A vibrant photograph of an urban park. In the foreground, there are dense green bushes and trees. A paved path winds through a field of tall grass. In the background, several modern multi-story buildings with large windows are visible under a clear blue sky. A few people can be seen walking on the path.

Surchauffe urbaine, quels enjeux et quelles solutions ?

Marjorie Musy, Directrice de Recherche, Cerema Ouest (Nantes)

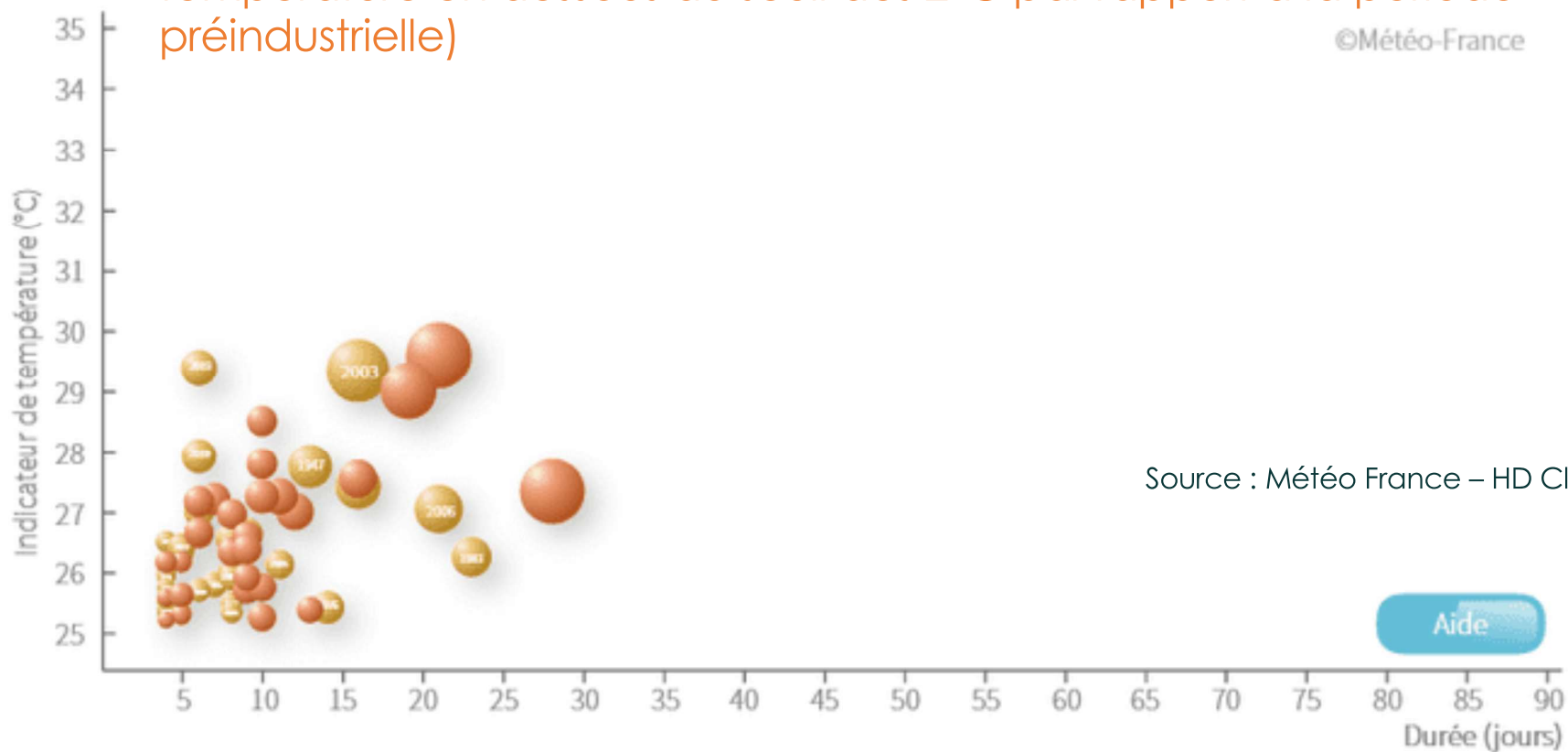
Plan

- Réchauffement climatique : données et impacts
- Ilot de chaleur urbain, confort thermique, surchauffe urbaine quelle différence ?
- Les différentes solutions de rafraichissement urbain et leur efficacité
- Outils et méthodes disponibles pour la planification et la conception des espaces publics

Réchauffement climatique : données et impacts

Des vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses

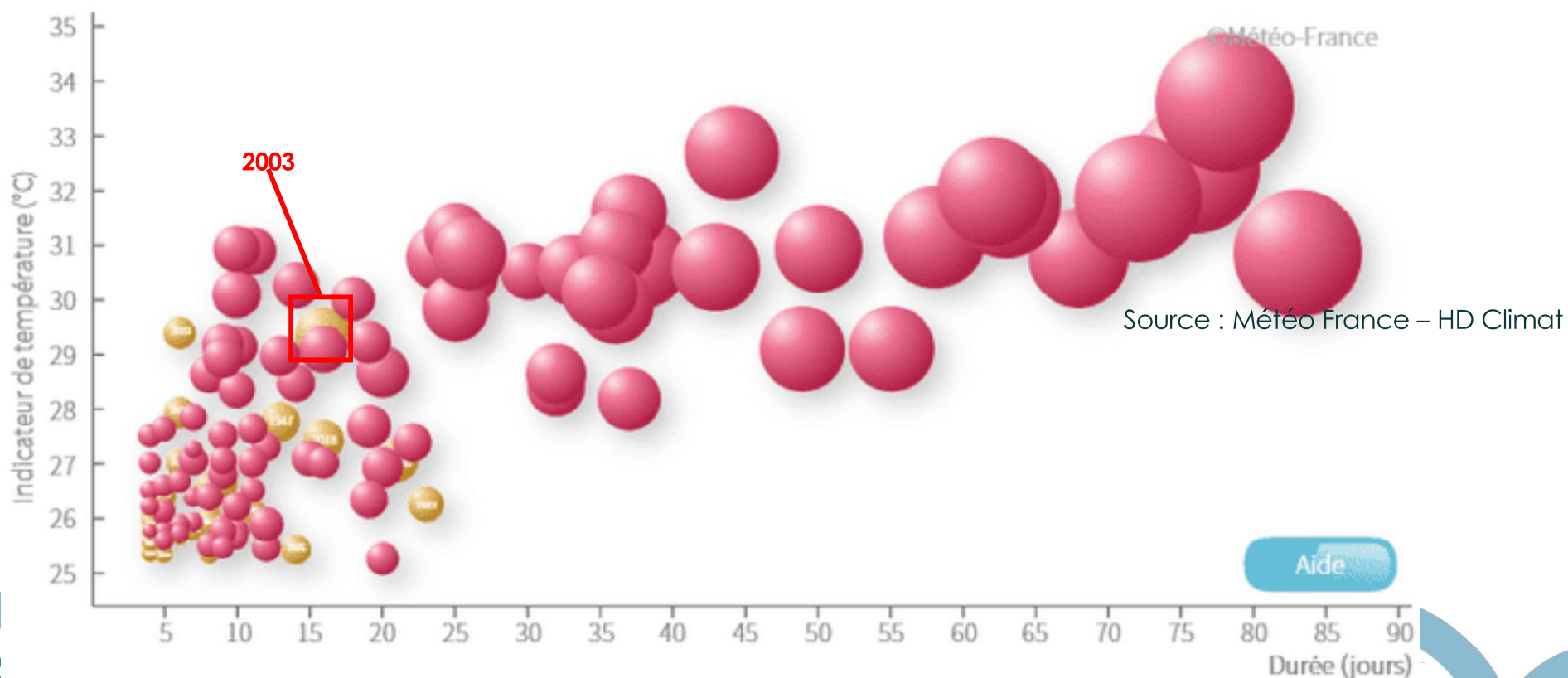
Vagues de chaleur observées en France métropolitaine sur la période 1973-2020 et Modélisation des vagues de chaleur sur la période 2071-2100 dans le scénario 2.6 (faibles émissions pour maintenir la température en dessous du seuil des 2°C par rapport à la période préindustrielle)



Réchauffement climatique : données et impacts

Des vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses

Vagues de chaleur observées en France métropolitaine sur la période 1973-2020 et Modélisation des vagues de chaleur sur la période 2071-2100 dans le **scénario 8.5** (pas de politique climatique - élévation de température 3,3°C à 5,7°C)



Source : Météo France – HD Climat

Réchauffement climatique : données et impacts

Une surmortalité avérée

Augmentation de la mortalité dans 13 villes françaises entre le 1^{er} et le 19 août 2003, en comparaison des la même période sur les années 1999-2002
Seuls les décès dans des CHU sont comptés

City	2003 No. of City Deaths	Excess Mortality, %	2003 No. of In-Hospital Deaths	Excess Mortality, %
Bordeaux	318	43	228	53
Dijon	168	93	117	121
Grenoble	148	28	108	24
Le Mans	204	82	171	116
Lille	200	4	103	18
Lyon	447	80	300	95
Marseille	571	25	163	23
Nice	341	53	193	65
Paris	1854	142	1665	138
Poitiers	184	79	151	72
Rennes	156	36	95	38
Strasbourg	253	51	157	33
Toulouse	315	36	140	49

Adapté de Vandentorren S, Suzan F, Medina S, Pascal M, Maulpoix A, Cohen JC, Ledrans M. Mortality in 13 French cities during the August 2003 heat wave. Am J Public Health. 2004 Sep;94(9):1518-20. doi: 10.2105/ajph.94.9.1518. PMID: 15333306; PMCID: PMC1448485.

Réchauffement climatique : données et impacts

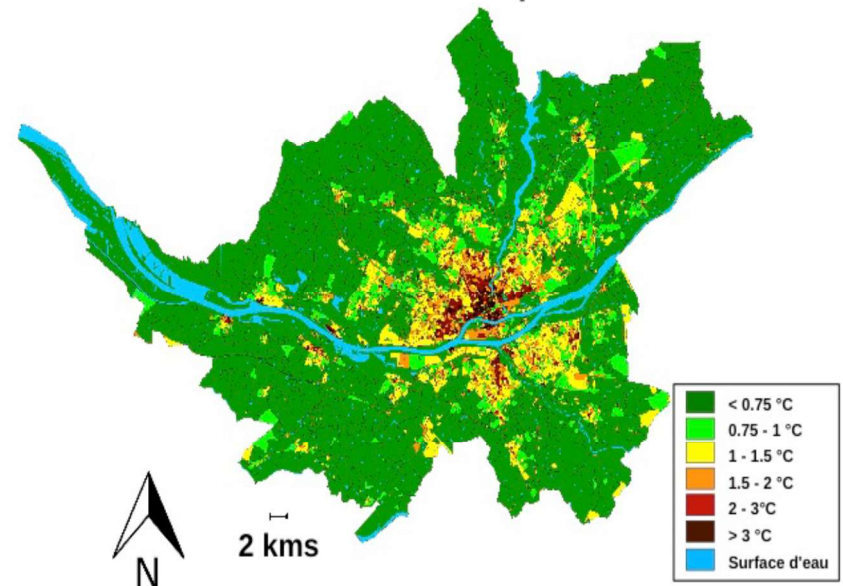
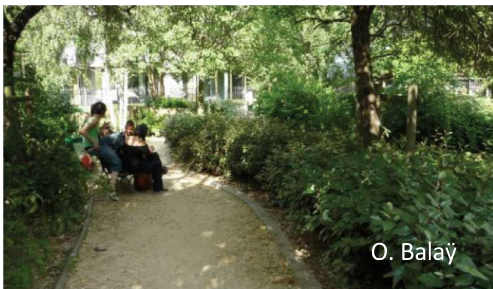
L'impact des climatisations

- Actuellement la climatisation représente 10% de la consommation mondiale d'électricité (20% de l'électricité utilisée dans les bâtiments). Cette part est grandissante et la consommations devrait tripler d'ici 2050 selon l'Agence Internationale de l'Energie.
- Les émissions liées à la climatisation des bâtiments comptent actuellement pour 4% des émissions de gaz à effet de serre mondiales (Woods et al. 2022).
- En villes, les rejets de climatisation contribuent au réchauffement local, ce qui augmente le besoin de froid des bâtiments.

Ilot de chaleur urbain, confort thermique, surchauffe urbaine quelle différence ?

Nécessité de raisonner à deux échelles

Celle du confort thermique et celle de l'Ilot de chaleur Urbain (ICU)

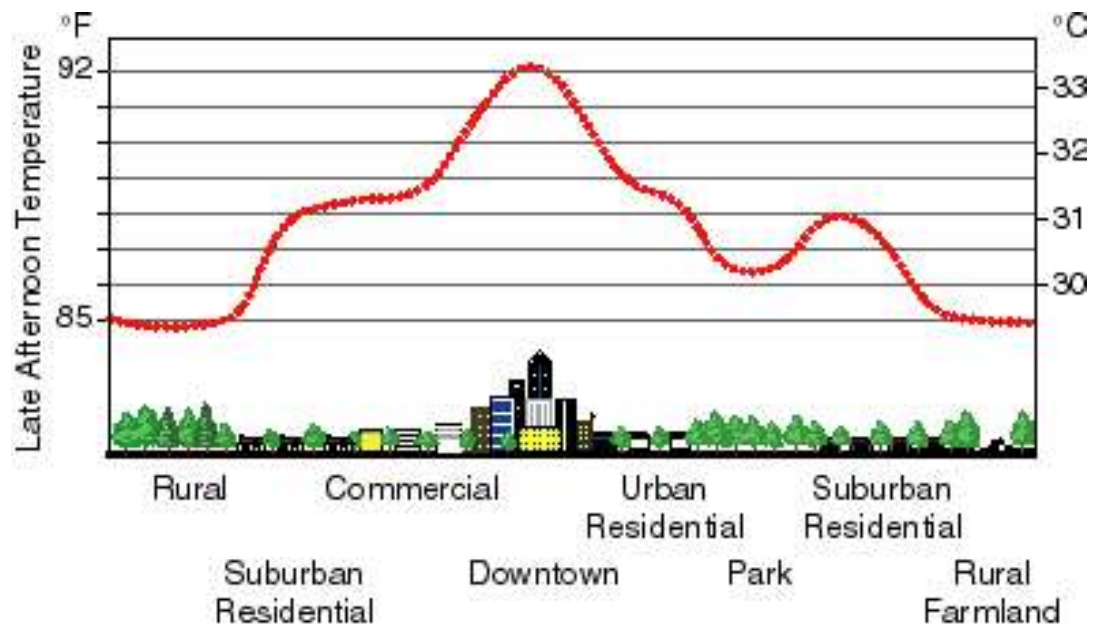


Estimation de l'intensité de l'ICU à Nantes par ciel clair
J. Bernard

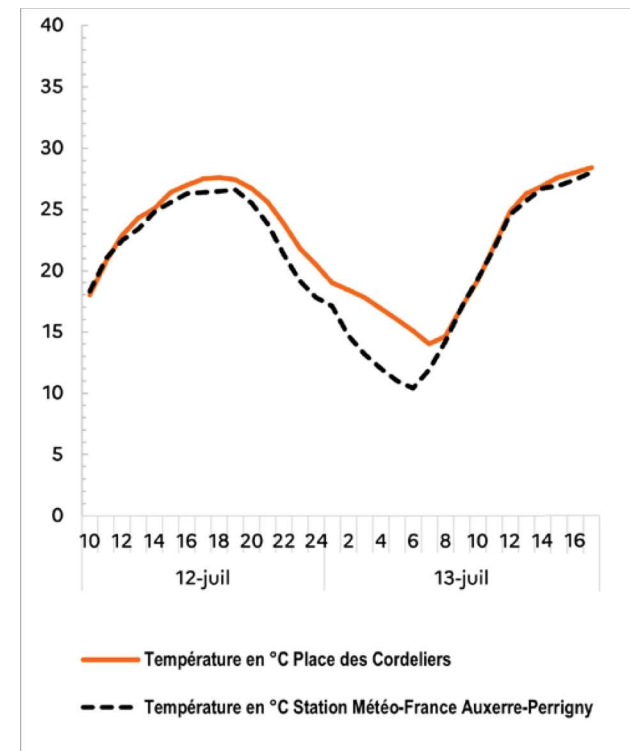
Ilot de chaleur urbain, confort thermique, surchauffe urbaine quelle différence ?

L'îlot de chaleur urbain

Des écarts de plusieurs degrés la nuit entre zones rurales et urbaines minérales et denses.



Source : [www. Lbl.gov](http://www.Lbl.gov)



Ecart de temperature urbaine/rurale à Auxerre, Source : TRIBU, 2020

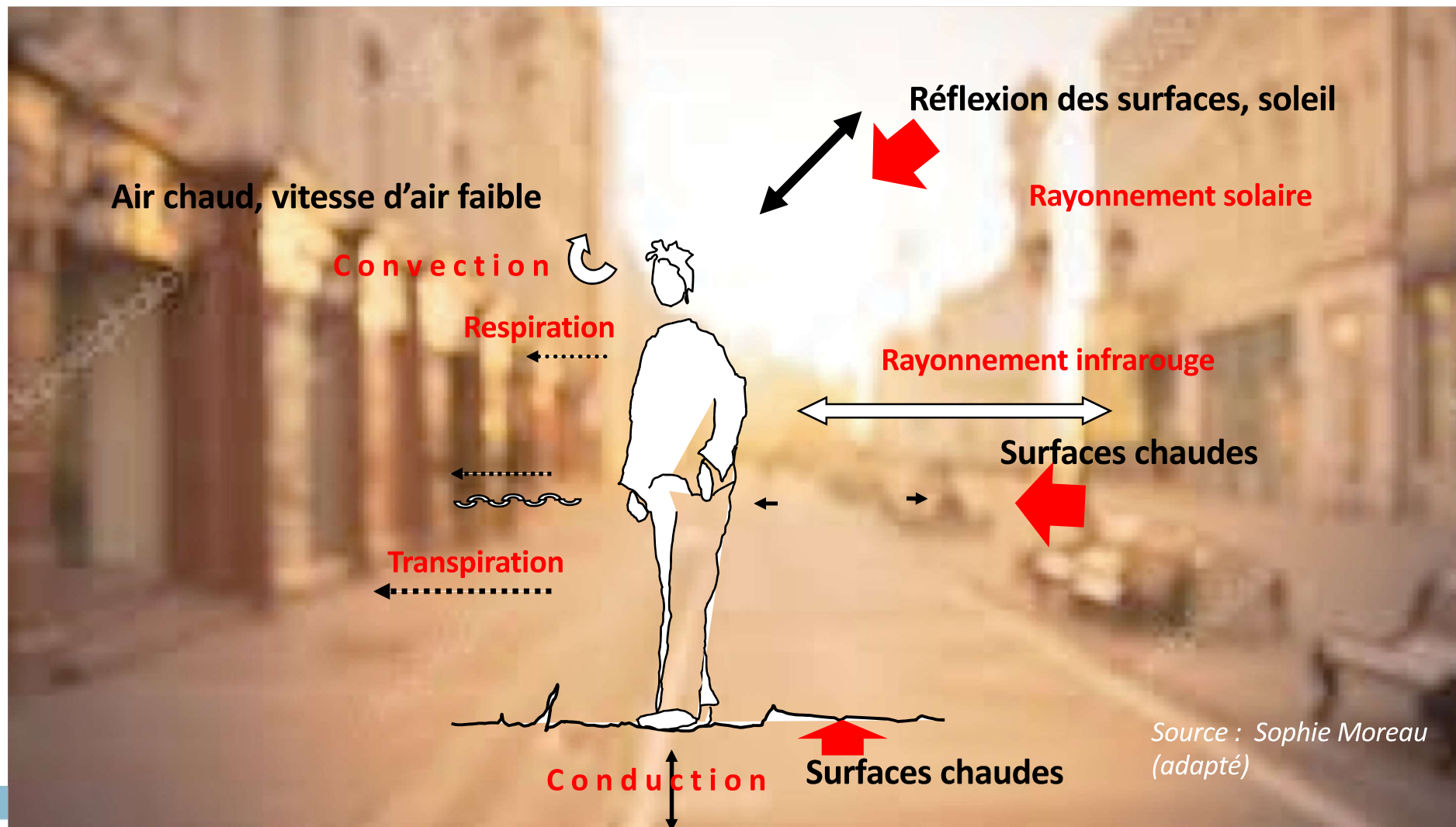
Ilot de chaleur urbain, confort thermique, surchauffe urbaine quelle différence ?

L'îlot de chaleur urbain

- L'ICU se manifeste principalement la nuit
- Son intensité est plus forte par ciel clair et en l'absence de vent
- Plus les villes sont denses et peuplées, minérales, plus l'ICU est intense

Ilot de chaleur urbain, confort thermique, surchauffe urbaine quelle différence ?

Le confort thermique



Ilot de chaleur urbain, confort thermique, surchauffe urbaine quelle différence ?

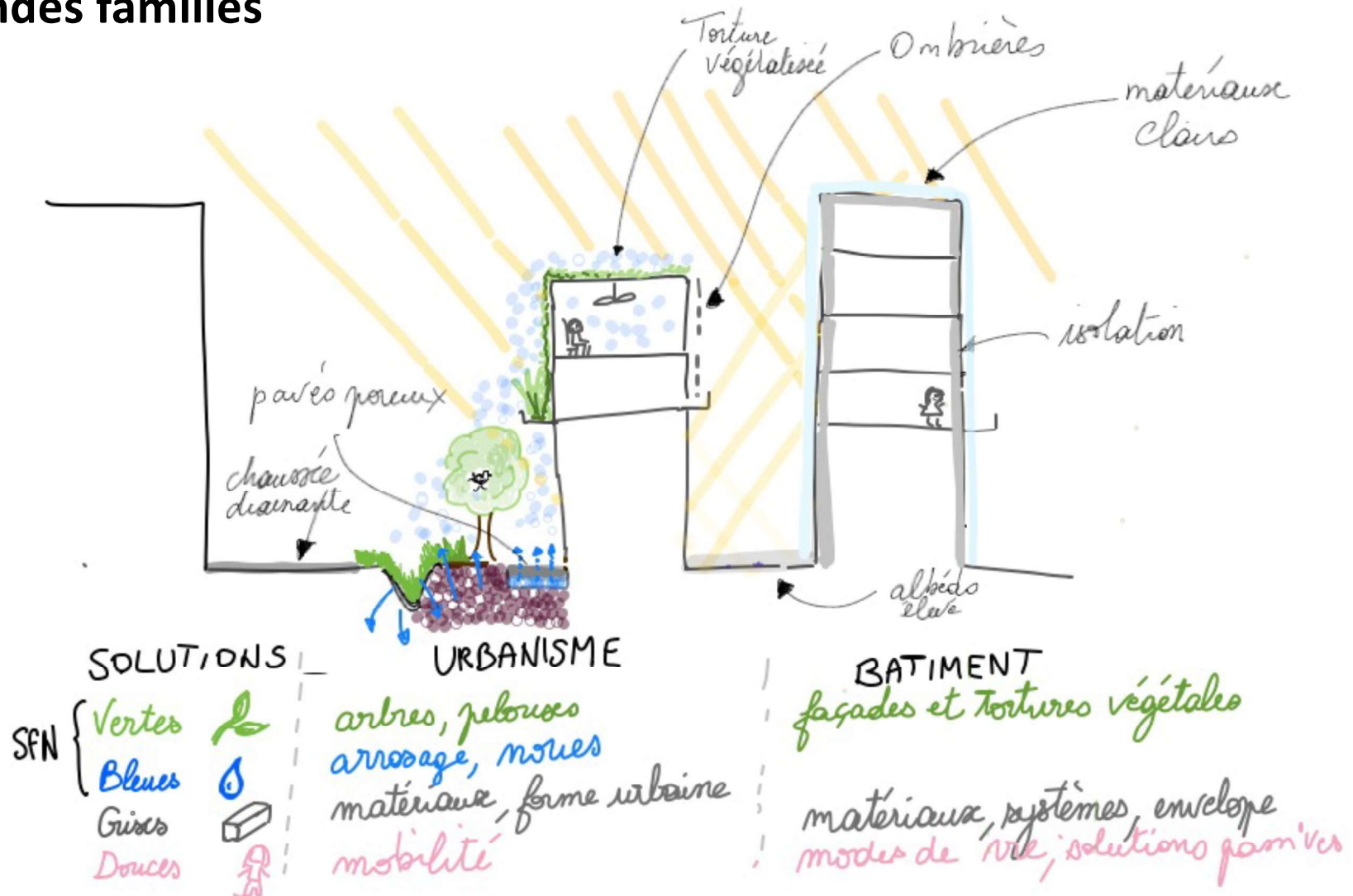
Confort thermique et ICU quelle différences en termes de solutions ?

Une solution très intéressante à l'échelle de la ville pour lutter contre l'ICU peut s'avérer localement inconfortable : exemple du sol réfléchissant qui renvoie le rayonnement solaire sur les usagers.

Localement, pour le confort c'est en général l'arrangement spatial qui est important, alors qu'à l'échelle de la ville, pour lutter contre l'ICU, c'est l'utilisation massive des solutions qui est efficace.

Les différentes solutions de rafraîchissement urbain et leur efficacité

Les grandes familles



Les différentes solutions de rafraîchissement urbain et leur efficacité

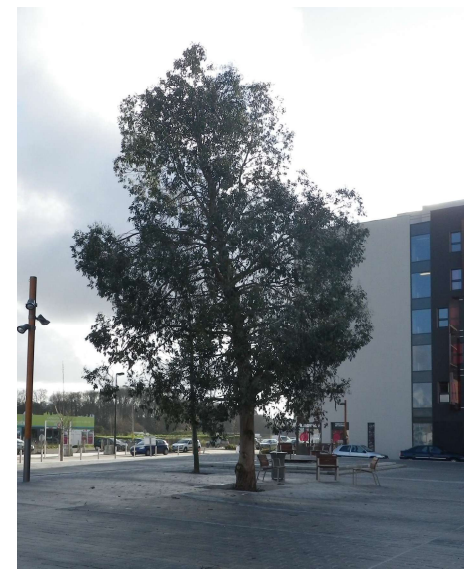
Les arbres - A l'échelle de l'arbre

Effet d'ombrage ou d'évaporation, lequel domine ?

- Pour un arbre isolé, l'effet d'ombrage est plus important que l'effet d'évaporation

Densité de feuillage et effet de rafraîchissement des surfaces

- L'effet de rafraîchissement est corrélé à la densité de feuillage : chaque unité de LAI permet de rafraîchir de 4°C les surfaces environnantes (gamme de densité de feuillage LAI<2 : faible, 2<LAI<4 : moyenne, LAI>4 élevée).
- Mais la capacité des arbres à rafraîchir peut varier d'un facteur 1 à 4 selon l'espèce et l'environnement (sol, albédo des surfaces, disponibilité en eau...).
- La sélection soigneuse des arbres est donc nécessaire.
- Les études s'accordent sur un effet maximal de 3°C sur la température d'air pour les arbres plantés dans des parcs dans des villes de latitude moyenne.



Eucalyptus, quartier
Bottier-Chénaie, Nantes
M. Musy

Les différentes solutions de rafraîchissement urbain et leur efficacité



Arbres d'alignement à Nantes
(Magnolias) M. Musy

Les arbres - A l'échelle de la rue

- L'effet d'ombrage est prédominant.
- L'effet de rafraîchissement dépend de la forme des arbres et de la forme des rues.
- Des effets de 2 à 3°C peuvent être relevés.
- Des recommandations (selon Morakinyo et al., 2020) :
 - Rues étroites et hautes non prioritaires
 - Rues de prospect moyen : arbres de faible hauteur, avec un tronc haut, si l'espace le permet la largeur de la canopée peut être étendue.
 - Rues les plus larges : arbres petits, de forte densité de feuillage, un tronc haut et un houppier large

Les arbres - A l'échelle de la ville

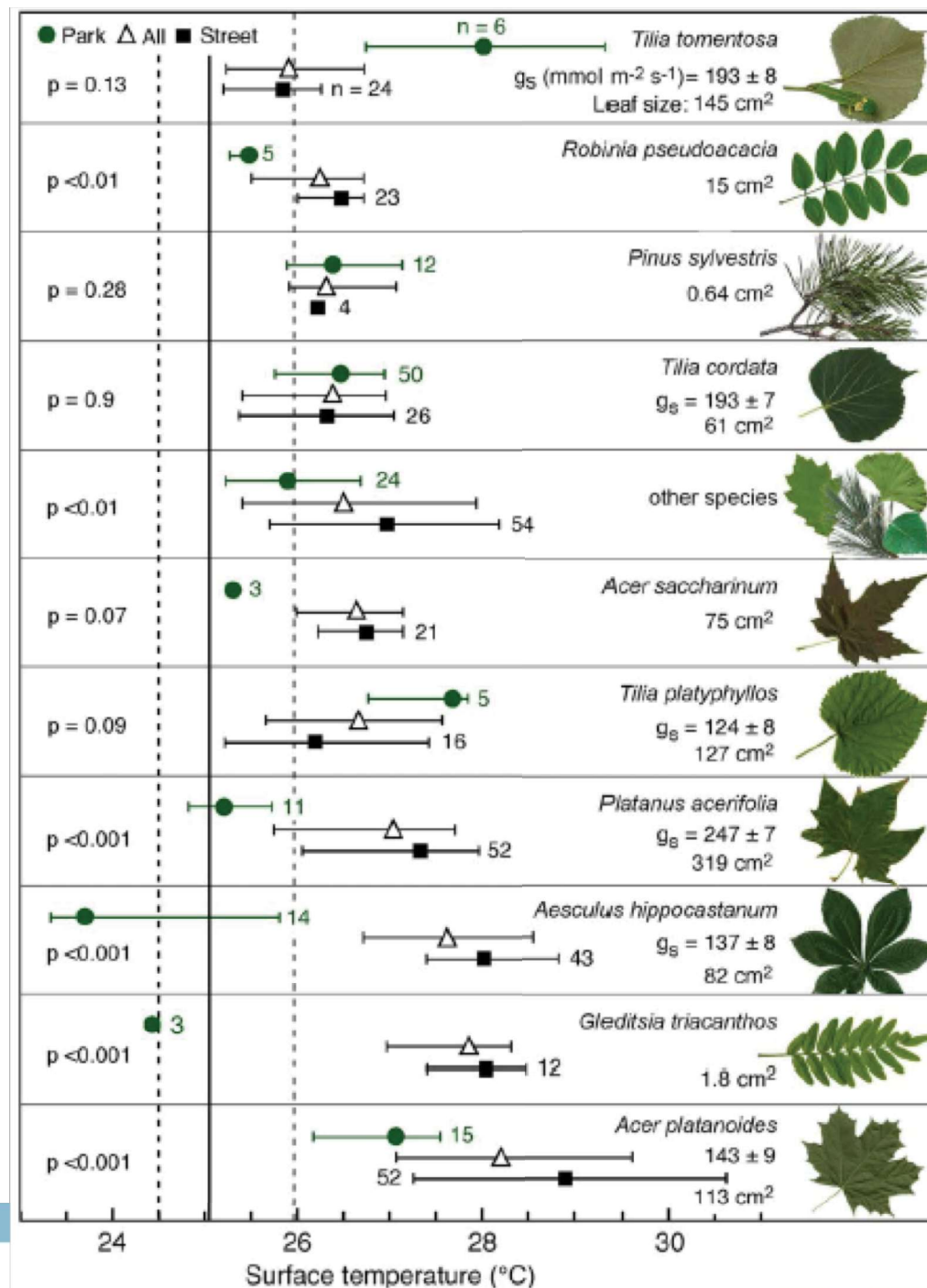
- Paris : simulation d'une couverture des surfaces disponibles au sol à 75% par des arbres associés à une strate basse, induit un rafraîchissement de l'air de 2,5°C pour la canicule de 2003 (de Munck, 2013).

Les différentes solutions de rafraîchissement urbain et leur efficacité

Quels arbres ?

Les arbres qui résistent au stress hydrique (adaptés au milieu urbain) limitent leurs échanges gazeux avec l'air. Leur effet climatique est essentiellement réduit à l'ombrage

Quand l'eau est disponible, la **transpiration** dépend des espèces d'arbres (résistance stomatale, seuil de fermeture des stomates...) et de leur environnement construit et non construit : humidité de l'air, sollicitation radiative...

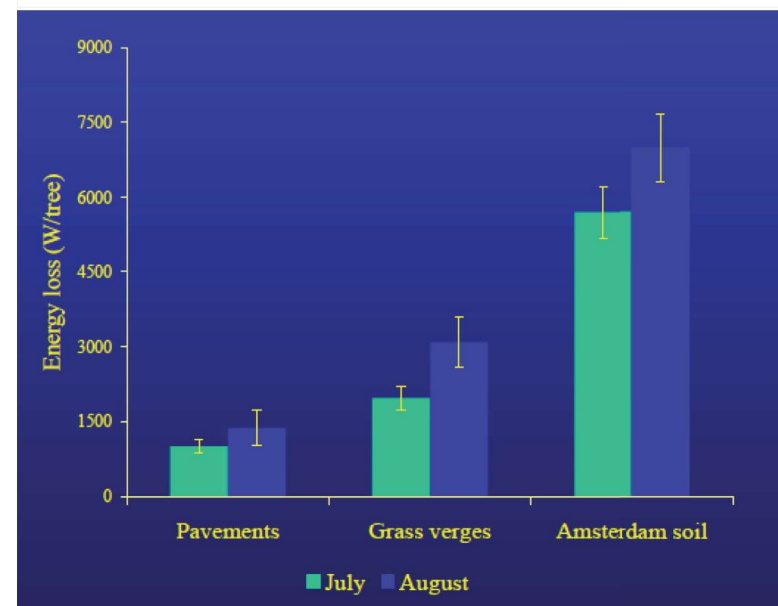
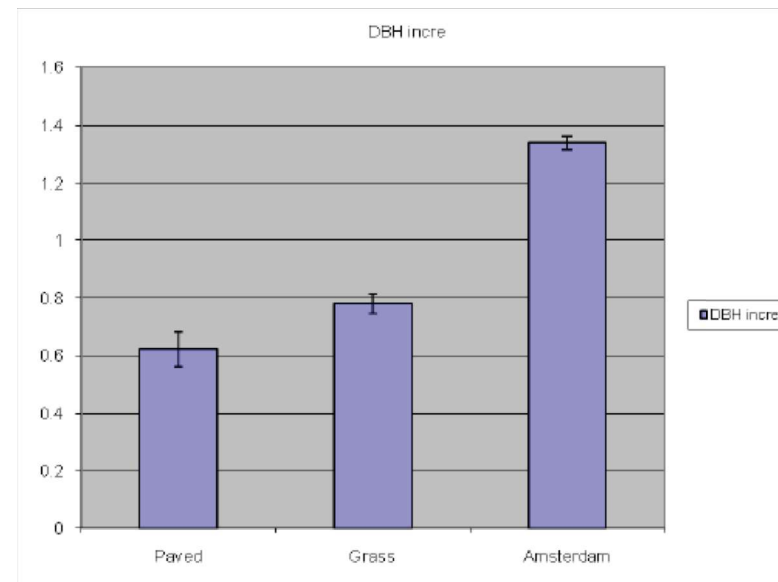


(Sources : Kjelgren et Montague, 1997)

Les différentes solutions de rafraîchissement urbain et leur efficacité

Les arbres - Impact du sol

- Dans des sols moins compacts, les arbres croissent jusqu'à 2 fois plus vite que dans des sols pavés et compacts (différence de disponibilité en eau)
- Dans des sols moins compacts, l'effet de rafraîchissement dû à l'évapotranspiration est jusqu'à 5 fois supérieur à celui d'arbres dans des sols pavés



(source : M.A. Rahman, A.R. Ennos, 2011)

Les différentes solutions de rafraîchissement urbain et leur efficacité

Les parcs

- Plus la couverture arborée est importante, plus les parcs sont frais. Les parcs enherbés peuvent être plus chauds que les zones minérales alentour.
- La taille du parc est corrélée à l'effet de rafraîchissement. La relation n'est pas linéaire, et certains auteurs font apparaître une taille seuil à partir de laquelle il n'y a plus d'effet supplémentaire.
- La forme du parc : les petits parcs de forme allongée et irrégulière ont peu d'effet de rafraîchissement



Parc des Grands Moulins à Paris - M. Musy

Ordres de grandeur

Göteborg en Suède : $D_{\text{air-max}} = 5,9^{\circ}\text{C}$

(Konarska et al., 2016)

Parc Olympique de Pékin

- zones enherbées non irriguées $D_{\text{air-max}} = 0,15^{\circ}\text{C}$

- zones enherbées, irriguées $D_{\text{air-max}} = 0,7 \text{ à } 1,2^{\circ}\text{C}$

- Zones arborées $D_{\text{air-max}} = 4,2^{\circ}\text{C}$

(Amani-Beni et al., 2018)

Les différentes solutions de rafraîchissement urbain et leur efficacité

Les toitures végétales

A l'échelle de la toiture

- Les toitures extensives de sedum ont un faible refroidissement par évapotranspiration. Le toit peut ainsi être plus chaud que l'air (stockage limité de l'humidité dans substrat > évapotranspiration faible et lente des plantes).
- Les toitures intensives permettent un rafraîchissement de l'air qui se limite en général à 1m autour de la toiture.

A l'échelle de la ville

- La majorité des travaux concluent que l'effet d'atténuation de l'ICU au niveau des piétons est négligeable dans tous les climats étudiés.

Toiture verte intensive (parc) sur un centre commercial, Porto, Portugal
© European Federation of Green Roof Associations (EFB)



Les différentes solutions de rafraîchissement urbain et leur efficacité

Plans d'eau

- Un grand plan d'eau permet un rafraîchissement plus fort des berges dans les zones sous le vent que de petites surfaces d'eau.
- Les plans d'eau de forme irrégulière sont de moins grande efficacité

Même si les plans d'eau réduisent la température d'air, l'augmentation associée de l'humidité de l'air peut dégrader le confort thermique. De plus, lorsque l'eau est plus chaude que la température de l'air (en automne ou la nuit), la masse d'eau a un effet négatif sur le confort thermique, et limite le refroidissement de l'environnement.

Rivières

Des effets de rafraîchissement sont mesurés au-dessus (ponts) ou sur les berges. L'aménagement des berges a un effet prédominant sur la température mesurée sur les berges.

La densité bâtie le long des berges influence le rafraîchissement de l'environnement : plus il est ouvert et végétal, plus la fraîcheur pénètre dans les zones urbanisées. Plus la rivière est large, plus la distance de refroidissement est grande.

Les différentes solutions de rafraîchissement urbain et leur efficacité

-5°C

Dans la ville d'Hiroshima, valeur maximale de l'effet de refroidissement mesuré au-dessus de la rivière, aux moments les plus chauds.

L'effet de rafraîchissement est ressenti jusqu'à 100 m de la rive (Murakawa et al., 1991).

-6 à -7°C

A Lisbonne, valeur maximale de l'effet de refroidissement mesuré au-dessus du Tage, aux moments les plus chauds. L'effet de rafraîchissement est ressenti jusqu'à plusieurs centaines de mètres de la rive (Fernandez et al., 1998).

Plans d'eau à l'échelle de la ville

Pour une même surface totale d'eau, plusieurs petites surfaces réparties dans la zone urbaine ont un effet sur la température d'air plus faible, mais influencent une plus grande zone de la ville qu'une unique grande surface d'eau.

Les différentes solutions de rafraîchissement urbain et leur efficacité

Arrosage des chaussées

L'efficacité de l'arrosage dépend de l'exposition solaire, de la période de la journée et du revêtement.

Rue du Louvre à Paris, la fréquence d'arrosage optimale (par camions) a été évaluée à

- 30 min. l'après-midi pour la chaussée et 10-20 min pour les trottoirs (plus lisses, avec une moindre capacité d'absorption de l'eau).
- 1- 2,5h en matinée.

Vers 18h que l'efficacité de l'arrosage est la plus importante (Hendel, 2016).

L'évaporation compte pour la quasi-totalité de la fraîcheur générée. Seulement 20% de l'eau utilisée pour l'arrosage s'évapore. Le reste ruisselle ou s'infiltre.

Chaussées et trottoirs arrosés par camion, rue du Louvre à Paris, (Hendel, 2016):

- * Différences de températures observées à 18h par rapport à l'environnement urbain
 - 0,79°C température d'air , -2,39°C température radiante , -1°C UTCI
- * Différences moyennes de températures de surfaces
 - 4°C le matin / -13°C l'après-midi

Les différentes solutions de rafraîchissement urbain et leur efficacité

Matériaux réfléchissants


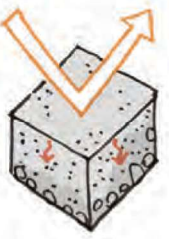
Sur les bâtiments : améliore le confort intérieur et réduit les besoins de rafraîchissement en été . L'efficacité dépend de l'environnement urbain, de l'isolation du bâtiment.

Dans l'espace public :

- 4°C : rafraîchissement de l'air en journée en passant d'un revêtement de sols foncé asphalté (albédo 0,04) à un blanc (albédo 0,55) à Athènes (Synnefa et al., 2011)
- 20% en moyenne : diminution de la demande énergétique des bâtiments résidentiels et commerciaux avec l'application d'un « cool roof » (albédo 0,6) à la place d'une toiture en asphalte (albédo 0,2). (Akbari & Konopacki, 2004).

Mais la réflexion du rayonnement solaire sur les passants dégrade le confort thermique

+ 3 à 6° ressentis à Milan : effet de l'augmentation de 0,5 de l'albédo de toutes les surfaces urbaines (Falasca, 2019)

				
(Bigorgne, Hendel, APUR 2017)				
albédo	0,7 à 0,85	0,4 à 0,8	0,4	0,05 à 0,15
inertie thermique	forte	forte	moyenne	forte
émissivité	0,9	0,92	0,76	0,88
T° surface jour	frais	moyen	moyen	chaud à très chaud
T° surface nuit	frais	moyen	frais	chaud

Les différentes solutions de rafraîchissement urbain et leur efficacité

Matériaux réfléchissants

A l'échelle du quartier et de la ville

Efficaces pour réduire l'effet d'ICU en limitant le piégeage de la chaleur dans les rues.

Pour les quartiers très denses c'est l'augmentation de l'albédo en toiture la plus efficace. Dans les quartiers moins denses, c'est l'albédo des sols qui a le plus d'effet.

- 0,25 à - 0,5°C : réduction moyenne de la température d'air en ville pour une augmentation de 0.1 de l'albédo des toits à Melbourne et à Sydney (Imran et al., 2018; Santamouris et al., 2018)
- 0,4 à - 0,8°C : réduction moyenne de la température d'air en ville pour une augmentation de 0.1 de l'albédo de toutes les surfaces urbaines (passage de revêtements marron/gris à des revêtements blancs) à Milan (Falasca, 2019)

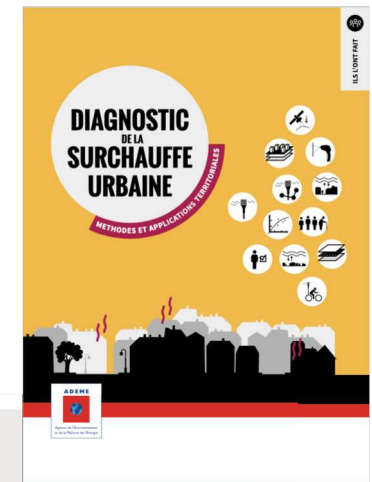
Outils et méthodes disponibles pour la planification et la conception des espaces publics

Planifier et évaluer les solutions de rafraîchissement : Des guides des outils mais pas de recettes toutes faites



Outils et méthodes disponibles pour la planification et la conception des espaces publics

La mesure de l'ICU



MESURES FIXES

2 POINTS

ÉCHELLE : VILLE

RÉSOLUTION : FAIBLE

COÛT : < 10 000 €

DURÉE : > 3 MOIS



MESURES FIXES

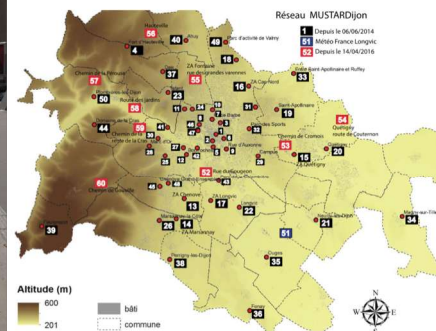
RÉSEAU DE POINTS

ÉCHELLE : VILLE

RÉSOLUTION : MOYENNE

COÛT : ENV. 50 000€

DURÉE : > 3 MOIS



60 Sondes sous abris mesurant T et HR depuis juin 2014 :

- placés sites ventilés
- sur candélabres publics,
- 3m du sol



Dijon



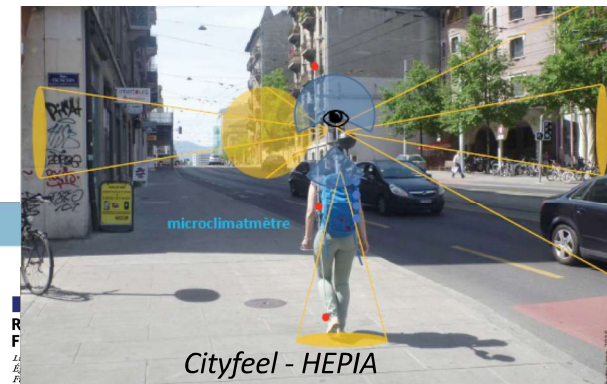
MESURES MOBILES

ÉCHELLE : VILLE À ESPACE PUBLIC

RÉSOLUTION : MOYENNE À FINE

COÛT : < 10 000€

DURÉE : < 1 MOIS



Station à Paris

Outils et méthodes disponibles pour la planification et la conception des espaces publics

La mesure de l'ICU



TÉLÉDÉTECTION

ÉCHELLE : VILLE À ESPACE PUBLIC

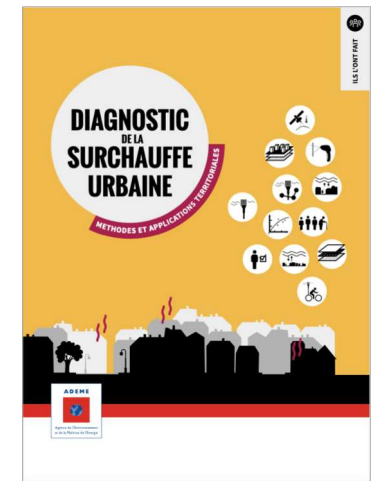
RÉSOLUTION : MOYENNE À FINE

COÛT : < 10 000€ (IMAGE SATELLITE)

À ENV. 50 000€ (CAMPAGNE AÉROPORTÉ)

DURÉE : < 1 MOIS

Attention : ce sont des températures de surfaces qui sont obtenues. Bien vérifier l'horaire de passage du satellite.

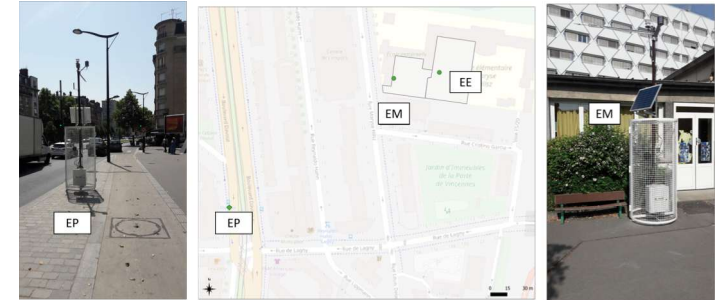


Outils et méthodes disponibles pour la planification et la conception des espaces publics

La mesure locale du confort

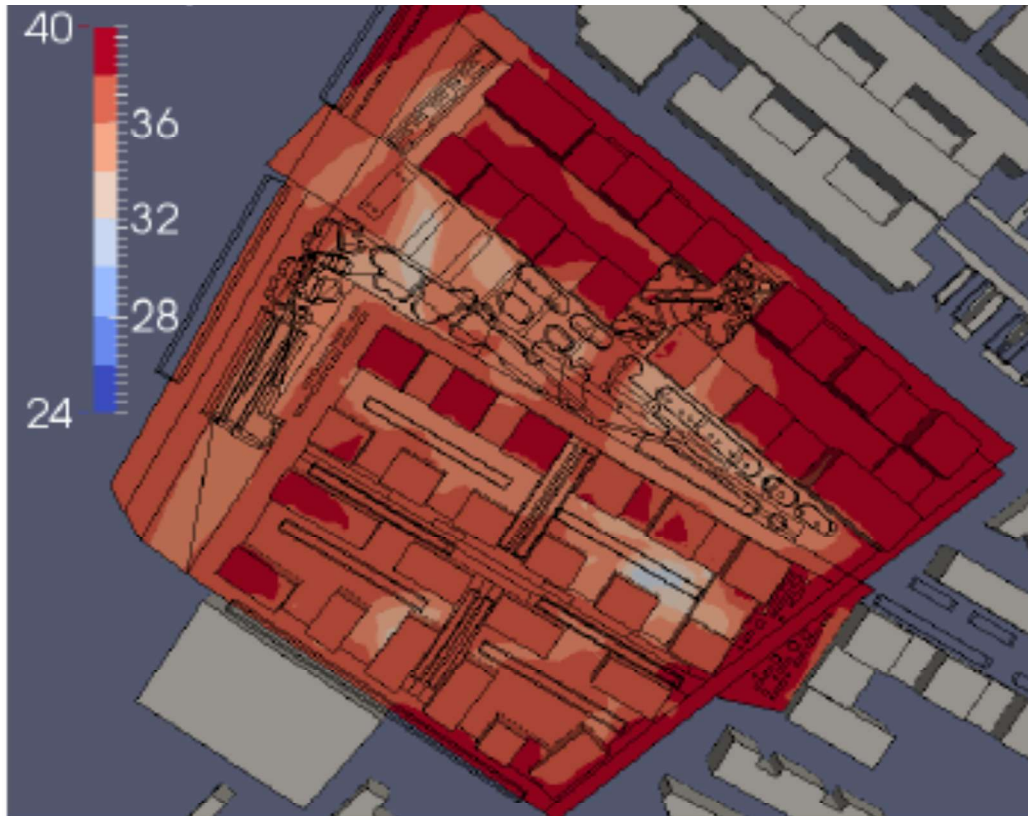
Exemple des cours Oasis à Paris

- Des stations fixes extérieures pour avoir une référence Avant-Après
- Des mesures mobiles dans la cours avant et après



Outils et méthodes disponibles pour la planification et la conception des espaces publics

La simulation



*Simulation températures d'air avec Solene-microclimat -
Village Olympique - Cerema*

- Possibilité d'étudier des scénarios d'aménagement
- Possibilité d'étudier des scénarios climatiques futurs

Attention : Les résultats des modèles dépendent des entrées

Conclusions

- Les petites collectivités connaissent un ICU faible, par contre, dans les zones denses et minérales, les problématiques de confort thermique sont réelles.
- De nombreuses solutions existent pour lutter contre la surchauffe urbaine qui peuvent être combinées, pour une meilleure adaptation à l'usage des lieux.
- Une bonne compréhension de effets physiques de l'aménagement permet déjà d'orienter un projet mais les interactions entre les aménagements peuvent être complexes



Marjorie Musy
Responsable de l'équipe de recherche *Bâtiments performants dans
leur environnement*
marjorie.musy@cerema.fr