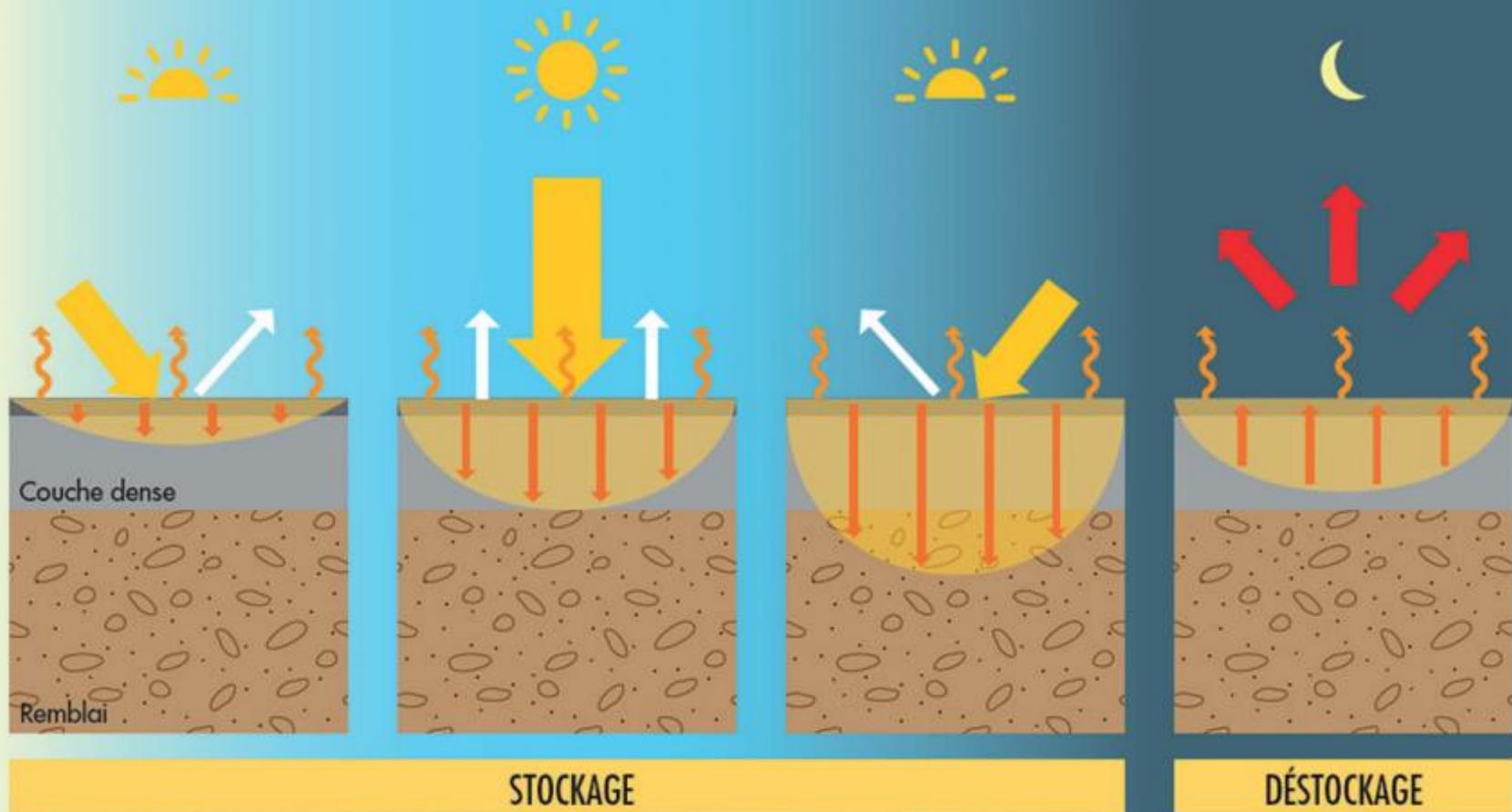


Pavé de granit



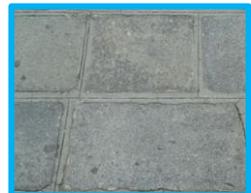
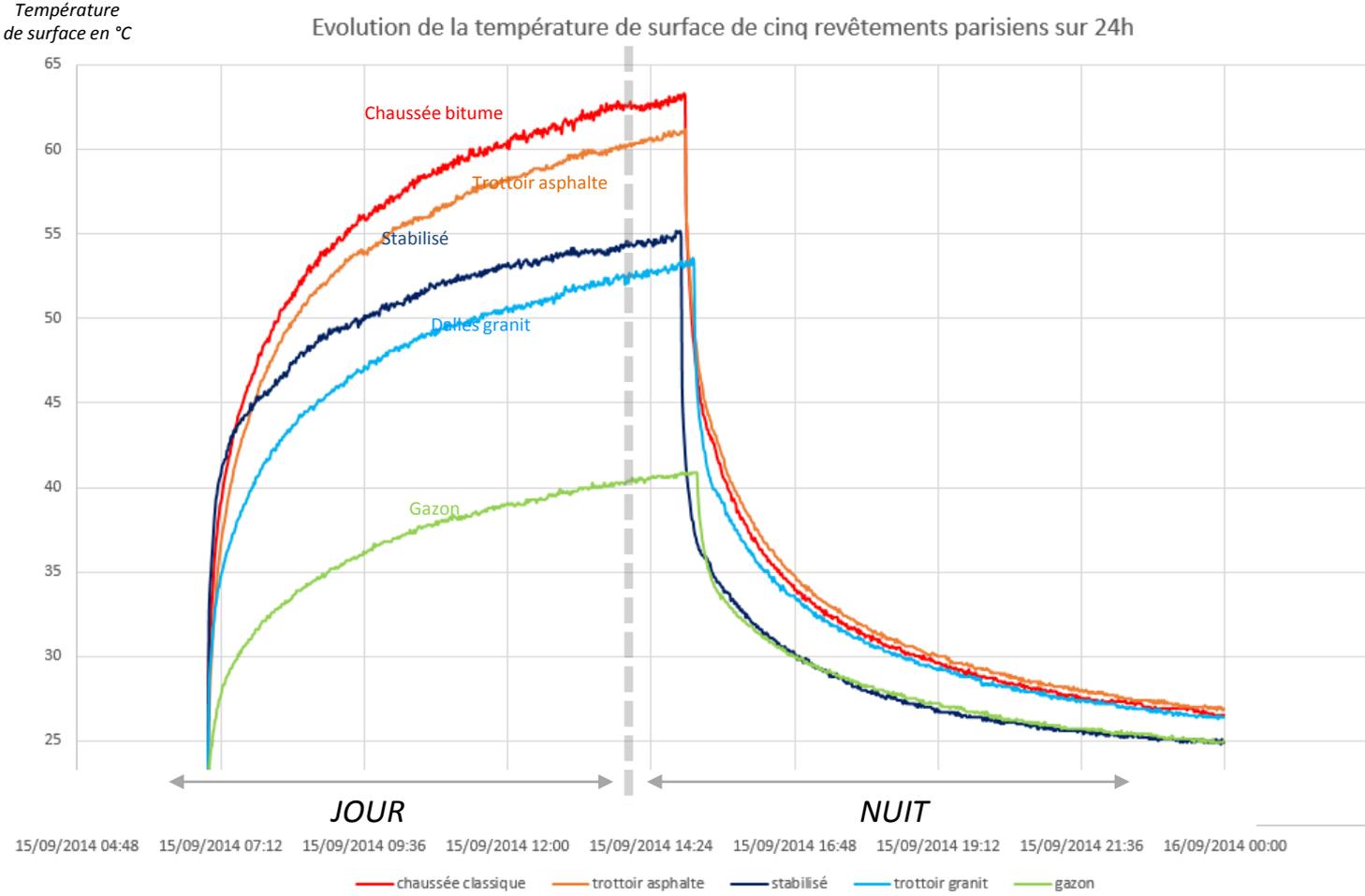
Très employés depuis le milieu du XIXe s. sur les chaussées parisiennes. Il tend à disparaître au profit de l'enrobé en raison du bruit qu'il induit avec la circulation automobile

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

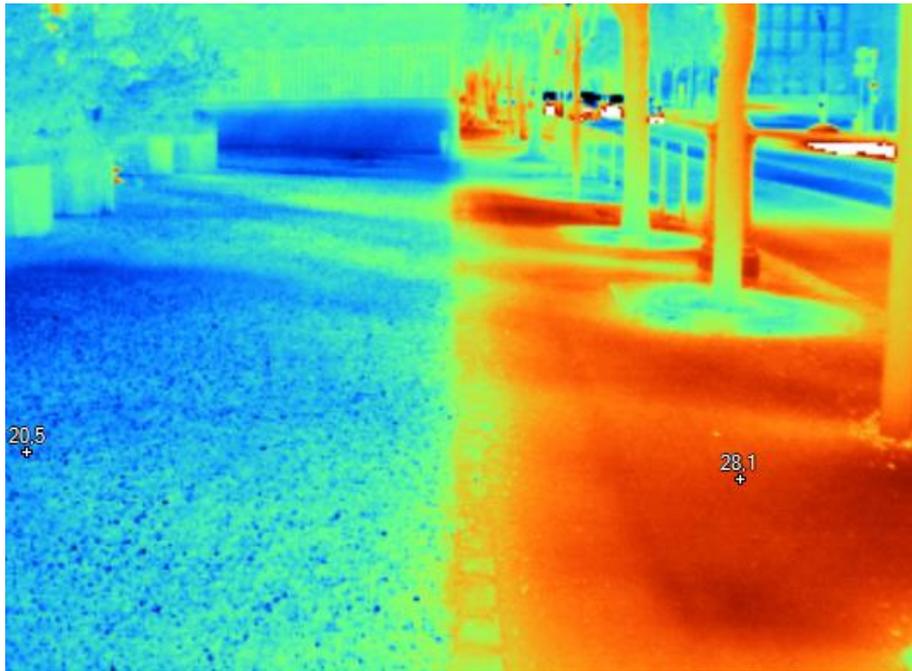


-  Insolation
-  Reflexion solaire
-  Échauffement de l'air (convection)
-  Rayonnement infra-rouge du sol
-  Transport de chaleur dans le sol (conduction)
-  Énergie emmagasinée dans le sol

Matériaux de l'espace public parisien : expérimentation en laboratoire



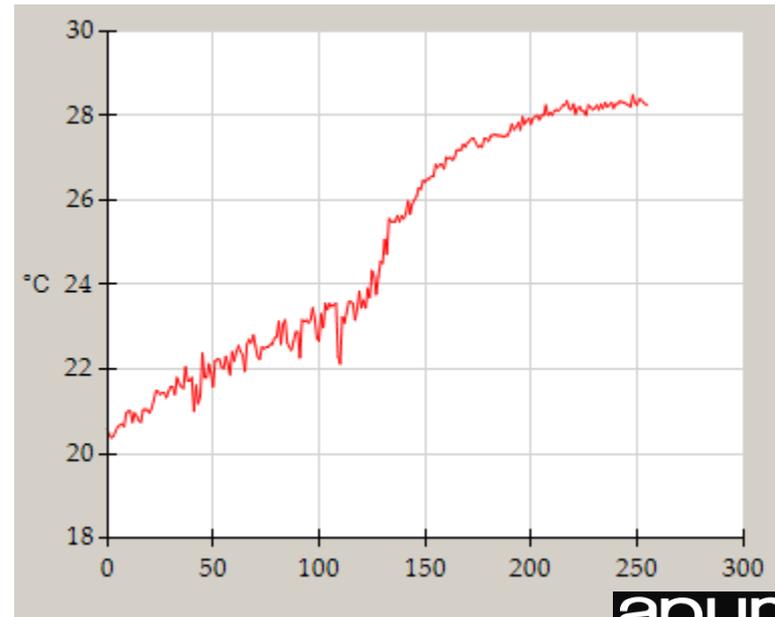
Matériaux de l'espace public parisien: thermographie



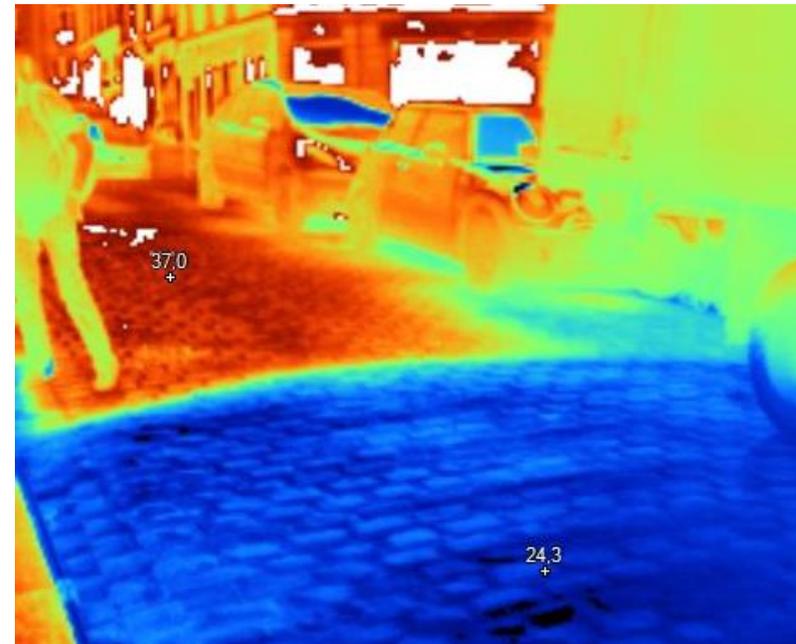
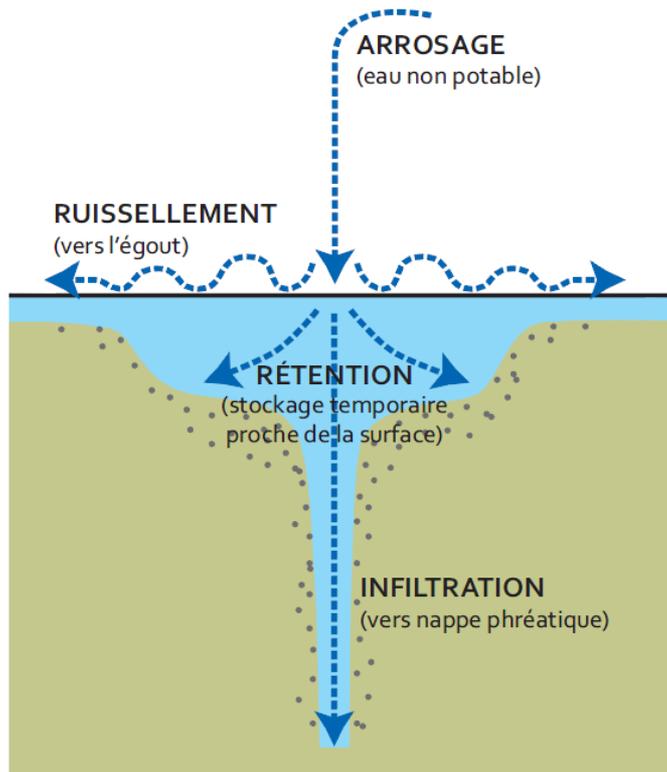
Comparaison de deux revêtements (gravier et asphalte) une heure après le coucher du soleil le 31 juillet 2011.



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



Matériaux de l'espace public parisien : expérimentation in-situ (station de mesure)



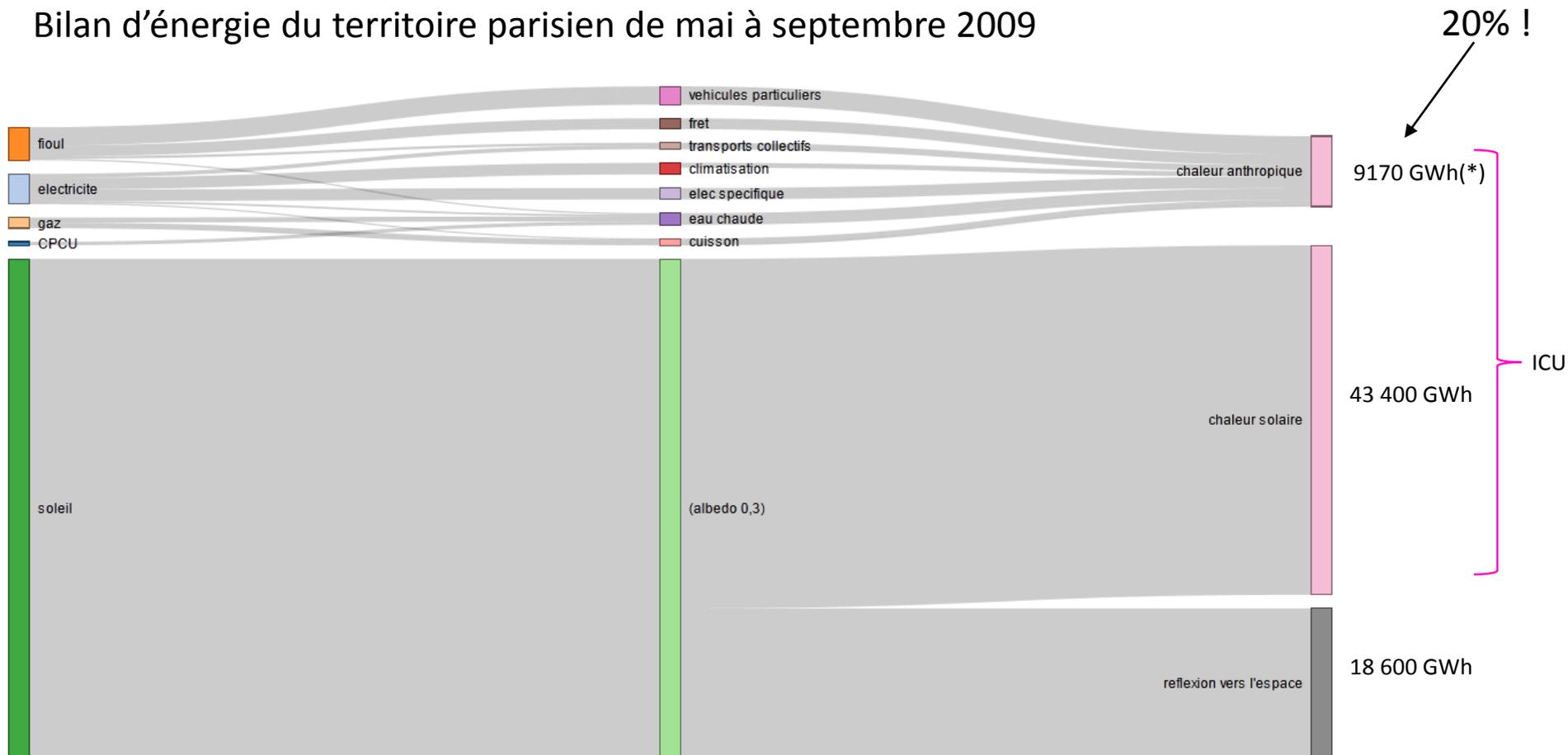
Expérimentation d'arrosage en journée menée rue Lesage (20^e) durant l'été 2013 grâce à un branchement réalisé sur une bouche de lavage du réseau d'eau non potable

Clichés pris à 17h (UTC)

Chaleur anthropique

Activités humaines

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



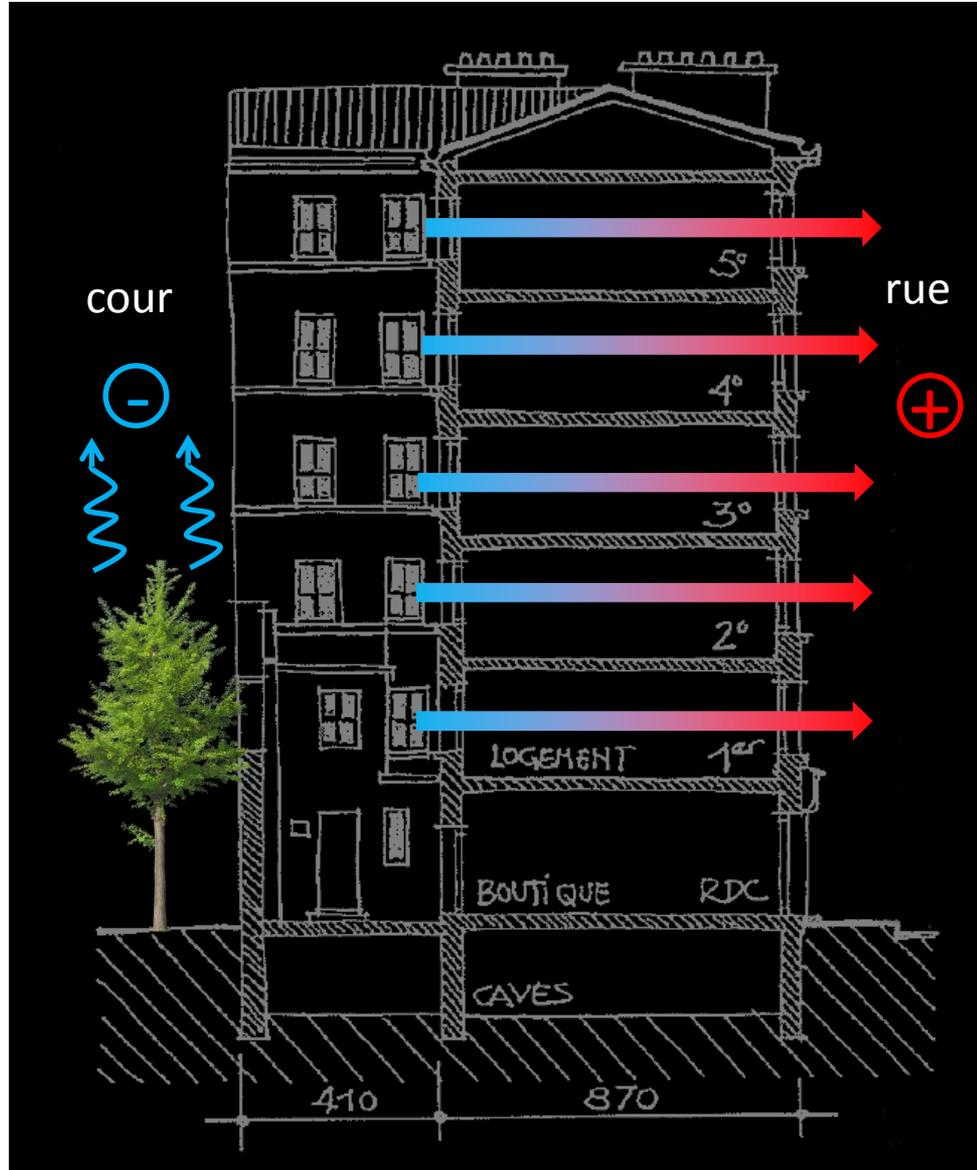
Source : CEREN (2011)

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

Chaleur anthropique

Chasser les consommations d'énergies à « rétroactions positives » :
climatisation

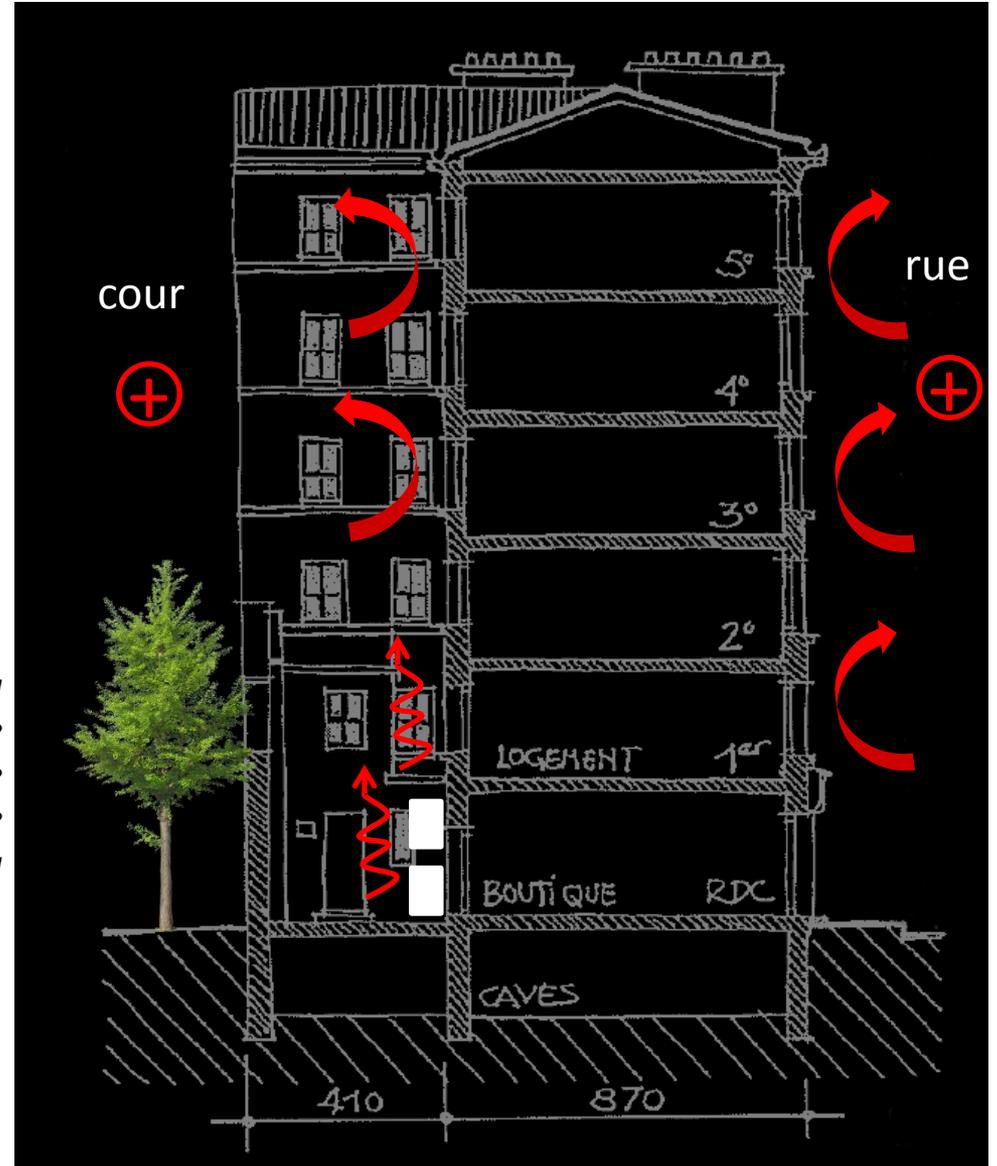
Ventilation nocturne naturelle d'une cour du XIXe s. permettant un rafraîchissement efficace des appartements. La ventilation est amorcée grâce à une différence de température entre la cour et la rue.



Chaleur anthropique

Chasser les consommations d'énergies à « rétroactions positives » :
climatisation

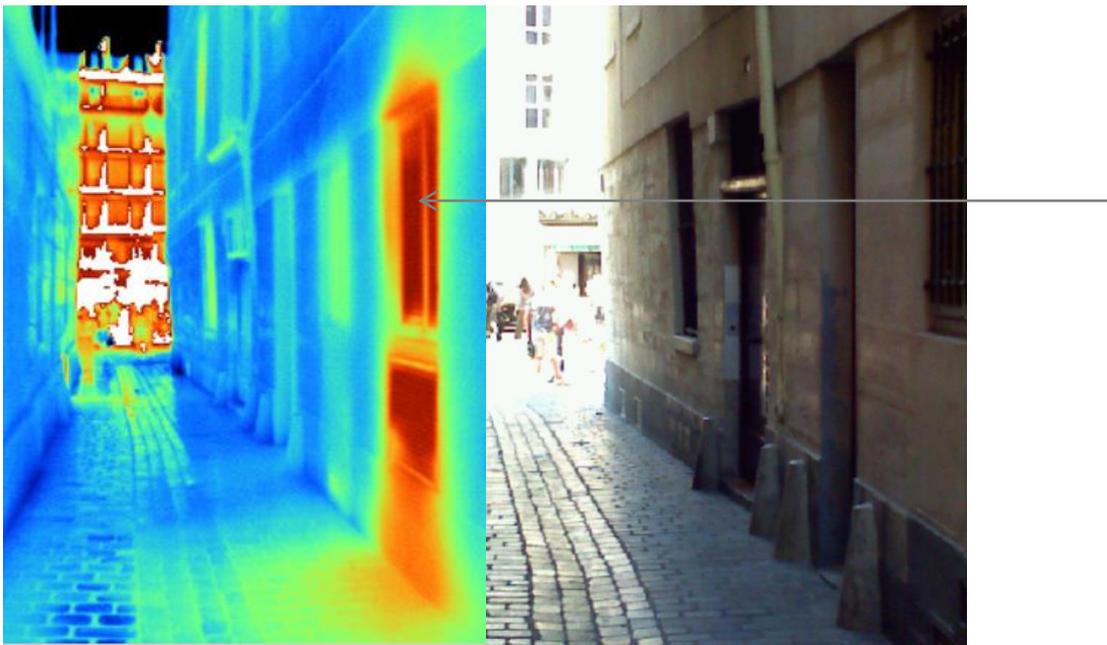
L'ajout de climatiseurs sur la cour par la boutique compromet, voire annule, cette ventilation car la différence de température entre la cour et la rue disparaît.



Chaleur anthropique

Chasser les consommations d'énergies à « rétroactions positives » : climatisation

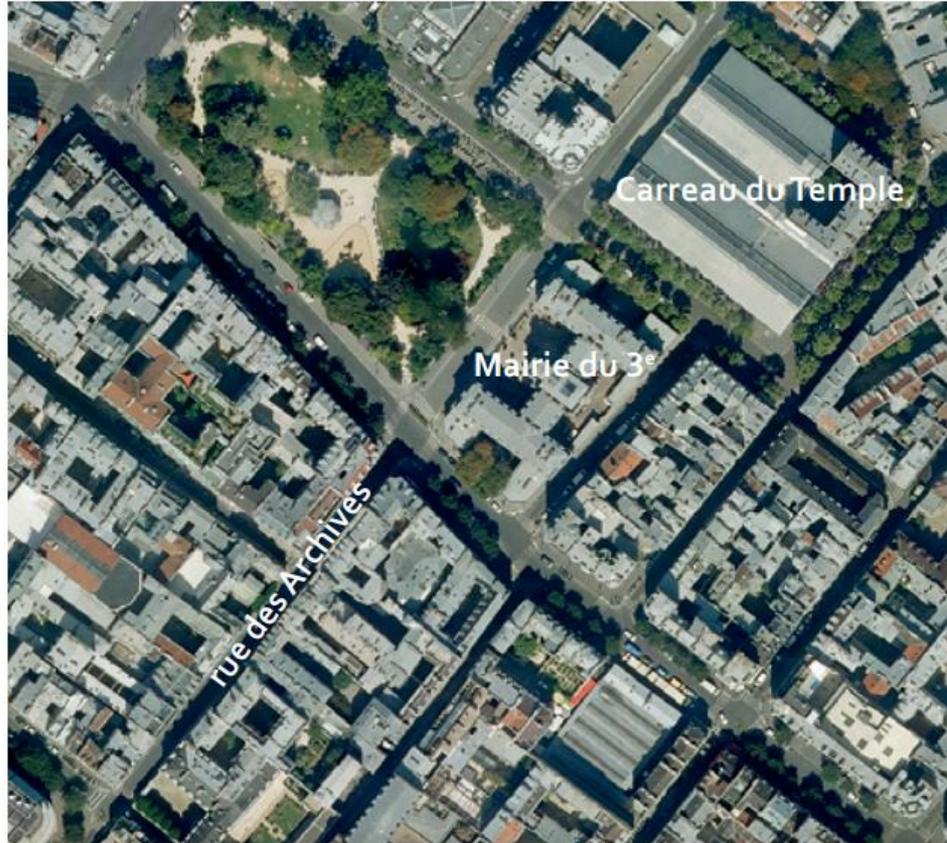
Les rues étroites du Marais sont peu exposées au soleil durant la journée, elles sont plus fraîches que les grands axes, comme la rue de Rivoli (en arrière plan sur l'image). La fraîcheur qui émane des caves participe aussi à la fraîcheur de ces rues étroites.



Notons que la climatisation des restaurants agit ici comme « pollution thermique » en réchauffant ponctuellement la rue

Chaleur anthropique

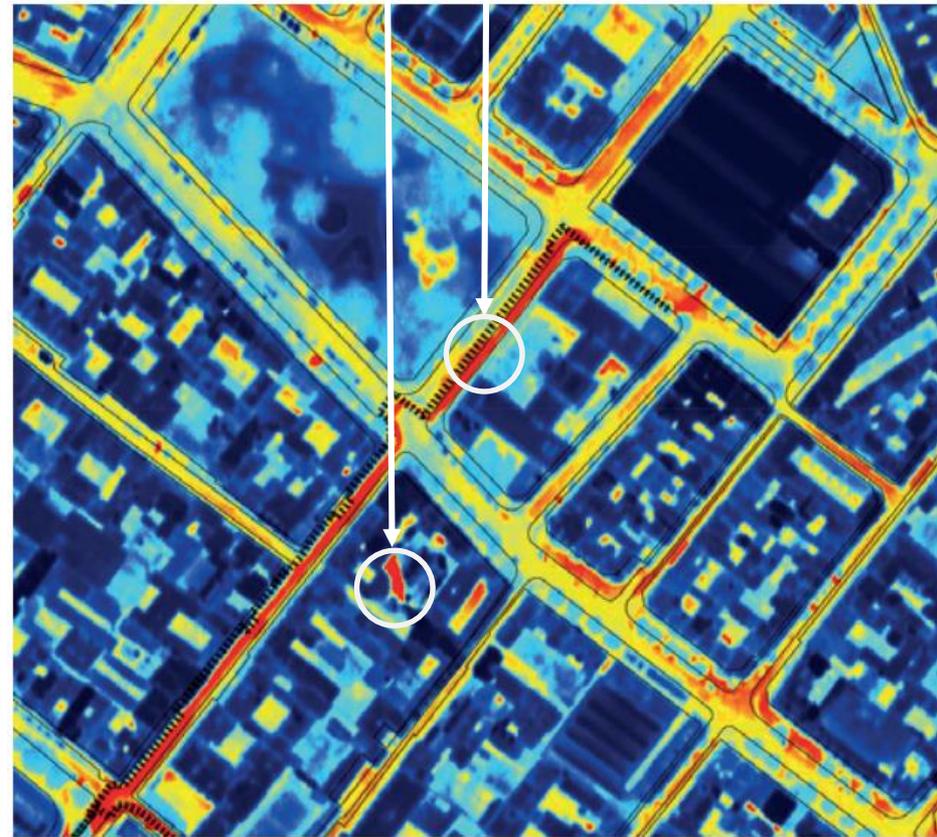
Rue des Archives (Paris 3^e)



Orthophoto de 2012

Climatisation

Réseau de chaleur



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

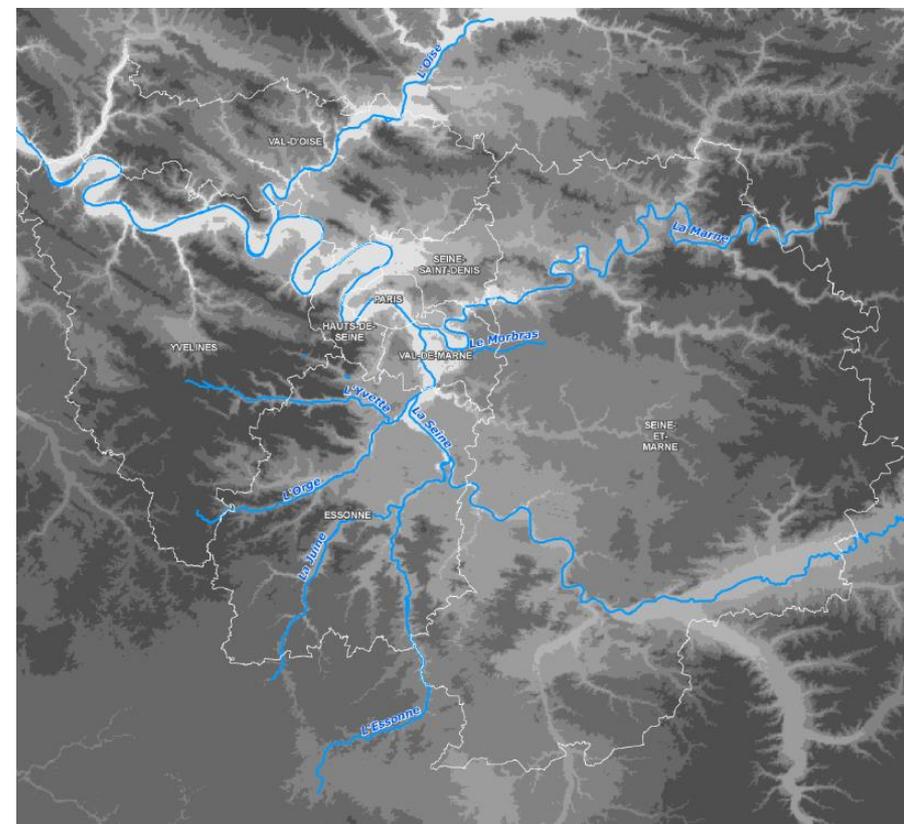
Brises thermiques : explication du phénomène

De quoi s'agit-il :

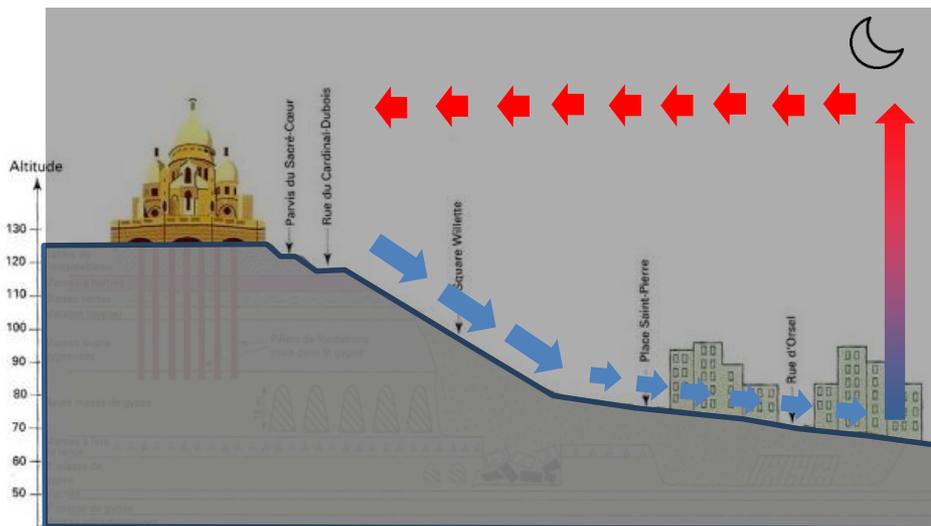
En période estivale, la nuit, lorsque le ciel est dégagé et que l'on constate une absence de vent, des phénomènes de vents locaux apparaissent, ils jouent un rôle dans le **confort thermique** et la **répartition de la pollution**. Leur présence fait baisser localement la sensation caniculaire et améliore la dispersion de la pollution

A l'échelle régionale, les brises suivent le réseau hydrographique de l'amont vers l'aval.

A l'échelle des quartiers, les secteurs en pente accueillent des brises thermiques dont l'importance est proportionnelle à la pente. Ces brises sont observées si les rues sont dans le sens de la pente.



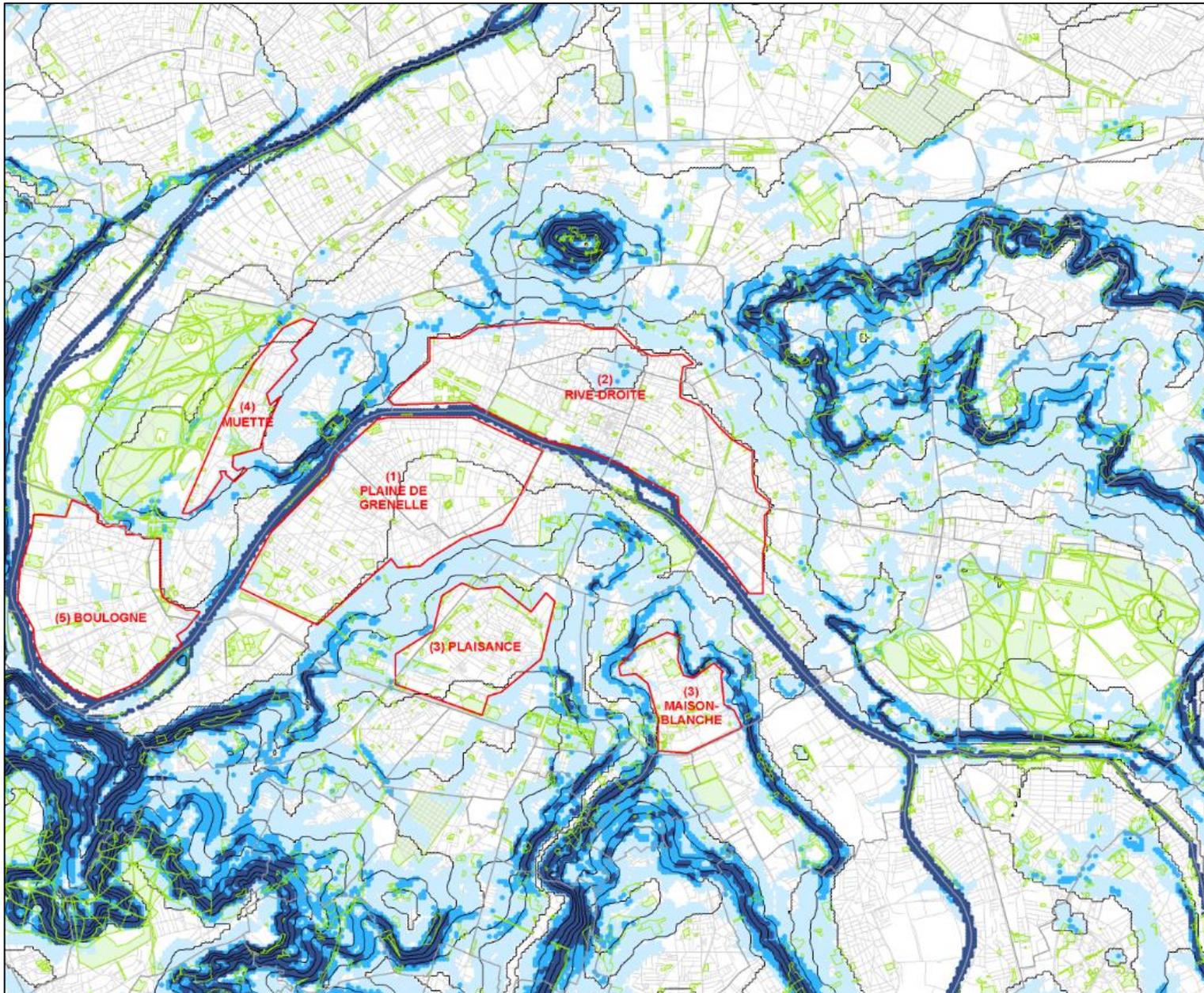
Principaux cours d'eau d'Ile de France.



Brises thermiques : écoulement nocturne de l'air selon le sens de la pente.

Aux alentours de 10km/h, ces brises améliorent notablement le confort thermique du piéton.

Brises thermiques : cartographie parisienne



BRISES THERMIQUES PARISIENNES

Intensité de la
brise thermique :

- nulle
- légère
- moyenne
- élevée

■ espaces verts

— courbes de niveau
tous les 10m

□ périmètres étudiés

Source : APUR

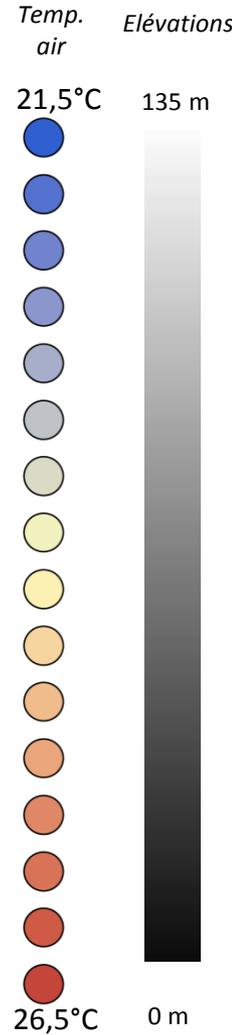
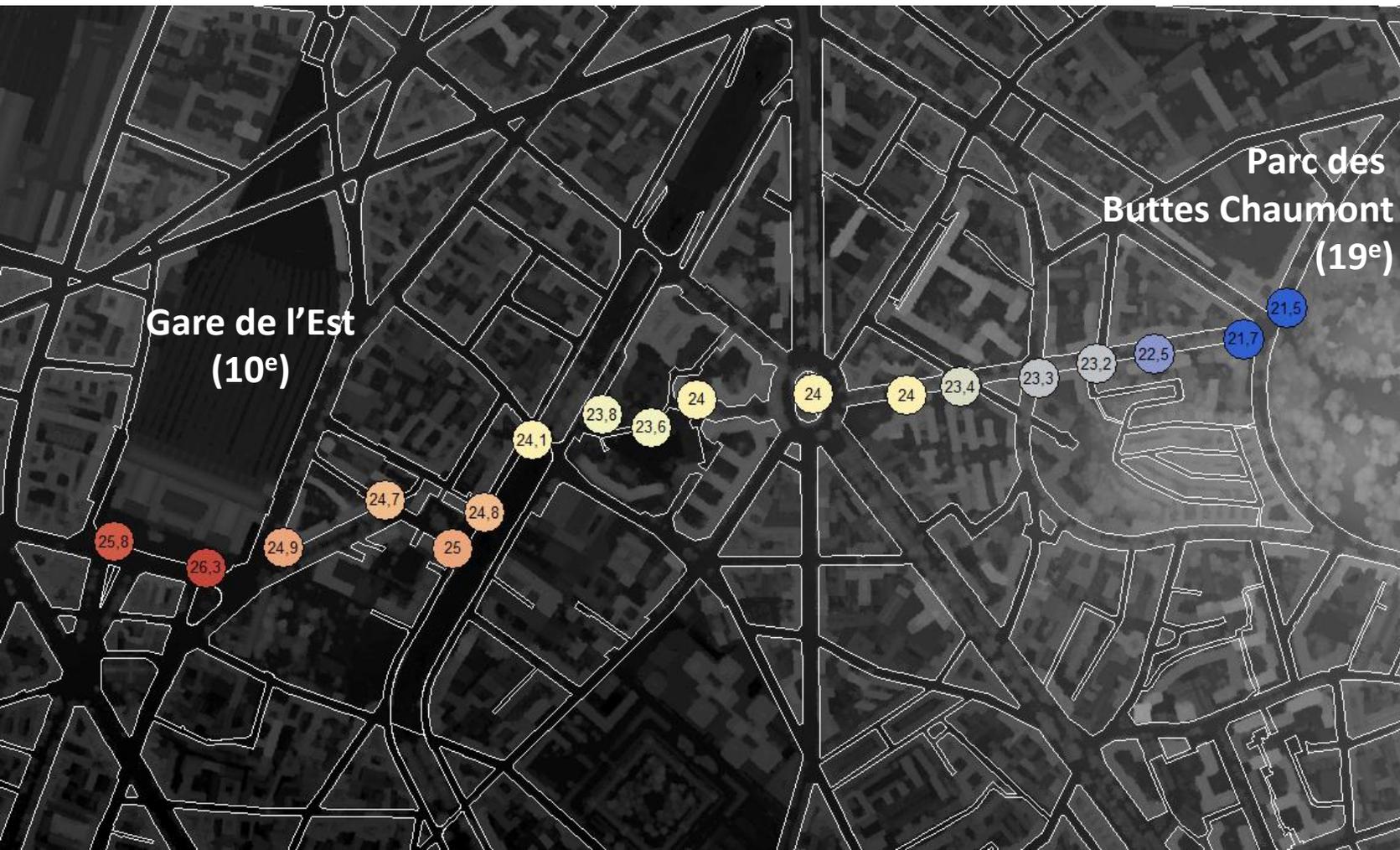
0 1 km



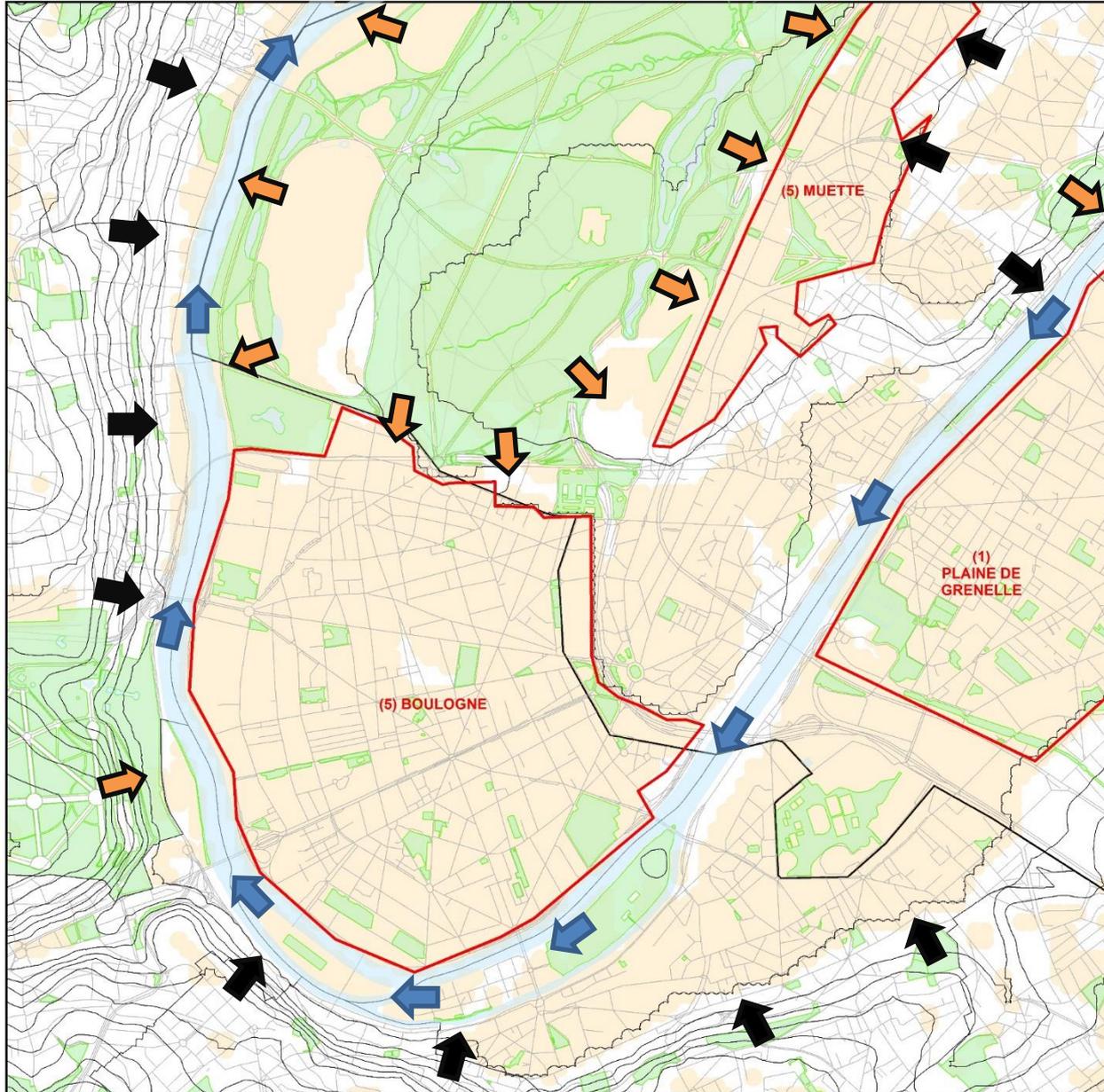
Rôle des brises

Végétation & brises thermiques

Mesures de températures de l'air relevées entre la gare l'Est et le parc des Buttes Chaumont le 1 aout 2011 vers 22h (20h UTC).



Brises thermiques : secteur de la porte de Saint-Cloud



BRISES THERMIQUES ET POLLUTION DE L'AIR AUX ENVIRONS DE LA PORTE DE SAINT-CLOUD

 Zones de stagnation et d'accumulation
de l'air chaud et pollué

Brises thermiques :

-  Brise de pente
-  Brise générée par un espace vert
-  Brise canalisée par le lit de la Seine

Adaptation

Mesures d'adaptation

- *Végétaliser (végétation diffuse entre autres)*
- *Arroser (usage eau non potable)*
- *Repenser les matériaux d'espace public*
- *Sobriété énergétique*
- *Chasser les consommations d'énergies à « rétroactions positives » (circulation automobile, climatisation, etc.)*
- *Exploiter la fraîcheur du sous-sol (tunnels ferroviaires désaffectés, parking, etc.)*
- *Prendre en compte les qualités estivales du bâti existant*
- *Etc...*

Quelques exemples couramment rencontrés

→ substitution de matériaux trottoirs : stabilisé, pavés engazonnés



Pavés engazonnés

Stabilisé



→ usage de bétons drainants, chaussées stockantes

→ substitution de matériaux de chaussées : emploi de pavés posés « à l'ancienne » avec joints perméables permettant infiltration et stockage de l'eau dans le lit de sable

Pavés sur lit de sable



→ arrosage diurne avec de l'eau non potable (de préférence sur revêtements perméables)



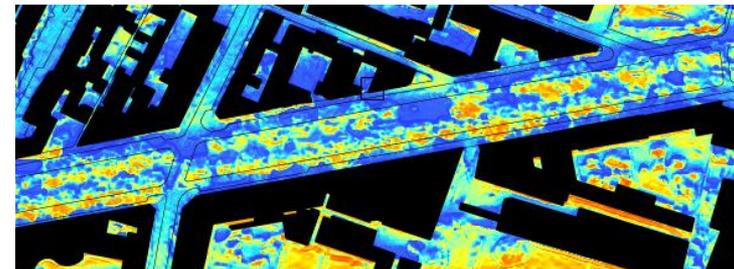
→ création de noues

→ protéger l'espace public de l'insolation : plantations / ombrières

→ végétaliser le bâti, développer la végétation diffuse

→ limiter les rejets anthropiques de chaleur

(climatisation, réseaux chaleur, véhicules, etc.)

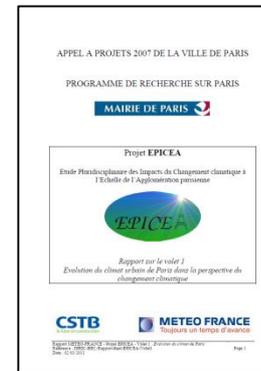


Plantations protégeant l'espace public. Ensoleillement cumulé du 19/08/2015.

Bibliographie (APUR)

2007-2012 : « EPICEA »

*projet de recherche financé par la ville de Paris
(Météo-France / CSTB / APUR)*



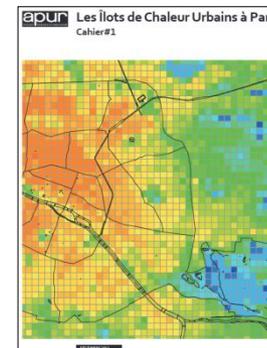
EPICEA : Etude Pluridisciplinaire
des Impacts du Changement
climatique à l'Echelle de
l'Agglomération Parisienne

Parution octobre 2012

2011-2012 : Les Îlots de Chaleur Urbains à Paris.

Cahier #1 : Diagnostic (APUR)

- Enseignements EPICEA,
- Relevés de température (station météo, mesure à pieds, thermographie),
- Explication du phénomène à micro échelle,
- Etc...

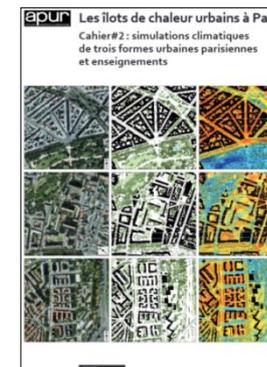


Parution décembre 2012

2013-2014 : Les Îlots de Chaleur Urbains à Paris.

Cahier #2 : simulation climatique de 3 formes urbaines parisiennes et enseignements (APUR)

- Etude de 3 formes urbaines parisiennes
- Enseignements pour la mise en place de solutions d'adaptation climatique

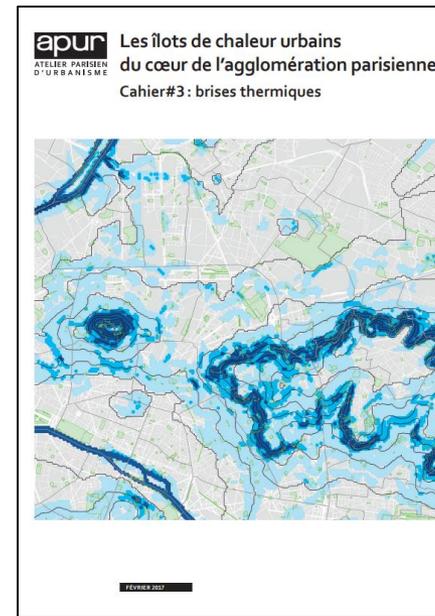


Parution mai 2014

Bibliographie APUR

2015-2017 : Les Îlots de Chaleur Urbains à Paris.
Cahier #3 : Brises thermiques (APUR, Villes & Climat)

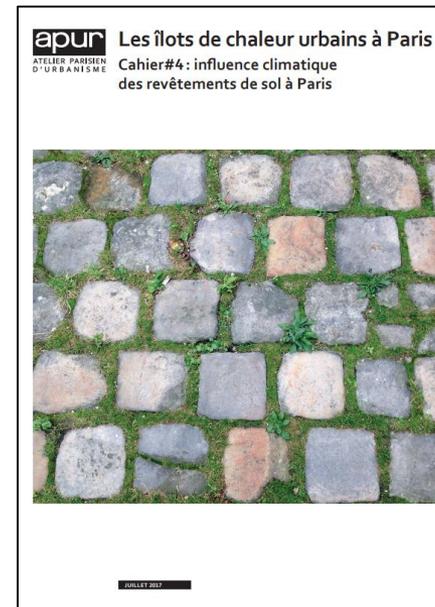
- *Compréhension des phénomènes aérologiques lors d'épisodes caniculaires*
- *Lien entre pollution et ICU*



Parution février 2017

2015-2017 : Les Îlots de Chaleur Urbains à Paris.
Cahier #4 : Influence climatique des revêtements de sol à Paris (APUR, Paris 7)

- *Typologie des matériaux de sol à Paris*
- *Expérimentation et mesures en laboratoire*
- *Illustration à l'aide de la thermographie d'été aérienne*



Parution juillet 2017



apur

111 avenue de France - 75013 Paris
tél : + 33 (0)1 83 97 64 00
<http://www.apur.org>