



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME



AGENCE DE LA
TRANSITION
ÉCOLOGIQUE



ILS L'ONT FAIT

Rafraîchir les villes des solutions variées



Cerema
CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

Ce document est édité par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Coordination technique : Solène MARRY

Rellecteurs : SANNA Daniela, PASQUIER Maxime, PHILLIPS Céline, BRICHE Elodie,
LEFRANC Anne, SCHOEFFTER Marc, ROZO Ariane, LARUELLE Céline, MEHL Céline,
GAGNEPAIN Laurent, ALMOSNI Jérémie

Rédacteurs : TRIBU : Marie LEROY, Héloïse MARIE, Karine LAPRAY
CEREMA : Marjorie MUSY, Auline RODIER, Sihem GUERNOUTI

Crédits photo : TRIBU (sauf mention sur la photo)

Création graphique : TRIBU : Héloïse MARIE

Brochure réf. 011441

ISBN : , 979-10-297-1748-2
Mars 2021

Dépôt légal : ©ADEME Éditions, mai 2021

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

PREAMBULE

Pourquoi ce recueil ?

Directement impactés par le changement climatique, nos territoires sont confrontés de façon croissante aux vagues de chaleur en période estivale. Les villes sont particulièrement vulnérables à ces épisodes extrêmes, celles-ci étant soumises au phénomène de surchauffe urbaine.

Il est urgent de proposer des alternatives au recours croissant à la climatisation, qui a des impacts multiples à la fois en termes d'émission de chaleur locale, de consommation énergétique et d'émissions de gaz à effet de serre des fluides frigorigènes durant le cycle de vie des produits.

presque 3 fois plus d'usage de la climatisation est à prévoir en Europe en 2050 (Agence Internationale de l'Energie, 2018)

Le rafraîchissement urbain est un sujet récent : les connaissances produites par la recherche et des premières expérimentations donnent des résultats divers, parfois difficiles à décrypter pour les acteurs opérationnels.

Ce guide propose une approche synthétique, multicritères et opérationnelle des solutions émergentes ou éprouvées, adaptées à différents contextes climatiques. Il s'agit d'éclairer la décision des acteurs publics et privés, tant sur leurs choix d'aménagement, de construction, de rénovation des bâtiments que d'aménagement des espaces extérieurs.

**L'ADEME
propose ici des
données chiffrées
et argumentées
d'efficacité
de différentes
solutions de
rafraîchissement
urbain**

SOMMAIRE

Rafrâîchir les villes des solutions variées

Enjeux

Le changement climatique	6
La surchauffe urbaine	8
Les phénomènes en jeu	10

Solutions

Panorama des solutions	12
L'état des connaissances scientifiques	14
L'efficacité des solutions	16
Les cobénéfices et impacts	18
Les combinaisons entre solutions	20
Déclinaison opérationnelle	24

Fiches détaillées

Les solutions vertes 26

Les parcs	28
Les arbres	30
Les pelouses, prairies	32
Les toitures végétalisées	34
Les façades végétalisées	36
Les plans d'eau et les rivières	38
Les ouvrages paysagers de gestion des eaux pluviales	40

Les solutions grises 42

Les formes urbaines bioclimatiques	44
Les fontaines, jets d'eau	46
L'arrosage de l'espace urbain	48
Les structures d'ombrage	50
Les panneaux solaires	52
Les revêtements à albédo élevé	54
Les revêtements drainants	56
Les revêtements à changement de phase	58
L'isolation thermique, l'inertie thermique	60

Les solutions douces 62

Réduction du trafic routier et des moteurs thermiques	64
Limitation de la climatisation	66
Adaptations individuelles et sociétales aux fortes chaleurs	68

Conclusion 70

Glossaire 72

Bibliographie 74



Nice, Promenade du Paillon
Paysagiste : Michel PENA

Le changement climatique

Les épisodes de vagues de chaleur de plus en plus nombreux ces 20 dernières années ont été un déclencheur d'une prise de conscience sur la viabilité de nos cadres de vie et en particulier au sein de villes.

+2,3 °C en 2020 en France métropolitaine par rapport à la moyenne 1961-1990.
(Météo-France, 2020)

+1,3°C à +5,3°C d'ici la fin du siècle en fonction des scénarios du GIEC. (Jouzel, 2014)

2 fois plus de vagues de chaleur sont à prévoir en France d'ici 2050.
(Météo-France, 2019)

Cette prise de conscience est d'autant plus importante que tous les scénarios futurs du changement climatique simulent une augmentation globale des températures partout sur le globe et une fréquence et une intensité plus importante des vagues de chaleur.

Tous les territoires de France métropolitaine et d'Outre-Mer sont impactés. En France métropolitaine, cela se traduit par des climats avec des étés plus chauds et plus secs.



Une vague de chaleur se caractérise par des températures anormalement élevées pendant plusieurs jours consécutifs. On parle aussi de canicules, définies par des dépassements de températures diurnes et nocturnes dont les seuils varient en fonction des départements.

Le graphique ci-dessus caractérise les vagues de chaleur entre 1947 et 2019 :

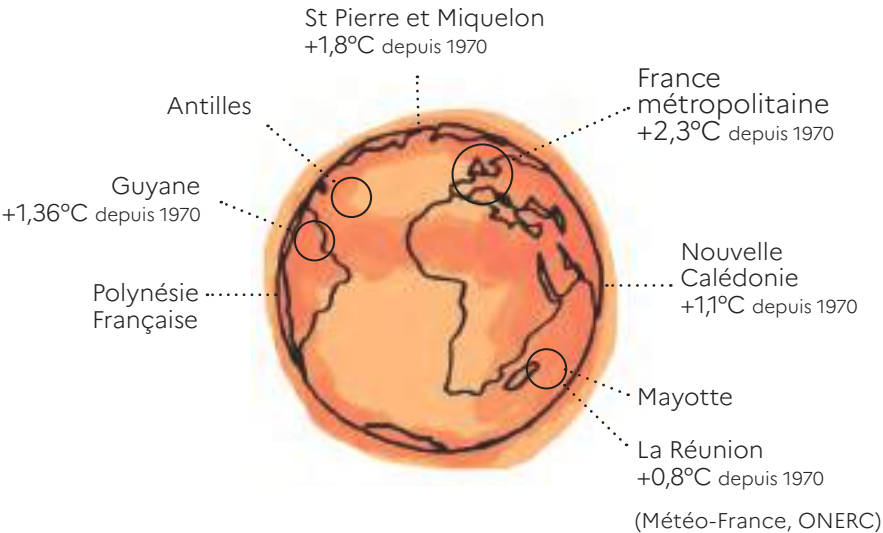
- La durée en jours en abscisse ;
- L'intensité par un indicateur de température, en ordonnées ;
- La sévérité : la dimension des bulles représente le cumul de chaleur.

(Météo-France)

Territoires français

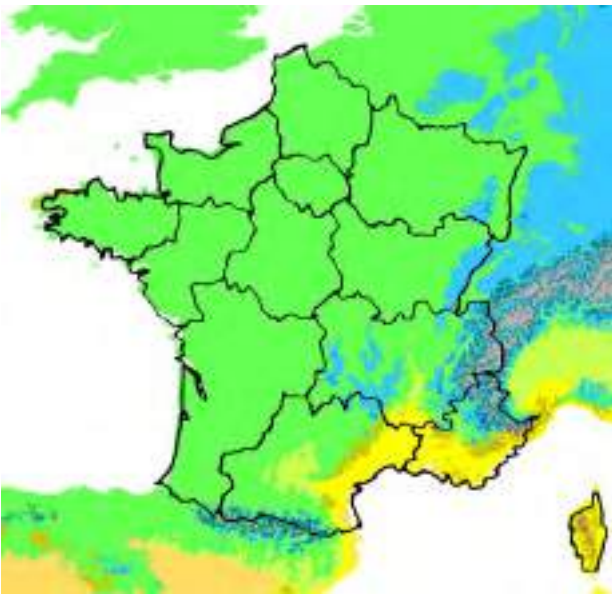
Des augmentations de températures ont été constatées sur tous les territoires.

+ 1°C
d'augmentation de la température moyenne mondiale en 2020 par rapport à la moyenne 1961-1990



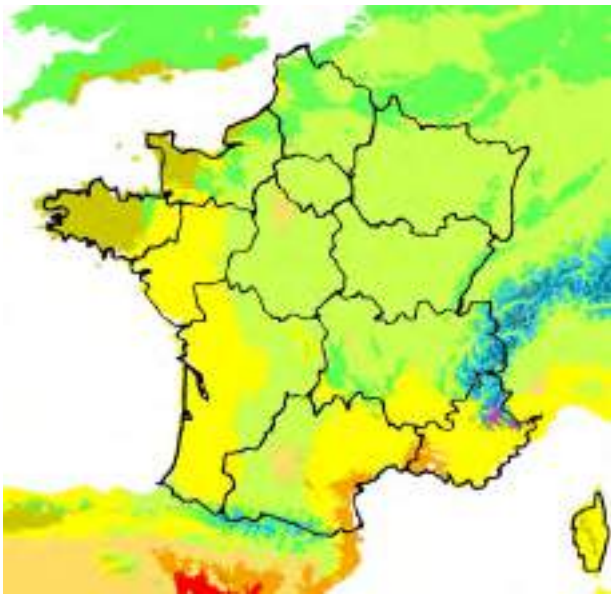
Climat actuel

Référence 1980–2016



Climat futur 2071–2100

RCP 8,5 scénario sans politique climatique mondiale



Zones climatiques selon la classification des climats de Köppen-Geiger

(Beck et al. 2018)

- BWh Climat désertique chaud
- BSh Climat semi-aride chaud
- BSk Climat semi-aride froid
- Csa Méditerranéen chaud //Climat tempéré chaud à été chaud et sec
- Csb Méditerranéen tempéré // Climat tempéré chaud à été sec
- Cfa Subtropical humide // Climat tempéré chaud sans saison sèche et à été chaud
- Cfb Océanique tempéré // Climat tempéré chaud sans saison sèche et à été tempéré
- Cfc Océanique froid // Climat tempéré chaud sans saison sèche à été court et frais
- Dfb Climat continental froid, sans saison sèche et à été tempéré
- Dfc Climat continental froid, sans saison sèche et à été court et frais
- ET Climat polaire

La surchauffe urbaine

La surchauffe urbaine est un phénomène propre aux milieux urbains qui s'exprime de jour comme de nuit et à toutes les échelles : de la ville jusqu'à l'individu. La surchauffe urbaine renvoie à la fois à l'effet d'îlot de chaleur urbain et à l'inconfort thermique des citoyens.

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain - dont la manifestation principale est un rafraîchissement nocturne limité en ville par rapport à la campagne - est un facteur d'aggravation de la vulnérabilité des villes en cas de vague de chaleur.

Lors de la canicule de 2003, la surmortalité a été de 141% à Paris, alors qu'en zones rurales, elle était de 40%. (Cadot, 2006)

La situation des citoyens soumis à ces conditions extrêmes peut conduire à des coups de chaleur et des déshydratations jusqu'à la mort des personnes les plus fragiles. Les personnes âgées, les jeunes enfants, les femmes enceintes, les personnes malades sont particulièrement sensibles.

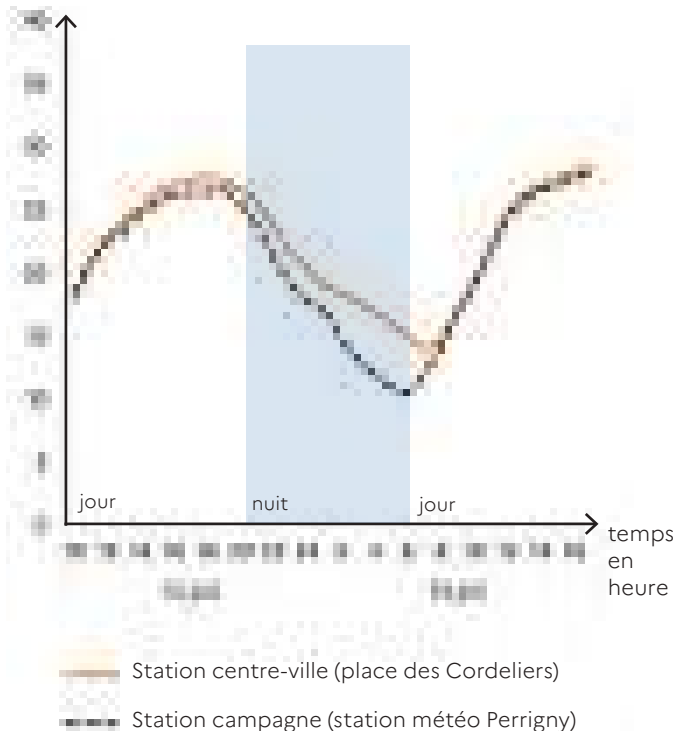
Les habitants de logements sous les toits, insuffisamment isolés ou sans protection solaire peuvent être exposés à des températures encore

plus élevées, d'autant plus, s'ils sont captifs de leur lieu de vie pour des raisons de mobilité réduite ou de précarité.

Un autre enjeu tout aussi important est l'inconfort thermique des citoyens dans les espaces extérieurs en été. Dans les contextes construits et artificialisés, les étés toujours plus chauds deviennent inconfortables le jour dans les espaces qui manquent d'ombre, peu ventilés et constitués de surfaces minérales qui montent en température.

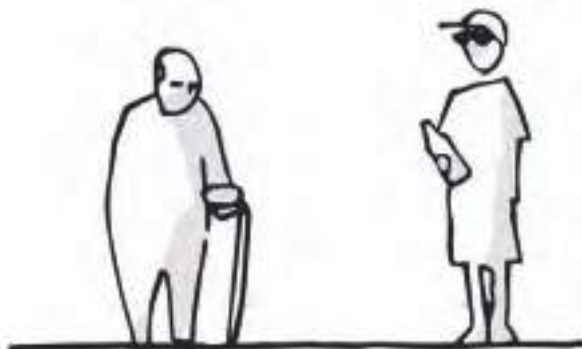
Le ressenti thermique d'un individu ne dépend pas seulement de la température. D'autres paramètres entrent en considération : l'hygrométrie, la vitesse de vent, le rayonnement du soleil et des surfaces environnantes, ainsi que l'habillement de la personne, son métabolisme et son activité physique.

température
d'air en °C



La différence de température ville-campagne, qui est la caractéristique de l'effet d'îlot de chaleur urbain s'exprime principalement la nuit.

**- 0,3°C à 10h
+0,3°C à 12h
+1,2°C à 20h
+3,7°C à 2h
+5°C à 5h**
sont les différences de températures d'air mesurées entre le centre-ville de la ville de Auxerre (Place des Cordeliers) et la campagne environnante (station Météo-France Perrigny) dans le cadre d'une étude de diagnostic de l'effet d'îlot de chaleur urbain. (TRIBU, 2020)

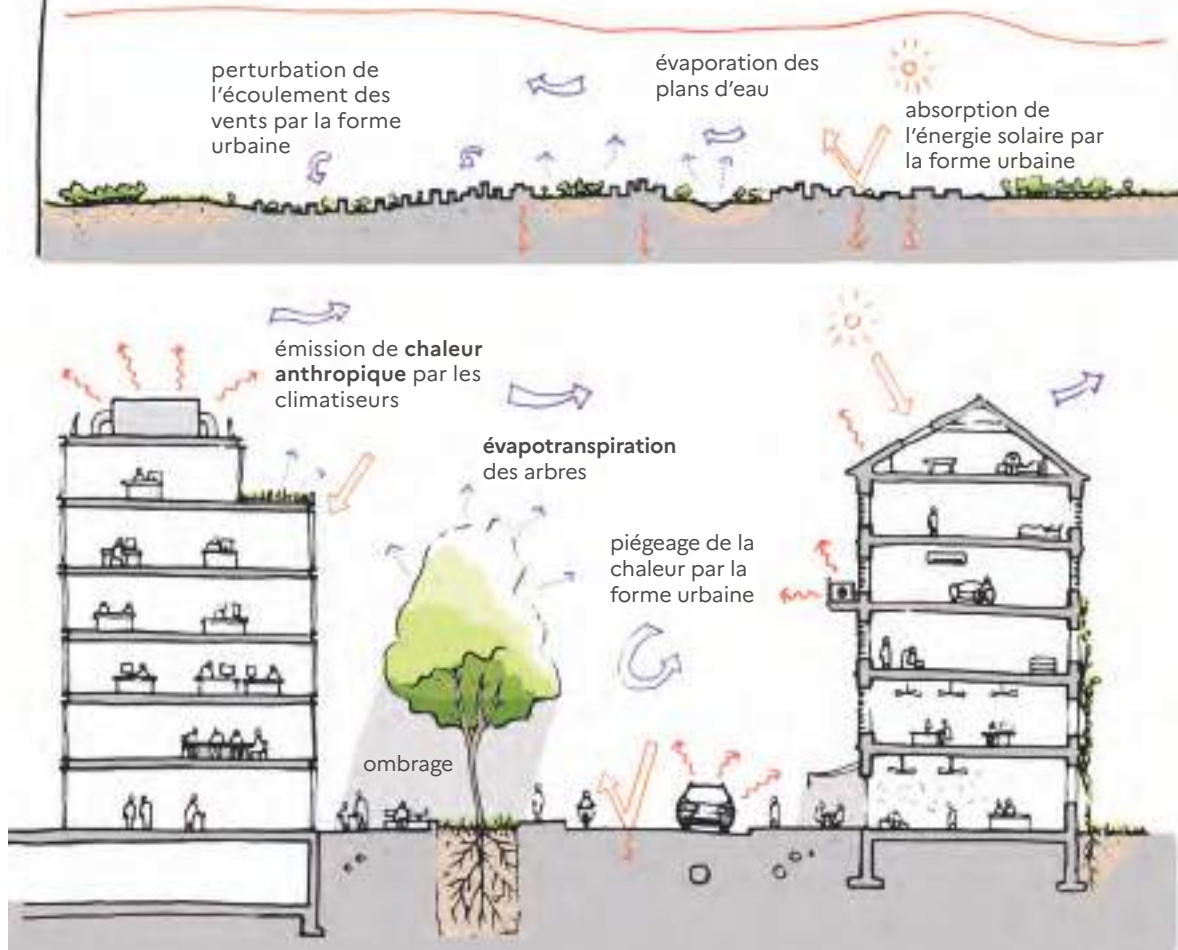


Selon son âge, son métabolisme, son habillement, son activité, son habitat, ses capacités de mobilité, son revenu, chacun est plus ou moins vulnérable aux fortes chaleurs.

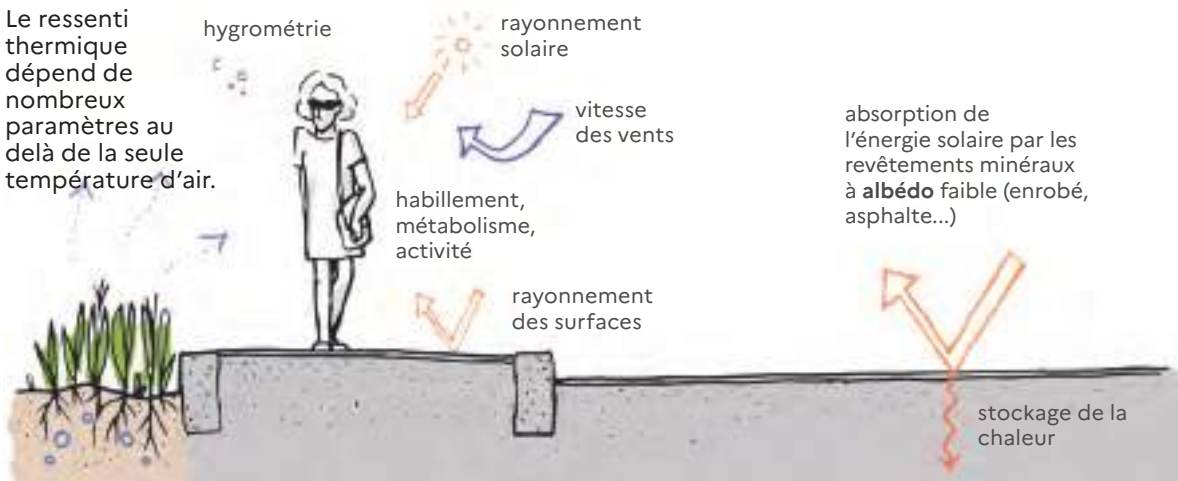
ENJEUX

Les températures mesurées le jour varient sans distinction claire entre ville et campagne.

Les phénomènes en jeu le jour, en été



Le ressenti thermique dépend de nombreux paramètres au delà de la seule température d'air.



Les phénomènes en jeu la nuit, en été

évacuation de la chaleur
limitée par la forme urbaine
peu ouverte au ciel et des
vents affaiblis

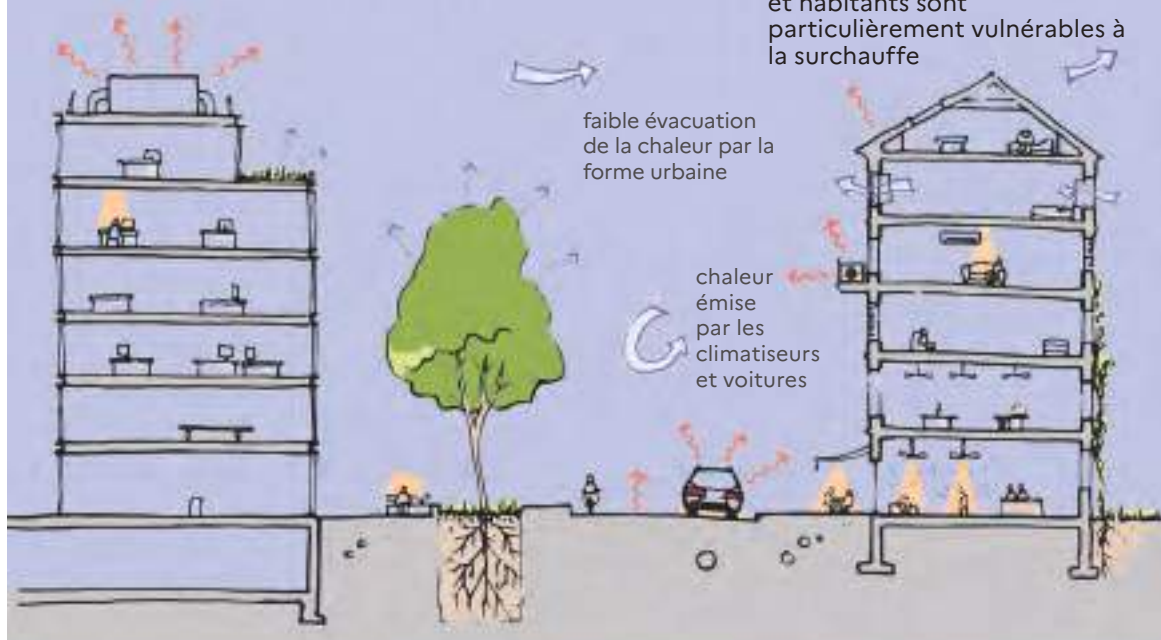
L'îlot de chaleur urbain se
manifeste principalement
la nuit en ville par des
températures d'air plus élevées
par rapport à la campagne



Certains logements
et habitants sont
particulièrement vulnérables à
la surchauffe

faible évacuation
de la chaleur par la
forme urbaine

chaleur
émise
par les
climatiseurs
et voitures



évapotranspiration du
végétal irrigué, il
rafraîchit l'air ambiant
sous forme de chaleur
latente

restitution de la chaleur
emmagasinée par les
revêtements minéraux à **inertie thermique**
forte, avec un temps de
déphasage

échange de chaleur
par convection lié au
vents



SOLUTIONS

Panorama des solutions de rafraîchissement urbain

Face à la complexité des enjeux, les stratégies de rafraîchissement de la ville se développent dans l'articulation des échelles (de la ville à l'individu), dans une approche dynamique (rythme journalier, saisonnier) et dans la complexité des systèmes urbains. Les conditions de leur application et leur efficacité associée sont variables en fonction des climats.

Afin de les rendre lisibles et appropriables, ce recueil présente de manière synthétique les principales composantes du rafraîchissement urbain selon 19 solutions classées en trois types : les solutions vertes, grises et douces.

(classification européenne EEA, 2013).

Les solutions présentées font l'objet de fiches détaillées à consulter à partir de la page 27.

Le tableau ci-contre identifie :

- où et à quelle échelle s'applique ces mesures ;
- les différents phénomènes physiques et biologiques en jeu (de façon significative).



Les solutions vertes

Les solutions vertes font intervenir les solutions fondées sur la nature (végétal, eau).



Les solutions grises

Les solutions grises rassemblent les solutions techniques relatives aux infrastructures urbaines : revêtements, mobilier urbain, bâtiments.



Les solutions douces

Les solutions douces relèvent des comportements et de la gestion urbaine.

Solutions	Applications			Phénomènes en jeu					
	ville	espace public	bâti	inertie thermique	albédo	ombrage	évaporation	vent	métabolisme chaleur anthropique
Parcs	●	●		●	●	●	●	●	
Arbres	●	●				●	●		
Pelouses, prairies		●					●		
Toiture végétalisée			●	●		●	●		
Façade végétalisée			●			●	●		
Plans d'eau, rivières		●		●			●		
Ouvrages paysagés de gestion des eaux pluviales		●					●		
Forme urbaine bioclimatique	●				●	●		●	
Fontaines, jets d'eau		●					●		
Arrosage de l'espace urbain	●	●					●		
Structures d'ombrages		●	●			●		●	
Panneaux solaires		●	●			●			
Revêtements à albédo élevé		●	●	●	●				
Revêtements drainants		●					●		
Revêtements à changement de phase		●	●	●					
Isolation et inertie thermique			●	●					
Réduction du trafic routier, des moteurs thermiques	●	●							●
Réduction de l'utilisation de la climatisation			●						●
Adaptations individuelles et sociétales aux fortes chaleurs	●								●

L'état des connaissances actuelles

Le rafraîchissement urbain est un domaine de recherche encore récent. Un grand nombre d'études et de publications ont vu le jour ces dernières années. Il reste toutefois encore un travail colossal avant de stabiliser des résultats reproductibles. En effet, la complexité des phénomènes physiques en jeu, la diversité des contextes, des méthodes, des grandeurs des études réalisées, le nombre encore trop faible d'études sur certaines solutions, sont autant de raisons qui nous amènent à prendre des précautions sur la généralisation des valeurs d'efficacité trouvées dans la littérature disponible.

L'enjeu, à ce stade, reste donc de multiplier les expérimentations et les démarches d'évaluation, et de capitaliser des données chiffrées. Aussi, nous encourageons les maîtres d'ouvrage et collectivités à intégrer une démarche de suivi et d'évaluation dans leurs opérations d'aménagement, soit en associant des acteurs de la recherche, soit via des missions d'évaluation spécifiques.

Voici quelques clefs de lecture pour comprendre.

Une diversité de méthodes

Parmi les études analysées, on distingue trois types de méthodologies employées pour évaluer l'impact des solutions de rafraîchissement. Chacune a des intérêts et

des limites et les résultats obtenus par un type de méthode sont difficilement comparables, ce qui rend complexe la synthèse des résultats.

- Les **expérimentations et les mesures de terrain** sont des méthodes d'évaluation en conditions réelles, ce qui est un atout. Elles relèvent cependant, de cas particuliers (climat, temporalité, situation), ce qui rend difficile la généralisation des résultats obtenus.
- Les **modèles numériques** proposent des éléments intéressants par leur capacité à produire des résultats généralisables ou à comparer des scénarii. Cependant, ils ont certaines limites. En général, les modèles simplifient les phénomènes physiques, voire la géométrie de la ville avec des hypothèses de projet parfois peu réalistes.
- Les **analyses statistiques** de santé publique (mortalité, admission aux urgences) peuvent être utilisées pour étudier l'efficacité des mesures dans un temps long mais ces études ne permettent pas de définir clairement des liens de causalité, mais seulement des corrélations.

Une diversité d'indicateurs

En plus de la diversité des méthodes d'analyse, les études font appel à une multitude d'indicateurs afin d'évaluer l'efficacité en termes de rafraîchissement. Ces indicateurs peuvent être des variables physiques mesurables ou calculées par agrégation de plusieurs variables. Nous avons sélectionné trois indicateurs jugés comme les plus pertinents :

- **la température de l'air** : dans les mesures de terrain, cet indicateur est facile à mesurer, exploiter et comparer, même si une attention particulière doit être prise sur le matériel de mesures. En ce qui concerne les modèles, c'est en général une résultante du calcul. Cet indicateur reste le plus pertinent sur l'analyse de l'îlot de chaleur mais pour le ressenti thermique, il est partiel.
- **les indices de confort** : les différentes études n'utilisent pas les mêmes indices de confort thermique et il n'existe pas d'équivalences entre tous les indices. Les indices UTCI

(universal thermal climate index) et PET (physiological equivalent temperature) sont les plus utilisés. La température moyenne radiante est une grandeur intégrée à la plupart des indices de confort qui est aussi une des valeurs les plus difficiles d'accès tant par calcul que par mesure.

- **la température de surface** : elle varie très fortement en fonction de l'exposition au soleil et du vent. Cette grandeur impacte le confort thermique par le biais de la température moyenne radiante et sur la température d'air par le biais du phénomène de convection.

Une diversité de climats

Les études conduites se situent dans le monde entier avec des caractéristiques climatiques diverses mais aussi des formes urbaines et aménagements particuliers. L'efficacité des solutions peut dépendre de la localisation en termes de latitude et d'altitude et donc de hauteur solaire et d'intensité du rayonnement, mais aussi de l'ensemble des variables climatiques, notamment l'humidité. De plus, **il est important de considérer l'évolution du climat au regard du changement climatique.**

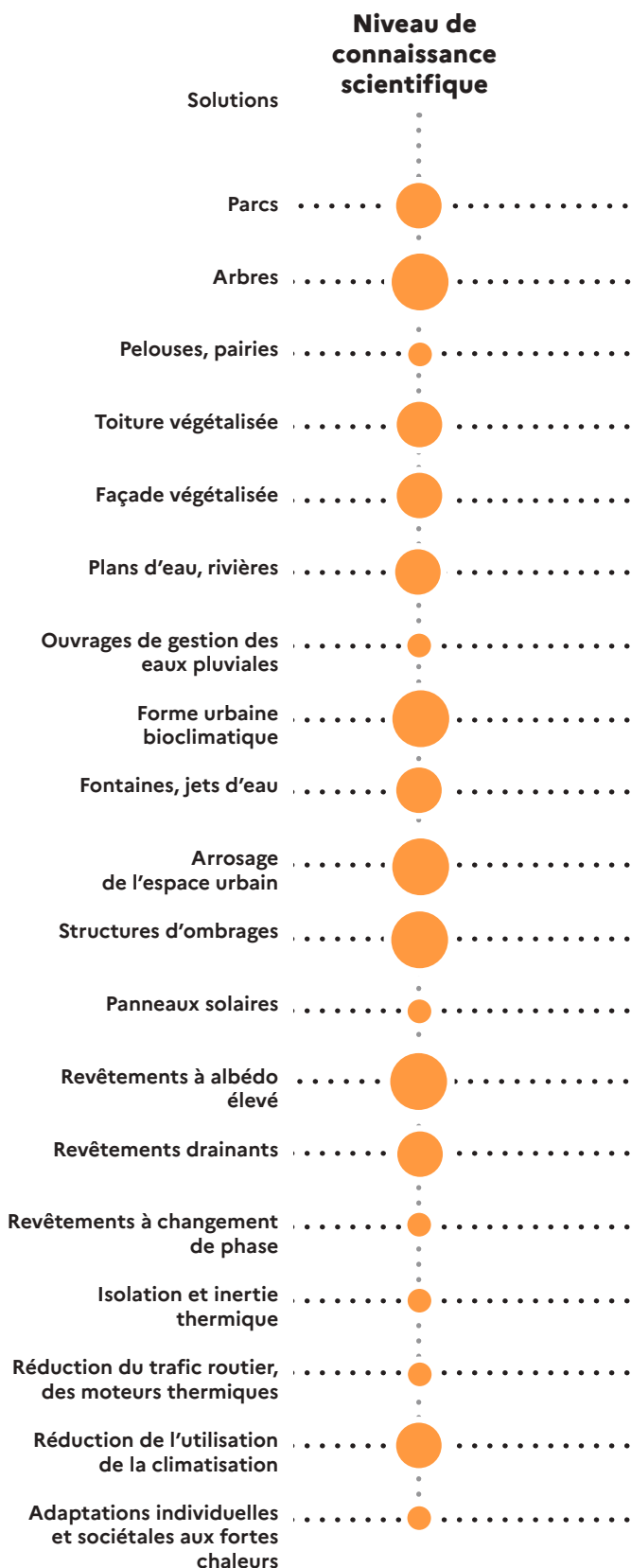
Dans le cadre de ce guide, nous avons ciblé les climats suivants (codification selon Köppen-Geiger) :

- **climat tempéré chaud sans saison sèche** : climat majoritaire de la France métropolitaine actuellement (Cfb, Cfa) ;
- **climat tempéré chaud avec saison sèche** : méditerranée, tendances futures en France métropolitaine (Csa, Csb) ;
- **climat tropical** : Outre-mer (Aw, Af).

Le schéma ci-contre décrit le niveau de connaissance scientifique retenu selon le nombre d'études de cas identifiées et de la concordance des résultats.

Niveau de connaissance scientifique

-  bon
-  moyen
-  faible



Efficacité des solutions

Pour aider au choix, nous proposons ici une synthèse qui hiérarchise l'efficacité de 19 principales solutions de rafraîchissement urbain.

Cette synthèse est basée sur l'analyse bibliographique des impacts des solutions présentées dans ce guide. L'efficacité des solutions (exprimée dans les études en indicateurs de confort et de température) est traduite ici en une échelle relative d'efficacité, depuis l'effet nul jusqu'aux effets très positifs.

Cette classification peut varier en fonction du contexte climatique. L'efficacité des solutions vertes dans des climats ayant des périodes de sécheresse, est alors conditionnée à l'accès à l'eau.

Les solutions de rafraîchissement sont plus ou moins efficaces selon l'échelle d'action, de la ville ou du piéton, et selon le jour ou la nuit.

Le choix des solutions est à sélectionner au regard du besoin exprimé.

A l'échelle de la ville

On parle d'une action globale sur le climat urbain, particulièrement la nuit, où l'effet d'îlot de chaleur urbain est le plus prégnant. Mises en œuvre largement, ces solutions contribuent à réduire la température de l'air sur l'ensemble d'une ville ou d'un quartier. Les leviers d'actions sont :

- limiter le piégeage de la chaleur par une forme urbaine ouverte aux vents et au ciel et par des revêtements urbains à albédo élevé et inertie faible ;
- favoriser l'évaporation et l'évapotranspiration en ville par des solutions fondées sur la nature ;
- réduire la chaleur anthropique émise par les véhicules et les climatiseurs.

La mise en œuvre de toitures à albédo élevé, de toitures végétalisées et d'isolation par l'extérieur ont par exemple un impact significatif sur l'absorption et la dissipation de chaleur de l'environnement urbain.

A l'échelle du piéton

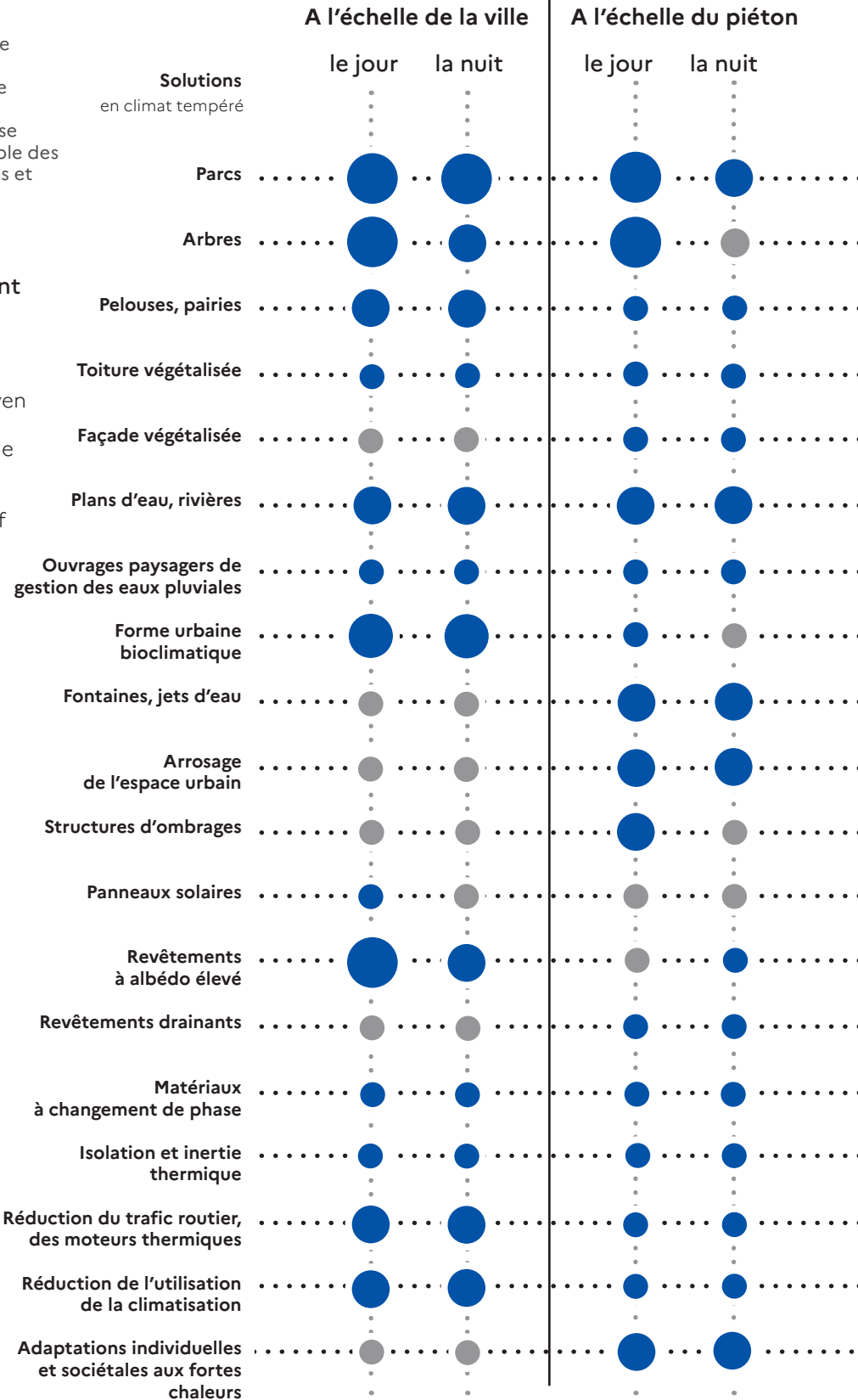
L'action est localisée sur l'usager des espaces extérieurs. Les solutions efficaces à cette échelle améliorent nettement le ressenti thermique de l'usager. Elles agissent sur les paramètres physiques du confort : température d'air, température moyenne radiante (rayonnement du soleil et des surfaces), vitesse des vents, hygrométrie.

Par exemple, l'ombre produite par les arbres et les structures d'ombrage a un impact majeur sur le confort du piéton alors que la température d'air change très faiblement. Mesurer l'efficacité de rafraîchissement nécessite donc d'employer des indices de confort tels que l'UTCI (universal thermal climate index), le PET (physiological equivalent temperature), etc.

Le schéma ci-contre décrit l'effet de rafraîchissement de chaque solution. Il résulte d'une analyse croisée de l'ensemble des résultats des études et publications.

Effet de rafraîchissement

-  effet fort
-  effet moyen
-  effet faible
-  effet non significatif



Impacts et cobénéfices des solutions

Dans une démarche de projet, les solutions de rafraîchissement urbain sont à évaluer selon une approche multicritère afin de maximiser les bénéfices rendus et limiter les impacts au regard des enjeux environnementaux, économiques et sociaux. Voici la sélection des critères pris en considération.

Cobénéfices

Biodiversité : capacité à accueillir la faune, la flore et à participer à son développement.

Gestion de l'eau pluviale : capacité à gérer les eaux pluviales et les épisodes orageux.

Séquestration carbone : capacité à stocker le dioxyde de carbone présent dans l'air, gaz responsable du changement climatique.

Qualité urbaine et paysagère : contribution à l'attractivité, l'esthétique, à la valorisation patrimoniale et au design urbain.

Usages et socialité : support d'usages sociaux, multifonctionnalité de la solution.

Santé : impacts sur la santé humaine hors ceux associés à la chaleur : allergies, toxicité, risques infectieux, substances cancérogènes...

Confort : autre que le confort thermique, renvoie principalement au confort acoustique et visuel.

Impacts

Empreinte carbone : émissions de gaz à effet de serre liées à la fabrication, l'exploitation et la fin de vie.

Consommation énergétique : consommation en électricité ou chaleur durant l'exploitation.

Consommation d'eau potable : consommation d'eau durant l'exploitation.

Ressources : quantité de ressources non renouvelables consommées pour la fabrication au regard de sa durée de vie (pérennité) et sa fin de vie (réemploi, recyclage...).

Coût global : coûts directs liés à l'investissement et l'exploitation de la solution.

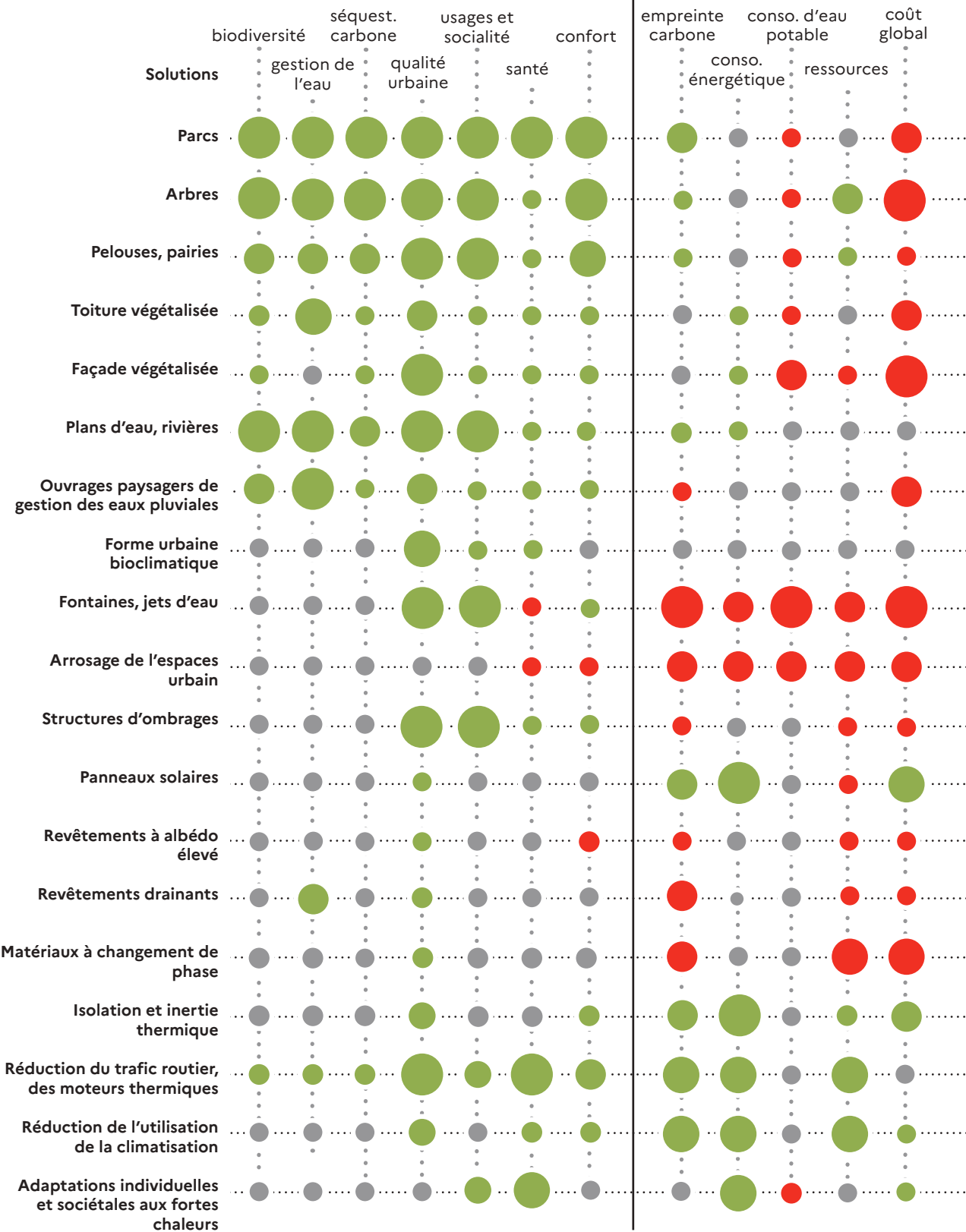
La pondération des cobénéfices et impacts dans le schéma ci-contre est une première approche simplifiée issue de la synthèse qualitative de l'état de l'art réalisé, celle-ci est explicitée par solution dans les fiches détaillées (après la page 27).

Impacts et Cobénéfices

-  effet très positif
-  effet positif
-  effet neutre
-  effet négatif
-  effet très négatif

Cobénéfices

Impacts



Combinaison des solutions

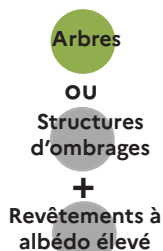
Même si ce guide présente une approche par solution de rafraîchissement, aucune solution ne peut résoudre seule la problématique de la surchauffe urbaine. Ainsi les projets urbains combinent généralement plusieurs solutions. Il est alors important de prendre en considération le fait que certaines solutions ne sont pas compatibles, voire s'annulent entre elles, tandis que d'autres agiront en synergie.

Des exemples d'études et de projets opérationnels illustrent les possibles combinaisons sur les page suivantes.

Le schéma ci-dessous présente les principales combinaisons ayant des effets qui s'annulent ou qui se multiplient.

Antagonismes

les effets s'annulent



L'efficacité de l'ombrage, qu'il soit produit par des arbres ou des structures d'ombrage, est réduite si en parallèle des revêtements à albédo élevé sont mis en place. D'autre part l'ombrage réduit l'efficacité des revêtements à albédo élevé.

les effets s'additionnent



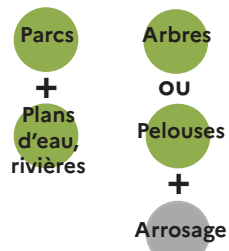
Des toitures solaires et végétalisées peuvent se combiner.



Toutes les solutions douces se combinent avec toutes les solutions vertes et grises.

Synergies

les effets se multiplient



La présence de surface d'eau ou l'irrigation amplifie l'effet de rafraîchissement des espaces végétalisés.



Evaluation de trois mesures d'adaptation à l'échelle de la ville de Paris en cas de vague de chaleur

Une étude de modélisation appliquée à l'échelle de la ville de Paris a évalué l'efficacité d'une combinaison de plusieurs solutions de rafraîchissement urbain afin d'évaluer l'impact sur la demande en climatisation et le stress thermique des piétons en cas de vague de chaleur.

Les différents actions testées sont :

- la création de parcs et espaces verts irrigués représentant 10% des espaces de la ville ;
- l'isolation des bâtiments et l'intégration de revêtements à albédo élevé à l'exception des bâtiments patrimoniaux ;
- l'augmentation des températures de consignes de la climatisation de 23°C à 26°C (bureaux) et 28°C (résidentiel).

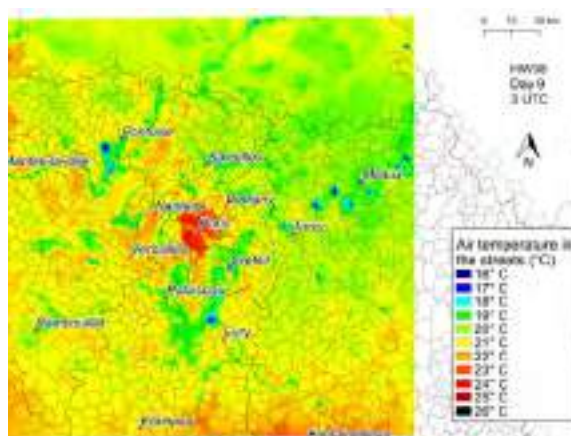
Lorsqu'elles sont mises en œuvre ensemble, les trois mesures permettent un rafraîchissement de l'air extérieur jusqu'à 4,2 °C la nuit et une réduction des consommations énergétiques de 60%.

L'étude s'appuie sur plusieurs modèles intégrant une partie importante des phénomènes microclimatiques urbains. Les modèles urbains TEB (Town Energy Balance ; Masson, 2000) et SURFEX prennent en considération le fonctionnement énergétique des bâtiments et les interactions entre le bâti et la végétation (ombrages, évapotranspiration).

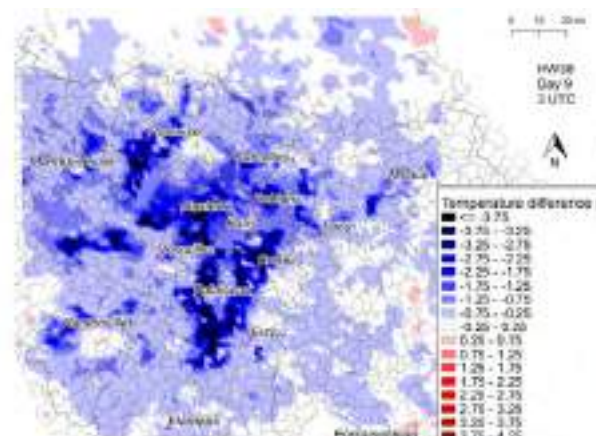
Auteurs : CIRED : Viguié, V., CNRM : Lemonsu, A, Beaulant, A.-L., Marchadier, C., Masson, V., Pigeon, G.T, The World Bank, Hallegatte, S; CSTB : Salagnac, J.-L



Quantification de l'efficacité de chaque solution



Impact des trois mesures combinées sur la température de l'air dans les rues à 4h du matin, après 9 jours d'une vague de chaleur similaire à celle de 2003.



Impact des trois mesures combinées sur le rafraîchissement : différence de température par rapport à l'absence de mesures.



Revêtements à
albédo élevé

Réduction du
trafic routier

La requalification de l'avenue Garibaldi à Lyon

Le projet d'aménagement a intégré plusieurs solutions de rafraîchissement :

- la **végétalisation** par des **bandes plantées** qui recueillent les eaux de pluie ;
- l'**arrosage des espaces verts** dans les **périodes de canicule** ;
- l'utilisation de **revêtements en béton clair** sur les trottoirs ;
- la **réduction du trafic automobile** par la limitation des voies de circulation.

Depuis 2016, le projet exemplaire fait l'objet d'un suivi agrométéorologique (microdendrométrie, température d'air, température globe noir, humidité relative, vitesse du vent,) dans le but d'évaluer l'efficacité des aménagements réalisés. L'arrosage des espaces végétalisés pendant les périodes de canicule et de sécheresse montrent que le phénomène d'évapotranspiration des arbres est maintenu et participe à l'amélioration du confort thermique.

Les premiers résultats ont montré que pendant les périodes caniculaires, la présence de la végétation fait baisser la température ambiante de 1,8 à 2,3°C en moyenne absolue par rapport à la station Météo de Lyon-Bron et améliore le confort thermique de 9°C UTCI par rapport à une zone minérale.

Ces effets rafraichissants sont augmentés d'environ 55% grâce à l'arrosage des végétaux par l'eau pluviale stockée sur site dans un bassin enterré. L'impact de ces apports d'eau sur le confort thermique est d'autant plus efficace qu'ils sont réalisés 3 à 4 jours avant le début de la canicule.

Auteurs : Métropole de Lyon : Frédéric Ségur, Luce Ponsar, Hydrasol : Abdelkader Bensaoud, Urbasense: Thomas Bur.

Maître d'œuvre : Atelier des Paysages



Rue Garibaldi, Lyon

Arbres

Revêtements
drainants

Revêtements à
albédo élevé

« Lisière d'une tierce forêt » végétalisation d'une aire de stationnements à Aubervilliers

Le projet a intégré plusieurs solutions de rafraîchissement :

- la **plantation de 72 arbres** ;
- l'**aménagement de revêtements clairs et poreux**.

Un parking privatif recouvert d'enrobé bitumineux a été requalifié avec un revêtement en béton poreux et des plantations denses d'arbres. Une évaluation de l'impact rafraîchissant a été menée sur le stress thermique d'un piéton, grâce à des mesures fixes et mobiles. Des effets bénéfiques pour le stress thermique sont observés suite notamment à la création d'ombrage par les nouveaux arbres se traduisant par une réduction de la température de l'air et de la température moyenne de rayonnement.

- 0,3°C à -1°C de température d'air
- 6° à -2,5°C UTCI (indice de confort)
C'est l'effet de rafraîchissement mesuré des aménagements. (Parison, 2020)

Évaluation microclimatique : LIED : Martin Hendel, Sophie Parison, Maxime Chaumont, Météo-France : Raphaëlle Kounkou-Arnaud, Frédéric Long
Maître d'œuvre : Fieldwork architecture : Andrej Bernik, Marcos Da Silva
Maîtrise d'ouvrage : Alteralia : Patricia Robert
Projet réalisé à Aubervilliers en 2020



Aubervilliers, Tierce Forêt

Déclinaison opérationnelle

Il existe une multitude de leviers pour la mise en œuvre des solutions de rafraîchissement urbain qui s'intègrent à toutes les échelles et à toutes les étapes du processus opérationnel de l'urbain. La dimension transversale des solutions de rafraîchissement s'articule dans les outils d'urbanisme de stratégie et de planification, et se décline dans les études de conception et de mise en œuvre des projets d'aménagement de quartiers, espaces publics, de construction et rénovations de bâtiments.

Processus opérationnel

● diagnostiquer

- Etablir un diagnostic préalable de la surchauffe urbaine
- [Diagnostic de la surchauffe urbaine : recueil des méthodes et applications territoriales ADEME, 2017](#)

● agir et optimiser

- Intégrer le rafraîchissement urbain dans les outils de planification urbaine et stratégique et dans les projets dès les phases programmation et de conception
- [Kit des données clés de l'adaptation, ADEME, 2020](#)

● évaluer

- Evaluer l'efficacité des solutions (campagne de mesures, approche statistique)
- ▼ Capitaliser les enseignements et diffuser les bonnes pratiques.

La commune de Villeurbanne a entrepris une démarche de rafraîchissement urbain déclinée en différentes missions :

1. diagnostic des enjeux de surchauffe urbaine sur l'ensemble du territoire communal et évaluation des effets des actions de végétalisation déjà engagées ;
2. élaboration d'un plan d'action en concertation avec les services techniques ;
3. actions opérationnelles ciblées :
 - « Plan ombre » : analyse et préconisations d'ombrage sur tous les parcs de la ville ;
 - « Plan arbres » : scénarios de plantation d'arbres sur les voiries et espaces publics.

Les études ont mobilisé un grand nombre de services de la ville, dans une démarche de projet associant comités techniques et comités de pilotage politiques.

Services de la ville concernés : Direction générale du développement urbain dont les services « Qualité urbaine et PLU » et « SIG » ; Direction générale des services techniques et de l'environnement dont les directions « Bâtiments », « Paysages et nature », « Etudes et projets » ; Direction de la Santé publique et en présence du Directeur Général des Services. (TRIBU, 2018)



cartographie des zones climatiques locales



cartographie des espaces de fraîcheur accessibles à tous

Solutions	Outils de planification	Outils opérationnels
Parcs, arbres, pelouses, toiture végétalisée, façade végétalisée, plans d'eau, rivières, ouvrages paysagers de gestion des eaux pluviales, revêtements poreux	• PCAET, plan climat : actions de rafraîchissement urbain • PLU, PLUI, plan local d'urbanisme: intégration des trames vertes et bleues, coefficient de biotope, coefficient de ruissellement, de pleine-terre, volume de rétention minimal paysagé • OAP, orientations d'aménagement et SPR, secteur patrimonial : préconisations sur la végétalisation, sur l'palette végétale • Démarches volontaires : Plan Canopée, Plan arbre, Plan de désimperméabilisation et de végétalisation, etc...	• Intégrer un bureau d'études spécialisé dans les opérations • Programmation et cahiers des charges des bâtiments, des espaces publics • Labels EcoQuartier et autres • Permis de végétaliser, végétalisation participative, initiatives citoyennes • Aides à la végétalisation et à la désimperméabilisation pour les parcelles privées
Forme urbaine bioclimatique	• SCOT : objectifs de densités adaptés • PLU : règlement du bâti, emprise au sol (CES), densité bâtie (COS), hauteurs, prospects (H/L) • OAP : principes de composition	• Intégrer un bureau d'études spécialisé • Etudes de plan masse • Programmation • Cahiers des charges • des charges • Labels EcoQuartier et autres
Arrosage de l'espace urbain, brumisateurs, fontaines, structures d'ombrages extérieures		• Programmation et cahiers des charges des espaces publics • Intégrer un bureau d'études spécialisé
Revêtements à albédo élevé, matériaux à changement de phase, panneaux solaires, Isolation thermique	• PLU, SPR : préconisations sur le traitement des toitures • Mise en place d'un référentiel des espaces publics pour le choix des matériaux • OPAH, OPATB, plateformes de rénovation	• Programmation et cahiers des charges des bâtiments, des espaces publics • Intégrer un bureau d'études spécialisé • Aides à la rénovation
Réduction du trafic routier, moteurs	• PDM : Plan de mobilité • ZFE : Zone à faible émission	• Programmation et cahier des charges des aménagements de voiries : limiter l'emprise automobile
Réduction de l'utilisation de la climatisation		• Programmation et cahiers des charges des bâtiments, • Réglementation RE2020 et labels de constructions (HQE, LEED, BREEAM, etc), • Aides à la rénovation
Comportements adaptatifs, politiques d'adaptation aux fortes chaleurs	• Plan canicule • Campagnes de sensibilisation • Plan des espaces de fraîcheur de proximité	• Accompagnement des habitants et usagers aux bonnes pratiques

Le tableau ci-dessus propose des exemples d'outils et de méthodes opérationnels. Les acronymes sont détaillés dans le glossaire.



Parc à Villeurbanne (69)

LES SOLUTIONS VERTES

Pourvoyeuses de nombreux cobénéfices, les solutions vertes, ou Solutions fondées sur la Nature (SfN) font l'objet d'un intérêt croissant de la part de la société civile, mais aussi des scientifiques.

Les solutions fondées sur la nature s'appuient sur :

- le végétal : strate herbacée, strate arborée, le végétal intégré au bâti, arrosé ou non, aux espèces et niveaux de gestion variés ;
- l'eau : les plans d'eau, cours d'eau, fleuves, bassins paysagers, noues...

La combinaison de différents types de solutions vertes peut permettre d'agir en synergie sur un même objectif d'adaptation ou d'atténuation sur différents types d'impacts (diminution du stress thermique, des consommations énergétiques pour satisfaire les besoins de froid, du ruissellement des eaux de pluie, des débordements des réseaux et des inondations notamment).

Le rafraîchissement, l'amélioration du confort thermique et la réduction de la demande en climatisation sont d'autant plus marqués que le taux de végétalisation est élevé.

La ressource en eau en été est une condition importante au pouvoir rafraîchissant de la végétation urbaine. Par conséquent, en climat méditerranéen et aride, représentatif d'une partie du climat futur en France métropolitaine, il faudra considérer la disponibilité en eau dans les épisodes de sécheresses.

Pour aller plus loin :

- [Des Solutions fondées sur la Nature pour s'adapter au changement climatique, Rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, la Documentation française, Paris, 2019](#)
- [Fiches Nature4Cities, traduction française CEREMA, 2020](#)
- [Végétaliser, agir pour le rafraîchissement urbain ADEME, 2020](#)
- [Le projet Life ARTISAN sur les Solutions d'Adaptation fondées sur la Nature \(2021\)](#)
- [Arbre en milieu urbain, outil Arboclimat et outil SESAME, ADEME, 2020](#)

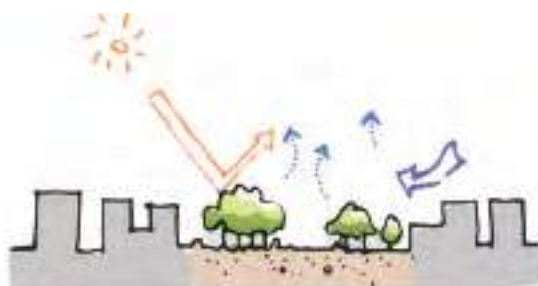
Les parcs

Les parcs sont des objets urbains constitués d'espaces arborés, de prairies ou de pelouses, de buissons, éventuellement de surfaces ou cours d'eau et d'espaces construits (cheminements, petites constructions) accessibles à tous.

L'effet du parc diffère de l'effet d'arbres isolés ou d'alignement en raison d'une plus forte concentration de végétation qui peut permettre d'atteindre un effet d'oasis de fraîcheur.

L'effet de refroidissement dépend fortement de l'eau disponible pour la végétation : s'il n'y a aucun recours à l'arrosage pendant les vagues de chaleur, l'effet de refroidissement pourrait être divisé par 4.

Beaucoup d'études ont démontré que les parcs constituent de réels îlots de fraîcheur. L'effet de rafraîchissement diffère selon la taille et le type de parc (couverture arborée ou pelouse), les caractéristiques des plantes et la configuration spatiale du parc.



Phénomènes en jeu : par l'évapotranspiration des végétaux et les effets d'ombrage dus aux arbres. Le végétal absorbe le rayonnement solaire et infrarouge incident et utilise l'énergie pour la photosynthèse et évapore l'eau qu'il contient.



Quartier Massena, Paris (75)

Effet dans le parc

- Plus la couverture arborée est importante, plus les parcs sont frais.
- Les parcs enherbés peuvent être plus chauds que les zones minérales alentours. En effet, ils peuvent être plus ensoleillés que les espaces urbanisés, ombragés par les bâtiments.
- La taille du parc est corrélée à l'effet de rafraîchissement. La relation n'est pas linéaire, et certaines études font apparaître une taille seuil à partir de laquelle il n'y a plus d'effet supplémentaire. Cette taille seuil diffère entre les études : a été identifié par exemple, 0,69ha à Copenhague (G. Yang et al., 2020) et 5,6 ha à Leipzig (Jaganmohan et al., 2016).
- La forme du parc : les petits parcs de forme allongée et irrégulière ont peu d'effet de rafraîchissement car leur grand périmètre d'interface avec les zones minérales favorise l'entrée d'air chaud.

5,9°C

à Göteborg en Suède, différence de T° maximale entre le parc et son environnement construit (Konarska et al., 2016)

0,15°C / 1,2°C / 4,2°C

dans le parc olympique de Pékin, différence de T° maximale entre les zones enherbées non irriguées / les zones enherbées irriguées / les zones arborées du parc et l'environnement construit alentours (Amani-Beni et al., 2018)

Effet au-delà du parc

- La distance de rafraîchissement est généralement corrélée à la couverture arborée.
- Dans la majorité des études, il est montré que plus les parcs sont grands, plus l'intensité du rafraîchissement de l'environnement est importante.
- L'effet de rafraîchissement est généralement plus intense et plus étendu dans la direction de la plus grande largeur du parc.

2km

à Mexico, distance d'effet de rafraîchissement observée du parc (Yu et al., 2020)

1,3°C

à Singapour, c'est l'effet de rafraîchissement mesuré en moyenne autour des parcs (Wong et Yu, 2005)

Les parcs

Rafrâichissement

+++ Etat des connaissances

Moyenne : il y a beaucoup d'études, mais elles ne font ressortir que quelques grandes tendances et peinent à expliquer l'impact de la forme urbaine sur l'effet de rafraîchissement des parcs

+++ A l'échelle de la ville

Baisse des températures par évapotranspiration

+++ A l'échelle du piéton

en climat sec, l'ombrage est le facteur le plus important de rafraîchissement

Cobénéfices

+++ Biodiversité

Habitat pour la biodiversité. Idéal pour développer une trame verte ou bleue

+++ Gestion de l'eau pluviale

Sols perméables, qui permettent le tamponnage et l'infiltration de l'eau en cas d'orage, réduction des risques d'inondation, amélioration de la qualité de l'eau

+++ Séquestration carbone

Captation du CO2 par les végétaux et par les sols

+++ Qualité urbaine et paysagère

Renforcement de la présence du végétal en ville

+++ Usages et socialité

Lieu de rencontre, de promenade, de repos, de jeux et de pratique sportive pour tous

+++ Santé

Favorise l'activité physique et la réduction du stress. Une action sensible sur la qualité de l'air par fixation des particules. Les pollens peuvent être vecteur d'allergies cependant

+++ Confort

Amélioration du confort urbain par la création d'ambiance visuelle et acoustique apaisée

Impacts

+++ Empreinte carbone

Faible, liée principalement aux terrassements et aménagements

+++ Consommation énergétique

Négligeable, liée à l'éclairage

+++ Consommation d'eau potable

Arrosage les premières années ou tout au long de la vie du végétal, selon les espèces

+++ Coût global

Coût d'investissement : 100 à 300€/m²

Coût d'exploitation : 5 à 20€/m².an

Entretien des espaces verts : élagage, tonte ou fauche, surveillance de la présence de bioagresseurs, ramassage des déchets, maintenance des systèmes d'irrigation, etc

Les arbres

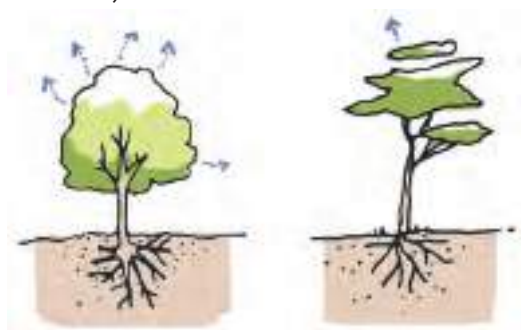
Les arbres apparaissent à trois échelles :

- l'arbre isolé, dans un parc, une rue ou sur une place,
- les alignements d'arbres dans les rues, qui peuvent se trouver de part et d'autre de la rue, sur un seul côté ou en rangée centrale
- à l'échelle de la ville, la canopée arborée urbaine, patrimoine arboré, ou forêt urbaine si l'on traduit l'expression anglo-saxonne « urban forest », qui intègre l'ensemble des arbres de la ville.

L'ensemble des études se rejoint pour démontrer l'efficacité de l'arbre dans le rafraîchissement urbain, principalement du fait de l'ombrage. Le degré d'efficacité dépend cependant de la densité d'arbres, de la densité de feuillage des arbres, de l'essence, de la disponibilité en eau du sol, du revêtement de sol au pied de l'arbre, de la qualité du sol (compactage). La nuit, une couverture arborée importante peut réduire le rafraîchissement des surfaces minérales (obstacle à la vue du ciel et au vent).



Phénomènes en jeu : évapotranspiration et ombrage. Par contre, leur résistance au vent réduit la vitesse de l'air, et leur transpiration augmente l'humidité, ce qui en été, peut dégrader la sensation de confort.



Le pouvoir d'évapotranspiration dépend fortement de l'essence et de la disponibilité en eau. Les conifères plus résistants à la sécheresse ont un pouvoir rafraîchissant moindre que les feuillus.

Quartier Galbert,
Annecy (74)



A l'échelle de l'arbre

- Pour un arbre isolé, l'effet de rafraîchissement est principalement dû à l'ombrage (plus qu'à l'évaporation)
- Plus la densité de feuillage est importante, plus l'effet de rafraîchissement est fort en journée.
- 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.

3°C

Les études s'accordent sur cet effet maximal sur la température d'air pour les arbres plantés dans des parcs dans des villes de latitude moyenne. (Rahman et al., 2020)

2,1 °C (température de l'air)

10,3 °C UTCI (indice de confort)

Durant la journée, c'est l'effet de refroidissement moyen d'un arbre dans un parc de Hong-Kong (Kong et al., 2017)

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.
- Le couvert arboré a tendance à limiter le rafraîchissement nocturne en piégant la chaleur liée à l'absence d'ouverture au ciel et la réduction du vent.
- Recommandations de plantations (selon Morakinyo et al., 2020) :
 - > Rues étroites et hautes : non prioritaires, car l'ombrage est déjà important ;
 - > Rues de hauteur et largeur de même ordre de grandeur : 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.

2 à 3°C

Ce sont les effets maximaux sur la température d'air dans des rues, en présence d'alignements d'arbres.

A l'échelle de la ville

2,5°C

Effet maximal de rafraîchissement de l'air à Paris, pendant la canicule de 2003, qu'aurait généré la plantation d'arbres associés à une strate basse sur 75% des surfaces disponibles au sol (calcul par simulation, de Munck, 2013). Cette efficacité est surtout vérifiée de nuit.

Les arbres

Rafrâichissement

+++ Etat des connaissances

Bonne : beaucoup de travaux aux différentes échelles, les derniers portent sur le comportement thermique de différentes essences d'arbres

+++ A l'échelle de la ville

Effet sur la baisse de température par évapotranspiration

+++ A l'échelle du piéton

L'ombrage et l'évapotranspiration améliore fortement le confort en journée. La nuit, l'effet est neutre

Cobénéfices

+++ Biodiversité

Abrite de nombreuses espèces, avifaune, insectes...

+++ Gestion de l'eau pluviale

Percolation de l'eau pluviale par le feuillage, infiltration et tamponnage par les racines, en fonction du traitement du pied d'arbre, participation à la dépollution de l'eau

+++ Séquestration carbone

Captation du CO2 par les arbres pour la photosynthèse

+++ Qualité urbaine et paysagère

Qualité des vues

+++ Usages et socialité

Filtre les vis-à-vis des logements sur rue, dans l'espace public.

+++ Santé

Bénéfices en santé mentale associés à la vue du végétal. Filtration des particules fines. Mais abrite parfois des indésirables, pouvoir allergène.

+++ Confort

Amélioration du confort visuel lié à l'ombrage, amélioration de l'ambiance acoustique

Impacts

+++ Empreinte carbone

La séquestration carbone compense les émissions liées aux fosses de plantation, l'entretien ramassage des feuilles

+++ Consommation énergétique

Nulle

+++ Consommation d'eau potable

Besoin d'arrosage les premières années si le climat est trop sec

+++ Ressources

Renouvelable, réemploi ou valorisation énergétique possible

+++ Coût global

Coût d'investissement : 1000€/arbre (plantation, fosse..)

Coût d'exploitation : élagage 50€/arbre par an, suivi de l'état phytosanitaire

Les pelouses, prairies

Les espaces enherbés sont caractérisés par une végétation herbacée poussant dans des sols perméables. Ils sont gérés de manière plus ou moins intensive. Cette végétation herbacée se rencontre sous diverses formes en fonction des usages :

- les pelouses avec gestion horticole, elles sont le plus souvent présentes dans les parcs de centre-ville. Leur aménagement est très structuré et elles font l'objet d'un soin particulier (tonte régulière avec ramassage de l'herbe, fertilisation, arrosage).
- les prairies urbaines présentes dans les parcs et espaces naturels aménagés, elles sont gérées de façon extensive, elles sont fauchées une fois par an.



Phénomènes en jeu : évapotranspiration et albédo. Le pouvoir d'évapotranspiration dépend de la disponibilité en eau.



Jardin Partagé, La Réserve, Gerland, Lyon (69)

Les zones enherbées contribuent à rafraîchir la ville, mais de manière mesurée. En journée, dans un environnement ouvert et exposé aux rayons du soleil, même si la température du sol enherbé est inférieure à celle de surfaces minérales, des mesures de température de confort (globe noir) ne permettent pas de mesurer un impact significatif de la pelouse (Armson, 2012). En journée toujours, dans des formes urbaines denses où les rayons du soleil atteignent le sol, l'herbe limite l'échauffement de la ville (de Münck, 2012). Par contre, si les sols sont ombragés, l'effet de rafraîchissement est nul. La nuit, les zones herbacées ne réémettent pas de chaleur, à la différence des revêtements minéraux sombres. L'irrigation améliore fortement l'effet de rafraîchissement de la pelouse.

A l'échelle locale

- L'effet observé dépend de l'ensoleillement : Les zones enherbées peuvent être plus chaudes que les zones minérales alentour. En effet, elles peuvent être plus ensoleillées que les espaces urbanisés, ombragés par les bâtiments.
- A ensoleillement égal, un sol enherbé ne modifie pas beaucoup le confort thermique dans un espace dégagé en journée : l'effet sur la température de l'air est à peine perceptible et la contribution du rayonnement solaire est trop importante pour que la diminution du rayonnement infrarouge en provenance du sol fasse une différence sur la température moyenne radiante.
- Pour une personne allongée, la fraîcheur de la surface enherbée est appréciable en période estivale. Cependant, la plus grande exposition au rayonnement solaire et la diminution du vent au niveau du sol vont avoir un effet inverse d'augmentation du stress thermique.
- Un sol herbacé tend à limiter les échauffements dans les rues bien ensoleillées : le sol reste à une température proche de l'air, il émet moins de rayonnement infrarouge ce qui occasionne une diminution de la température des façades, et donc de la température de l'air extérieure et de la température intérieure des bâtiments.

0,15°C (1) / 1,2°C (2)

dans le parc olympique de Pékin, différence de T° maximale entre les zones enherbées non irriguées (1), les zones enherbées irriguées (2) et l'environnement construit alentour (Amani-Beni et al., 2018)

0,1°C à 1°C

Différence de température ambiante observée dans 7 études scientifiques entre des zones enherbées et des zones minérales environnantes (Santamouris et al, 2016)

A l'échelle de la ville

- L'efficacité de la végétalisation des sols à grande échelle sur l'îlot de chaleur urbain est méconnue.

Météo France a modélisé le verdissement par une strate végétale basse de 75% des surfaces disponibles à Paris (trottoirs, ronds-points, places, parkings...). Dans ces modélisations, la pelouse est arrosée la nuit : les températures ambiantes maximales parisiennes baissent en moyenne de 1 à 3°C. L'impact de la pelouse sans arrosage n'est pas modélisé (VEGDUD, 2014)

A Hong Kong, la végétalisation massive des sols (jusqu'à 56% de l'espace urbain) n'a pas d'effet sur le confort du piéton dans une ville dense, marquée par des immeubles extrêmement hauts. (modélisation, Ng et al, 2012)

Les pelouses, prairies

Rafraîchissement

+○○ Etat des connaissances

- Moyenne à l'échelle locale (assez peu de travaux)
- Très faible à l'échelle urbaine (très peu de travaux, dans des contextes trop spécifiques ou avec des hypothèses questionnables)

+○○ A l'échelle de la ville

Effet par évapotranspiration principalement

+○○ A l'échelle du piéton

Irriguées, les pelouses ont un effet rafraîchissant notamment au contact de celle-ci, si non, l'effet est nul..

Cobénéfices

+○○ Biodiversité

Pleine terre, potentiel de développement de la biodiversité moins important que lorsqu'associé aux strates arbustives ou arborées. La prairie offre une meilleure qualité écologique que le gazon.

+○○ Gestion de l'eau pluviale

Pleine-terre, infiltration et tamponnage, participation à la dépollution de l'eau

+○○ Séquestration carbone

Captation dans les sols

+○○ Qualité urbaine et paysagère

Qualité des vues du végétal

+○○ Usages et socialité

Espace de détente, de loisirs

+○○ Santé

Bénéfices en santé mentale, pouvoir allergène.

+○○ Confort

Amélioration de l'ambiance acoustique par amortissement des bruits

Impacts

+○○ Empreinte carbone

La séquestration carbone compense les émissions liées aux fosses de plantation, l'entretien ramassage des feuilles

○○○ Consommation énergétique

Nulle

-○○ Consommation d'eau potable

Arrosage les premières années si climat trop sec à arrosage régulier selon les pratiques

+○○ Ressources

Renouvelable, réemploi ou valorisation énergétique possible

-○○ Coût global

Coût d'investissement : faible

Coût d'exploitation : tonte 7 fois par an à fauche annuelle, 10 à 30€/m².an

Les toitures végétalisées

On distingue trois types de toitures végétalisées :

- Les toitures végétalisées extensives ont une épaisseur totale de 8 à 10 cm, elles ne nécessitent pas d'irrigation après la période d'établissement.
- Les toitures végétalisées semi-intensives (15 à 30 cm) accueillent de petites plantes herbacées nécessitant un entretien modéré.
- Les toitures végétalisées intensives (> 30 cm) sont généralement multifonctionnelles et accessibles. Les toits verts intensifs peuvent servir de jardins ouverts au public et certains d'entre eux sont situés au niveau du sol (par exemple, au-dessus d'un parking souterrain).



Phénomènes en jeu : les toitures végétales jouent un rôle d'ombrage de la toiture et le substrat isole sensiblement. Si elles contiennent de l'eau, elles évapotranspirent, ce qui réduit la température et améliore l'efficacité.

Types de toitures végétalisées



extensives

semi-intensives

intensives

Les toitures végétales améliorent le confort intérieur et dans le cas de bâtiments climatisés, elles réduisent sa consommation de climatisation et donc ses rejets de chaud. Il s'agit là d'un effet indirect sur la surchauffe urbaine.

L'efficacité des toitures végétalisées sur le rafraîchissement urbain dépend de l'échelle à laquelle on se place, et du type de toiture mis en œuvre. Un toit intensément végétalisé a des températures plus faibles qu'une toiture terrasse classique ou qu'une toiture végétalisée extensive, ce qui peut présenter un réel avantage pour les toits ayant vocation à accueillir du public.



Le toit végétal agit principalement sur le confort du local qu'il couvre.

A l'échelle de la toiture

- L'effet des toitures végétalisées dépend fortement du type de plantes utilisé, de l'épaisseur du substrat et de l'irrigation.
- Les toitures extensives, souvent mal couvertes de végétation adaptée à la sécheresse (sedum), ont un faible refroidissement par évapotranspiration. Le toit peut ainsi être plus chaud que l'air, du fait du stockage limité de l'humidité dans le substrat et de l'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.

1°C

à Hongkong, abaissement de température de l'air à 1,50m d'une toiture intensive (Jim, 2015)

A l'échelle de la ville

- La généralisation des toitures végétalisées à l'échelle de la ville a un effet négligeable sur le rafraîchissement des rues et des espaces urbains. Cette conclusion est valable dans tous les climats étudiés.
- Les toitures végétalisées sont préférables aux toitures réfléchies à albédo élevé pour améliorer le confort intérieur du bâtiment mais pour réduire l'effet sur l'îlot de chaleur, la toiture réfléchissante est plus efficace.

0,5°C

Effet de rafraîchissement maximal (et très localisé) de l'air dans les rues de Paris, pendant la canicule de 2003, généré par la couverture de toutes les toitures plates de Paris et sa grande couronne par des toitures végétales irriguées. (calcul par simulation, de Munck, 2013)

Crèche rue Piat, Paris 20e (75)
WRA Architectes



Crédits : CHOMERE Morisseau

Les toitures végétalisées

Rafrâichissement

++○ Etat des connaissances

Bon, nombreuses études

+++ A l'échelle de la ville

La contribution de toiture végétalisée est faible à l'échelle de la ville

+++ A l'échelle du piéton

En cas de toiture accessible, l'effet de rafraîchissement est très faible pour le piéton

Cobénéfices

+++ Biodiversité

Potentiel de développement de la biodiversité fort si étage élevé (oiseaux, diffusion des pollens), plus faible si étage bas.

+++ Gestion de l'eau pluviale

Potentiel de tamponnage en toiture intéressant, possibilité aussi de stockage pour l'arrosage

+++ Séquestration carbone

Captation faible du fait de l'absence de pleine-terre

+++ Qualité urbaine et paysagère

Qualité des vues du végétal, traitement de la 5e façade en cas de visibilité de la toiture

+++ Usages et socialité

Support d'usage de jardin pour les toitures intensives

+++ Santé

Bénéfices en santé mentale, pouvoir allergène.

+++ Confort

Amélioration de l'ambiance acoustique par amortissement des bruits, confort visuel en cas de visibilité de la toiture

Impacts

+++ Empreinte carbone

Extensif : équivalent à une toiture terrasse
Intensif : assez élevée, du fait du renforcement de structure et du système nécessaire.

+++ Consommation énergétique

Réduction des besoins de rafraîchissement (effet indirect)

+++ Consommation d'eau potable

Extensif, pas besoin d'arrosage et intensif besoin important (possibilité d'intégrer une récupération de l'eau)

+++ Ressources

Renforcement de structure

+++ Coût global

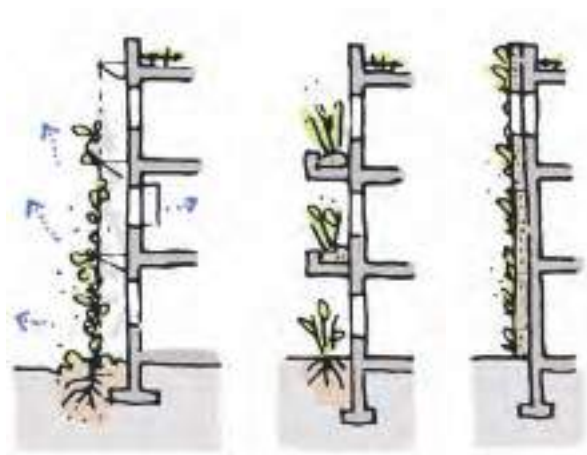
Coût d'investissement : systèmes extensifs 60€/m², systèmes intensifs : 100 à 200€/m²

Coût d'exploitation : dans le cas de systèmes intensifs nécessité de l'entretien comparable à la pelouse ou au parc. La réintervention sur l'étanchéité nécessite une dépose du substrat végétalisé.

Les façades végétalisées

On distingue trois types de façades végétalisées.

- Les murs de grimpantes : La plante s'enracine directement dans le sol, et recouvre les sols et les façades.
- Les murs de jardinières : il s'agit de l'utilisation de supports de plantation ou de pots avec un substrat artificiel. Ils peuvent être posés au sol ou directement sur le bâtiment ou les balcons.
- Les murs vivants : il s'agit d'un substrat fixé sur la façade, pouvant accueillir plusieurs types d'arbustes, d'herbes et de gazons pour une véritable couverture végétale. Un système d'irrigation automatique et un approvisionnement en nutriments sont nécessaires.



Phénomènes en jeu : les murs végétalisés ont pour principal effet d'ombrager les façades qui les supportent. Ces surfaces ne montent pas en température et réchauffent donc moins l'air.



Leur avantage par rapport aux toitures végétalisées est qu'elles peuvent être placées dans des zones occupées par les piétons et ont alors potentiellement une plus grande influence sur leur confort.

Elle peuvent avoir un rôle de protection solaire pour le bâtiment et ainsi réduire ses besoins en climatisation. Par contre, à l'exception des grimpantes, elles nécessitent un système d'arrosage performant.

L'efficacité du mur végétalisé dépend du type constructif de la façade, des plantes utilisées et de l'irrigation.

Mur végétalisé,
Villeurbanne (69)

Murs vivants, à l'échelle de la façade

- Ils permettent de réduire fortement les températures de surface.
- On observe une réduction forte de la température de l'air à proximité de la façade qui s'atténue pour devenir insignifiante à 1m.
- La température d'air est augmentée la nuit, car le mur vivant se refroidit plus lentement qu'un mur sans plantes.
- Ces effets dépendent de l'irrigation du substrat.
- Les murs vivants réfléchissent moins de rayonnement vers les façades des bâtiments voisins et piétons et améliorent ainsi les conditions de confort extérieures et intérieures.

- 0°C

de différence de température de surface du mur vivant par rapport aux murs traditionnels dans des conditions climatiques semi-arides – Santiago du Chili (Victorero et al., 2015).

Grimpantes, à l'échelle de la façade

- Les effets sur la température d'air sont moindres, mais l'effet sur le confort est présent du fait d'une température de surface faible.

-1,2°C (1) / -2,7°C (2)

Aux Pays-Bas, à l'automne, réduction de la température de surface d'un mur après couverture par des grimpantes disposées directement sur le mur (1) ou disposées sur une structure à distance du mur (2). (Perini et al., 2011)

Combinaison toiture & façade végétalisée

- L'utilisation de toitures végétalisées et de façades végétalisées sur un même bâtiment permettrait de mieux rafraîchir l'environnement urbain car la fraîcheur générée par le toit est conduite vers le sol par la façade.

-12°C (1) / -4°C (2)

Diminution de la température de l'air dans une rue canyon à Riyad en climat sec et chaud (1) et à Londres en climat tempéré (2), avec toitures, sols et façades végétalisés. (Alexandri & Jones, 2008)

Rafrâichissement

++○ Etat des connaissances

Moyenne : (il y a beaucoup de travaux à l'échelle de la façade mais peu à l'échelle de la rue ou de la ville)

○○○ A l'échelle de la ville

L'effet des façades végétalisées est négligeable.

+++ A l'échelle du piéton

L'effet de l'ombrage des murs et l'évapotranspiration améliore le confort.

Cobénéfices

+++ Biodiversité

Potentiel de développement de la biodiversité : insectes

○○○ Gestion de l'eau pluviale

Impact faible à nul

+++ Séquestration carbone

Captation faible

+++ Qualité urbaine et paysagère

Qualité des vues du végétal, impact moindre si les végétaux sont morts

+++ Usages et socialité

Pas de support d'usage

+++ Santé

Bénéfices en santé mentale, mais pouvoir allergène.

+++ Confort

Amélioration de l'ambiance acoustique par amortissement des bruits

Impacts

○●● Empreinte carbone

Grimpant, faible / Substrat, plus élevé

+++ Consommation énergétique

Réduction des besoins de rafraîchissement du bâtiment

Consommations pour les pompes pour l'arrosage

○●● Consommation d'eau potable

Arrosage nécessaire, même si potentiel de récupération des eaux pluviales.

○●● Ressources

Installations techniques plus ou moins lourdes selon les solutions

○●● Coût global

Coût d'investissement : grimpantes : 10 à 20€/m² de façade, jardinière et murs vivants

Coût d'exploitation : intensif nécessité de l'entretien (pompes, filtres...), réintervention sur l'étanchéité

Les plans d'eau et rivières

Les plans d'eau et cours d'eau tels que les réservoirs, étangs, lacs, rivières, ruisseaux ... sont en général déjà présents dans les villes. Ils peuvent l'être objet de rénovations (découverte de ruisseaux, aménagement de berges, reprofilage) qui peuvent influencer fortement leur impact climatique. Les bassins peuvent également être créés dans le cadre de projets urbains d'envergure.

L'eau joue le rôle de « refroidisseur climatique ». Les berges végétalisées des plans d'eau contribuent également au rôle de refroidisseur climatique, du fait de la transpiration des plantes et des effets d'ombrage des arbres.



Phénomènes en jeu : La presque totalité des rayonnements solaires (et de leur énergie) sont absorbés par la surface d'eau. L'eau, en s'évaporant, perd une part importante de ses apports énergétiques sous forme de chaleur latente, ce qui provoque un abaissement de sa température. La température de surface de l'eau peut-être de plusieurs degrés inférieure à celle de l'environnement bâti environnant, et ainsi contribuer à refroidir l'air ambiant. Enfin, les surfaces d'eau peuvent représenter des surfaces fraîches.



Bordeaux, Quartier Ginko

Plans d'eau, à proximité

- L'impact de la taille du plan d'eau a été montré théoriquement : un grand plan d'eau permet un rafraîchissement plus fort des berges dans les zones sous le vent que celui procuré par les petites surfaces d'eau.
- Les lacs ou réservoirs de forme irrégulière sont de moins grande efficacité, car l'interface plus grande avec l'environnement bâti augmente les entrées d'air chaud.
- 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. En outre, 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, limitant le refroidissement et le confort thermique dans l'environnement.

Rivières, à proximité

- Les effets de rafraîchissement sont mesurés au-dessus des rivières (sur les ponts) ou sur les berges. La nature des aménagements des berges peut donc avoir un effet supérieur à celui de la rivière sur la température mesurée sur les berges. La densité bâtie le long des berges influence le rafraîchissement de l'environnement. Plus cet environnement est ouvert et végétal, plus la fraîcheur pénétrera dans les zones urbanisées.
- Plus la rivière est large, plus la distance de refroidissement est grande.

-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 chaud. L'effet de rafraîchissement est ressenti jusqu'à plusieurs centaines de mètres de la rive (Fernandez et al., 1998).

A l'échelle de la ville

- Pour une même surface 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 plans d'eau et rivières

Rafrâichissement

+++ Etat des connaissances

Moyenne : la relation à la forme urbaine est peu explorée.

+++ A l'échelle de la ville

L'évaporation des plans d'eau et rivières ont un effet à grande échelle

+++ A l'échelle du piéton

L'évaporation refroidit l'air et le contact de l'eau fraîche améliore le confort des piétons

Cobénéfices

+++ Biodiversité

Biodiversité aquatique et des berges

+++ Gestion de l'eau pluviale

Nouvel exutoire en matière de gestion des eaux pluviales, avec possibilité d'intégration d'une hausse de niveau

+++ Séquestration carbone

Dans l'eau et dans la végétation des berges

+++ Qualité urbaine et paysagère

Paysage aquatique particulièrement apprécié.

+++ Usages et socialité

Usages de loisirs, de détente voire de baignade

+++ Santé

Bénéfices en santé mentale associés à la vue du végétal et des usages ludiques liés à l'eau, mais risque de maladies (zones humides) et de noyade

+++ Confort

Ambiance apaisée, mais risque d'éblouissement du reflet de l'eau

Impacts

+++ Empreinte carbone

Impact des terrassements compensé par le stockage carbone de l'eau et de la végétation mise en place

+++ Consommation énergétique

Négligeable

+++ Consommation d'eau potable

+++ Ressources

Impact des terrassements s'il y a création du plan d'eau

+++ Coût global

Coût d'investissement : la création d'un plan d'eau, la renaturation de cours d'eau constituent des opérations coûteuses
Coût d'exploitation : il s'agit de l'entretien des berges, la surveillance de la qualité de l'eau.

Les ouvrages paysagers de gestion des eaux pluviales

Les ouvrages paysagers de gestion des eaux pluviales sont basés sur le principe de gestion à la source, au plus près de la surface qui reçoit les précipitations. Ils ralentissent les flux pour l'évacuation de l'eau à débit régulé par tamponnage, et infiltrent les eaux sur place.

De façon temporaire ou permanente, ces dispositifs créent des milieux humides qui favorisent l'évaporation et l'évapotranspiration des végétaux.

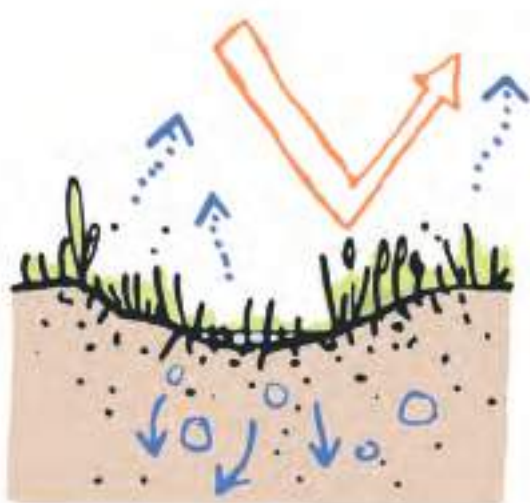
- La noue paysagère est un fossé large et peu profond et dont les rives sont en pente douce ;
- Le bassin paysager est un espace de dépression du sol peu profond, perméable ou étanche, qui permet de stocker temporairement les eaux de pluie et de ruissellement et le cas échéant de les infiltrer ;
- Les jardins de pluie sont des dépressions du sol ou des jardinières, plantées de végétation hydrophile, susceptibles d'optimiser la rétention des polluants et de retenir voire d'infiltrer les eaux pluviales.



A l'échelle locale

L'efficacité des ouvrages paysagers de gestion des eaux pluviales est légèrement supérieure à celle d'une prairie. Toutefois, elle reste limitée au regard des caractéristiques suivantes des espaces de gestion des eaux pluviales :

- Les noues sont conçues pour leur capacité à infiltrer les eaux de pluie, et ont donc une moindre capacité à évaporer au regard d'autres systèmes comme les toitures végétales.
- Les pluies sont rares en périodes de forte chaleur et de sécheresse : en été, ces dispositifs s'apparentent plus à une prairie qu'à un véritable espace en eau.
- Ces ouvrages, s'ils sont plantés d'arbres, participent à l'ombrage et au maintien de l'humidité du sol.
- Enfin, il est à noter que l'évapotranspiration lorsqu'elle a lieu n'est pas forcément favorable au confort, puisqu'une humidité trop élevée en période de forte chaleur peut créer une dégradation du confort thermique.



Phénomènes en jeu : le processus d'évaporation génère un abaissement de la température locale et une augmentation de l'humidité relative de l'air, ce qui peut permettre de faire baisser la température ressentie.

Rafrâichissement

+○○ Etat des connaissances

faible (extrêmement peu de travaux en dehors de l'évaluation du flux d'évapotranspiration)

+○○ A l'échelle de la ville

Impact semblable aux pelouses

+○○ Confort thermique d'été

Effet semblable aux pelouses

Cobénéfices

+○○ Biodiversité

Milieu semi-humides favorable à la vie organique

+○○ Gestion de l'eau pluviale

Ouvrage destiné à gérer les eaux pluviales par tamponnage et éventuellement infiltration

+○○ Séquestration carbone

Dans l'eau et dans la végétation des berges

+○○ Qualité urbaine et paysagère

Mise en scène de l'eau dans l'espace public, présence du végétal très appréciée si la noue est plantée

+○○ Usages et socialité

Usages de loisirs, de détente

+○○ Santé

Bénéfices en santé mentale associés à la vue du végétal, mais risque de maladies infectieuses (zones humides)

+○○ Confort

Amortissement acoustique du sol

Impacts

+○○ Empreinte carbone

Impact des terrassements compensé par le stockage carbone des végétaux

○○○ Consommation énergétique

Néant

○○○ Consommation d'eau potable

Néant

○○○ Ressources

Impact des terrassements

○○○ Coût global

Coût d'investissement : 100€/m linéaire de noue. L'investissement est plus faible que les ouvrages classiques (réseau séparatif, buses, systèmes enterrés)

Coût d'exploitation : la gestion à l'interface entre les compétences de l'assainissement et des espaces verts est parfois complexe.



LES SOLUTIONS GRISES

Les solutions grises rassemblent les dispositifs urbains liés aux infrastructures urbaines et éléments techniques :

- le travail de la forme urbaine ;
- le mobilier urbains (fontaines, structures d'ombrages) ;
- les revêtements de sol ;
- les dispositifs liés aux bâtiments (toits, murs).

Les infrastructures urbaines fortement minéralisées ont un comportement thermique qui est en grande partie responsable de la surchauffe urbaine. L'enrobé bitumineux ayant une inertie forte et un albédo faible, favorise l'effet d'îlot de chaleur urbain.

Les solutions grises sont particulièrement pertinentes dans le cas de climats arides, méditerranéens, dans les espaces

contraints, ou avec des usages urbains intensifs (circulation...).

En limitant le piégeage de chaleur et en favorisant les vents, en amont des projets urbains, la forme urbaine peut être optimisée pour limiter l'effet

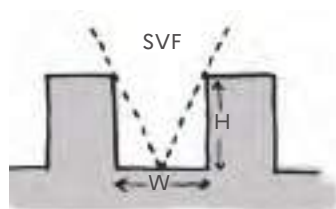
Pour aller plus loin

- Bigorgne, Hendel, Les îlots de chaleur urbains à Paris, Cahier#4: influence climatique des revêtements de sol à Paris, APUR, 2017
Bigorgne, Atténuer les îlots de chaleur urbains
- Bigorgne, Cahier n°5 : méthodes et outils de conception des projets, APUR, 2020

Forme urbaine bioclimatique

La forme urbaine est caractérisée par des voiries, parcellaires, masses bâties, espaces vides, etc. qui se rassemblent en tissus urbains plus ou moins denses, homogènes ou diversifiés.

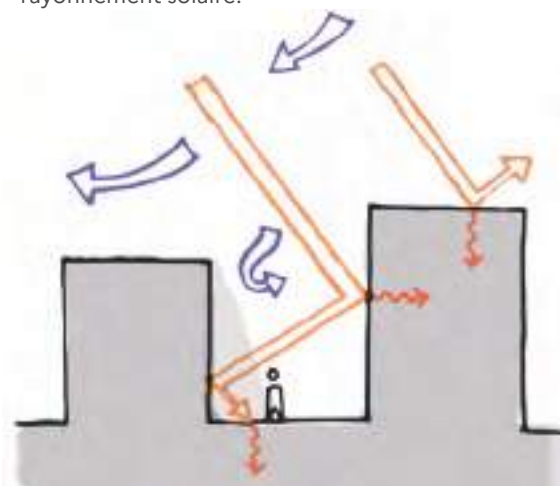
La forme urbaine conditionne fortement la surchauffe urbaine. Une densité bâtie optimisée peut permettre de favoriser la circulation des vents, limiter le piégeage de la chaleur la nuit et créer de l'ombrage le jour.



Indicateurs de forme urbaine : le facteur de vue du ciel (SVF) ou le rapport hauteur sur largeur (H/W) moyen des rues



A grande échelle : la ville a un albédo effectif faible, la plupart des villes ont des albédos compris entre 0,15 et 0,2 et absorbent donc au moins 80% du rayonnement solaire.



Piégeage du rayonnement solaire et écoulement de l'air perturbé par les obstacles construits qui empêche l'évacuation de chaleur la nuit, mais le jour l'ombrage améliore le confort.

Local Climate Zones LCZ

Les Local Climate Zones (LCZ) (Stewart & Oke, 2012) sont une classification qui relie les caractéristiques morphologiques, d'occupation du sol et des activités avec le microclimat spécifique qu'elles génèrent, par temps calme et ciel dégagé. Les différences de températures moyennes observées (issues de mesures à Vancouver) sont indiquées ci-contre.



+3°C
LCZ 1 haut et compact, centre-ville dense étages au-delà de R+7, SVF entre 0,2 à 0,4
10% perméable
40% à 60% d'emprise bâtie



+2°C
LCZ 4 haut et ouvert, grands ensembles étages au-delà de R+7 SVF entre 0,5 à 0,7
30% perméable
20 à 40% d'emprise bâtie



+1°C
LCZ 8 bas et large, zones artisanales et commerciales étages RDC à R+2, SVF entre supérieur à 0,7 ;
10% perméable
30 à 50% d'emprise bâtie



+0,5°C
LCZ 6 bas et ouvert, maison individuelles étages RDC à R+2
SVF entre 0,6 à 0,9
40% à 60% perméable
20 à 40% d'emprise bâtie

A l'échelle de la rue ou de la cour

- Les rues étroites bordées de bâtiments hauts caractéristiques de la ville traditionnelle méditerranéenne, reçoivent moins de rayonnement solaire et offrent un meilleur confort.

- Les cours et alignements Nord-Sud sont favorables au maintien du confort en période de canicule, car elles ne reçoivent le rayonnement solaire que lorsque le soleil est à son zénith. Les canyons orientés Est-Ouest reçoivent les rayons du soleil presque toute la journée en été, et sont donc moins confortables pour le piéton.

- Les pieds d'immeubles ensoleillés, protégés des vents et fortement minéralisés sont particulièrement inconfortables (APUR, 2017)

-3 à -4°C

Dans les passages de Sanliurfa (Turquie), c'est la différence entre la température de l'air à l'intérieur du passage et celle des rues environnantes. Les passages couverts sont marqués par une vitesse de vent plus importante (Yildirim, 2020)

A l'échelle de la ville

Les formes urbaines avec des îlots ouverts, avec une densité maîtrisée, laissent plus facilement circuler le vent ce qui favorise le rafraîchissement.

Pour plusieurs types de formes urbaines (Groleau et al., 2013) ont montré qu'il y avait une densité bâtie critique (entre 30% à 40%) où les façades jouent un rôle important dans le piégeage solaire qui conduit à une valeur minimale de l'albédo urbain. En dessous, la rugosité est moindre, conduisant à moins d'interréflexions et au-dessus, le rayonnement solaire pénètre moins dans les rues.

L'amplitude de l'ICU augmente lorsque le facteur de vue du ciel (SVF) diminue. Cette tendance peut être inversée si la diminution du SVF est accompagnée d'une augmentation de l'albédo, ou pour les pays avec un climat très chaud pour lesquels la diminution drastique du SVF génère un ombrage quasi permanent des rues qui ne s'échauffent plus.

-1°C (et jusqu'à -3°C)

A Hong Kong, chaque augmentation de 0,15 du facteur de vue de ciel (SVF) moyen sur un quartier permet de réduire de 1°C la température d'air dans ce quartier, jusqu'à 3°C de réduction pour une augmentation du SVF de 0,45. (Chen & Ng, 2011)

Forme urbaine bioclimatique

Rafraîchissement

+++ Etat des connaissances

Moyenne à forte

+++ A l'échelle de la ville

L'ouverture au ciel et aux vents de la forme urbaine réduit le piégeage de la chaleur

+++ A l'échelle du piéton

Principalement lié à l'ombrage ou les effets de vents

Cobénéfices

+++ Biodiversité

La densité bâtie ne permet pas le déplacement des espèces, tandis que la forme ouverte favorise la pleine-terre.

+++ Gestion de l'eau pluviale

La densité bâtie augmente l'imperméabilisation des sols.

+++ Séquestration carbone

+++ Qualité urbaine et paysagère

La forme urbaine est un véritable levier de qualité urbaine et d'identité architecturale

+++ Usages et socialité

La densité crée de la convivialité mais l'excès de densité crée de la promiscuité

+++ Santé

La densité favorise les mobilités actives.

+++ Confort

La densité limite l'accès à la lumière, et génère plus de bruit

Impacts

+++ Empreinte carbone

La forme urbaine bioclimatique limite les besoins en mobilités, en infrastructures, la performance thermique de l'enveloppe (compacité, accès au soleil) est favorisée.

+++ Consommation énergétique

Impact sur les consommations de chauffage et de froid des bâtiments

+++ Consommation d'eau potable

Sans objet

+++ Ressources

Une densité plus importante limite les distances de réseaux et d'infrastructures

+++ Coût global

Une densité plus importante limite les besoins en infrastructures (voiries, réseaux) ce qui est plus économe en frais d'investissement et d'exploitation

Les fontaines, jets d'eau

Les dispositifs ayant recours à l'usage direct de l'eau, comme les jets d'eau, les fontaines sont utilisés depuis l'Antiquité.

Au-delà des intérêts urbains, les différentes solutions de mise en valeur de l'eau, que sont les bassins, les fontaines, les jets d'eaux, les brumisateurs, ont un rôle de rafraîchissement local très intéressant et souvent plébiscité par les citadins.

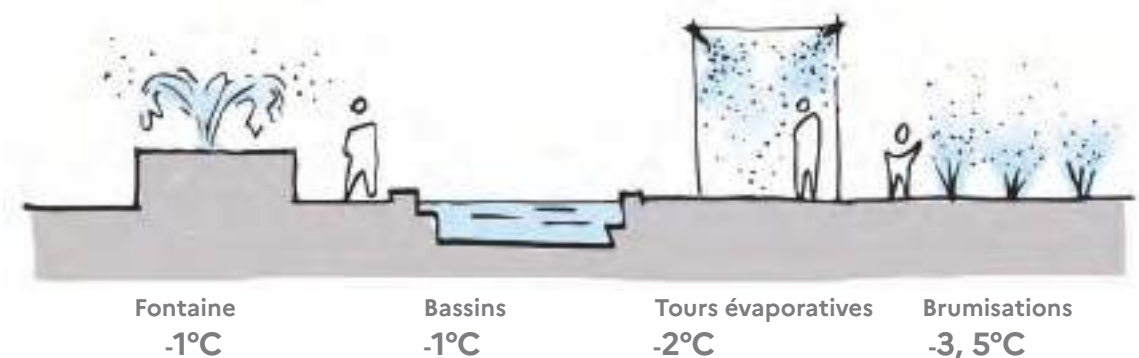
A la différence des grandes masses d'eau comme les rivières et les lacs, les sources d'eau isolées comme les fontaines et bassins en eau ont un effet très ponctuel. L'impact de ces dispositifs demeure très localisé, avec un effet d'abaissement de la température de l'air rapidement dissipé en présence de vent et une incidence sur le confort thermique moins perceptible que celle procurée par les arbres.

Les jeux d'eau et fontaines avec mise en mouvement de l'eau améliorent l'effet d'évaporation de l'eau et a des effets de refroidissement plus importants.



Evaporation de l'eau : l'évaporation d'un litre d'eau peut faire baisser la température d'un 1°C d'un volume de 2000m³ d'eau.

**Effet de rafraîchissement
localisé moyen relevé**
(Santamouris, 2017)



Les bassins et fontaines

Le vent est un élément important de l'efficacité de rafraîchissement des bassins.

Les fontaines et bassins peuvent réduire la température d'air localement de 1°C tandis que les brumisations peuvent la réduire de 4°C (Santamouris et al., 2017)

L'effet de refroidissement des piscines et bassins est de 0,1 à 1,9 °C en moyenne de la température ambiante.

La brumisation

Les systèmes les plus efficaces ont les gouttelettes les plus fines (brumisateurs)

Les systèmes sont plus efficaces sous une brise légère dominante et constante (1-2 m/s), dans des sites fortement irradiés et lorsqu'ils sont suspendus à 1,2-1,5 m au-dessus de la hauteur moyenne des utilisateurs

- 7,9°C UTCI

Amélioration de la température ressentie au sein de la brume des gouttelettes d'un système de refroidissement par brumisation à Ancône et Rome. (Ulpiani, 2019)

-6 à -12°C à 1m

-0,5° à -1,5°C à 7m

Effet de rafraîchissement généré par un dispositif de refroidissement par pulvérisation haute pression dans une aire d'attente extérieure de l'exposition universelle de Shanghai, pour une T° ambiante > 34°C. (Huang et al., 2011)

Miroir d'eau, Bordeaux, Paysagiste : Michel CORAJOUR



Fontaines, jets d'eau

Rafraîchissement

+++ Etat des connaissances

Moyen à l'échelle locale (assez peu de travaux)

+++ A l'échelle de la ville

Impact nul

+++ Confort thermique d'été

Impact fort à proximité directe

Cobénéfices

+++ Biodiversité

Quasi nulle, mais lieu de boisson de la faune

+++ Gestion de l'eau pluviale

Dans le cas de bassins, peut participer au tamponnage des eaux pluviales

+++ Séquestration carbone

Nulle, à la différence d'une grande étendue d'eau comme un lac par exemple

+++ Qualité urbaine et paysagère

Valeur esthétique, sensibilité forte du public à ces dispositifs mais aussi au non-fonctionnement d'une fontaine

+++ Usages et socialité

Multifonctionnalité, ludique, facteur de sociabilité, intergénérationnel

+++ Santé

Risques infectieux, de légionellose, risque de noyade

+++ Confort

Créateur d'ambiance et de bien-être urbain

Impacts

+++ Empreinte carbone

Forte, installations techniques conséquentes avec sous-station de taille importante

+++ Consommation énergétique

Forte (pompes + suivi niveau d'eau + éclairage)

+++ Consommation d'eau potable

300 à 500L/m².an

Forte, les bassins consomment plus d'eau, mais intègrent un recyclage de l'eau alors que les jets et brumisateurs nécessitent de l'eau potable

+++ Ressources

Béton, minerais

+++ Coût global

Coût d'investissement : 600 à 2500€/m²

Un fontaine impose la création d'un local technique et des revêtements de fonds de bassin et de abords du bassin souvent qualitatifs.

Coût d'exploitation: Nécessite des réactifs (chlore), ramassage des débris

L'arrosage de l'espace urbain

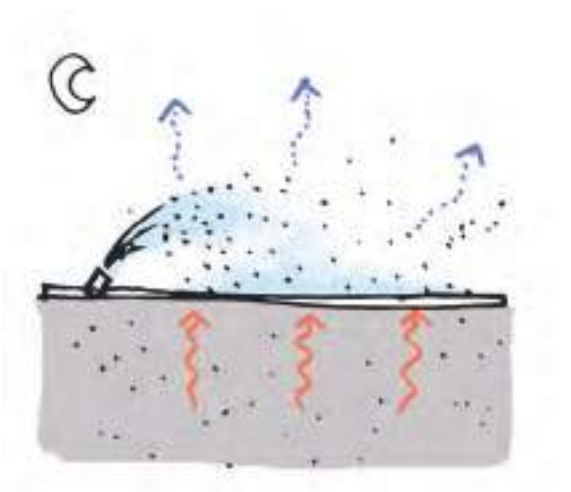
Les systèmes de jets d'eau et fontaines sont revisités pour intégrer des conceptions urbaines ou architecturales et étudiés dans le cadre de projets de recherche. Plus récemment, des recherches ont notamment été menées sur l'arrosage des chaussées par des véhicules de nettoyage des rues ou par des dispositifs spéciaux d'arrosage par buses. Ces dispositifs cherchent à reproduire l'effet, naturel, d'une pluie d'été tombant sur la ville.

L'arrosage des espaces urbains rafraîchit la ville par évaporation, lorsque l'eau rentre en contact avec une surface chaude.

L'arrosage est efficace, quels que soient les climats étudiés: il diminue la température de surface et la température d'air localement. Il est d'autant plus efficace lorsqu'il est appliqué sur des matériaux poreux. La durée d'arrosage est également déterminante.



Exemples de mise en œuvre :
 A Paris, des camions de nettoyage arrosent les chaussées et trottoirs rue du Louvre sur une surface de dimensions 180m par 20m (Hendel, 2016).



A Lyon, dans le quartier de la Part Dieu au niveau de la rue de Buire, des buses sont placées dans les bordures des trottoirs et permettent d'arroser la chaussée. Les buses permettent de répartir une lame d'eau sur la chaussée qui refroidit la surface et s'évapore, refroidissant l'air ambiant.

Arrosage par camion, à l'échelle locale

- L'efficacité de l'arrosage dépend de l'exposition solaire du revêtement, de la période de la journée et du type de revêtement : rue du Louvre à Paris, la fréquence d'arrosage optimale en après-midi était de 30 minutes pour la chaussée et de 10-20 minutes pour les trottoirs car ceux-ci étaient plus lisses en surface, avec une capacité d'absorption de l'eau moindre. En matinée, la fréquence d'arrosage optimale était de 1- 2,5 heures. (Hendel, 2016).

- C'est vers 18h que l'efficacité de l'arrosage par camions est la plus importante sur la température de surface et la température d'air.

- L'évaporation compte pour la quasi-totalité de la fraîcheur générée. Mais seule 20% de l'eau utilisée pour l'arrosage s'évapore réellement : le reste ruisselle ou s'infiltre, ce qui occasionne d'importantes consommations en eau.

-0,79°C température d'air

-2,39°C température radiante

-1°C UTCI

Différences de températures observées à 18h sur les chaussées et trottoirs arrosés par camion, rue du Louvre à Paris, par rapport à l'environnement urbain (Hendel, 2016).

-4°C le matin / -13°C l'après-midi

Différences moyennes de températures de surfaces observées sur les chaussées arrosées par camions rue du Louvre à Paris, par rapport à l'environnement urbain (Hendel, 2016).

Arrosage par des buses, à l'échelle locale

- De la même façon, l'arrosage est surtout efficace l'après-midi, dans les rues exposées à un apport solaire direct sur cette période.

- L'effet de l'arrosage reste très local et surtout limité en hauteur.

-4°C

Réduction de la température de surface de la chaussée, l'après-midi, dans la ZAC de la Buire, Lyon (Projet EVA ; Azam et al., 2019)

Arrosage de l'espace urbain

Rafrâichissement

+++ Etat des connaissances
Bon, pour les climats tempérés
○○○ A l'échelle de la ville
Impact non significatif
+++ A l'échelle du piéton
Impact à proximité

Cobénéfices

○○○ Biodiversité
Impact nul
○○○ Gestion de l'eau pluviale
Impact nul
○○○ Séquestration carbone
Impact nul
○○○ Qualité urbaine et paysagère
Impact nul
○○○ Usages et socialité
Impact nul
●○○ Santé
Risques infectieux, de légionellose,
●○○ Confort
Bruit associé au passage des camions

Impacts

●○○ Empreinte carbone
Forte pour les installations techniques intégrées à la rue
Moyenne pour les camions
●●○ Consommation énergétique
Moyenne pour les buses
Forte pour les camions
●●○ Consommation d'eau potable
Forte
●●○ Ressources
Liées aux installations techniques
●●○ Coût global
Coût d'investissement : important pour les installations intégrées à la rue, faible s'il s'agit d'utiliser des camions
Coût d'exploitation : Installations techniques à suivre, à maintenir en état de fonctionnement

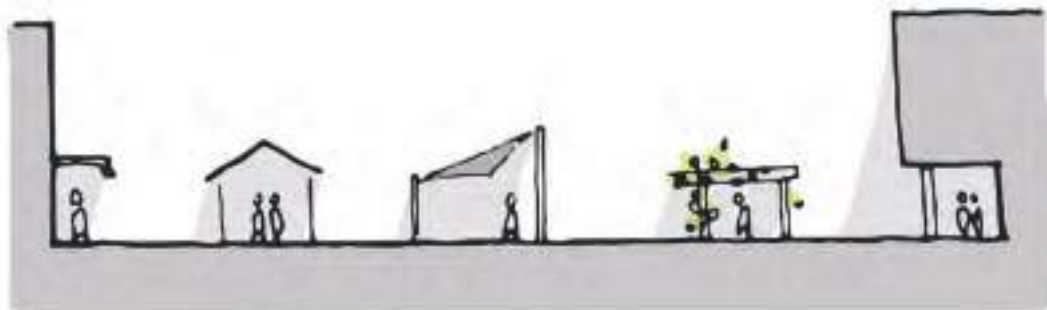
Les structures d'ombrage

En milieu extérieur urbain, l'ombrage peut être créé par les arbres, les bâtiments environnants, des structures mobiles ou fixes. Nous nous concentrons ici sur les structures d'ombrage. Il existe une diversité de structures d'ombrage construites, qu'elles soient temporaires ou pérennes : pergolas, abris, les toiles, voiles d'ombrage, parasols, auvents, marqueses accrochées aux bâtiments, galeries, arcades, passages dans les bâtiments.

Les structures d'ombrage sont efficaces pour améliorer le confort du citadin en été. Lorsqu'elles sont bien conçues, elles peuvent protéger le citadin du rayonnement direct du soleil au même titre que les arbres ou les bâtiments. Leur efficacité sur le rafraîchissement urbain reste moindre, car elles ne disposent pas des autres propriétés des arbres (évapotranspiration) et des bâtiments (ombrage dense et continu des rues des centres-villes anciens par exemple).



L'ombrage influence de deux façons le confort du citadin : il bloque une partie du rayonnement solaire, réduit significativement l'exposition aux UV et améliore le confort en réduisant la température moyenne radiante. Il peut également, pour certaines structures d'ombrage, réduire les vitesses de vent, et donc accroître l'inconfort en été.



Différents types de structures d'ombrage

A l'échelle micro-locale

- Les structures les plus efficaces bloquent efficacement le rayonnement solaire au bon moment de la journée : anticipation de la course du soleil, prise en compte du rayonnement solaire diffus et direct, des usages attendus ...

- Les pergolas bloquant le vent ont un moindre effet sur la température ressentie que les pergolas ouvertes latéralement.

- En privilégiant les matériaux qui ne s'échauffent pas, on limite la réémission de chaleur par la structure. Les plantes grimpantes renforcent l'efficacité de la structure. Si les revêtements de sols sous la structure sont réfléchissants, la filtration des UV est moins efficace.

- Les effets de rafraîchissement des structures d'ombrage restent moindres que ceux des arbres, car elles ne disposent pas des autres propriétés des arbres (évapotranspiration, densité du feuillage, absorptivité de surface).

-0,2°C (T° d'air) / -2°C UTCI

C'est l'effet de rafraîchissement d'une structure d'ombrage dans un parc de Hong-Kong durant la journée (Cheung, 2018)

60% (arbres)

85% (pergola)

70% (pergola avec lierre)

Taux de couverture d'une rue nécessaire pour atteindre l'effet de rafraîchissement de -3,5°C, à Tel Aviv (Peeters, 2020)



Structure d'ombrage
Centre oenotouristique
de Saint-Christol
(84)
Atelier Philippe
Madec

Les structures d'ombrage

Rafrâichissement

+++ Etat des connaissances

Bon, pour tous les climats et tous les types de structures

○○○ A l'échelle de la ville

Aucun

+++ A l'échelle du piéton

Impact lié à l'ombrage

Cobénéfices

○○○ Biodiversité

Impact nul, intégration de nichoirs

○○○ Gestion de l'eau pluviale

Selon les solutions

○○○ Séquestration carbone

Impact nul

+++ Qualité urbaine et paysagère

Qualifie l'espace public, les structures d'ombrage sont des mobiliers urbains

+++ Usages et socialité

Lieu de rassemblement, de socialité

+++ Santé

Protection des UV nocifs pour la santé, limite les risques de cancer de la peau

+++ Confort

Impact sur l'acoustique selon le matériau employé, amélioration du confort visuel, protection contre la pluie (si le toit est imperméable)

Impacts

-○○ Empreinte carbone

Liée à la fabrication de la structure : l'impact dépend du choix des matériaux

○○○ Consommation énergétique

Energie grise seulement,

○○○ Consommation d'eau potable

Nulle

-○○ Ressources

Dépend des matériaux choisis : métal, bois, ...

-○○ Coût global

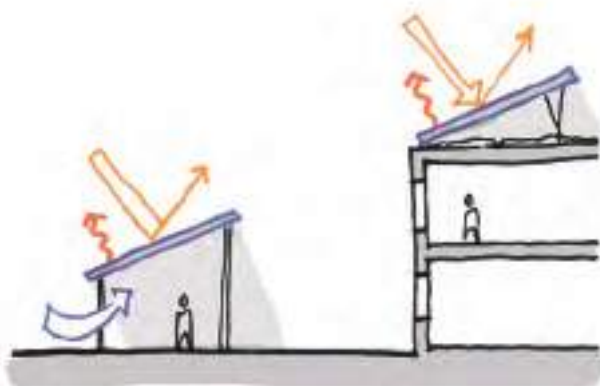
Coût d'investissement : entre 500 et 1000€/m² en fonction des solutions

Coût d'exploitation : faible maintenance et réparation ponctuelle. Les toiles sont plus fragiles que les autres solutions.

Les panneaux solaires

Les panneaux solaires sont des dispositifs convertissant une partie du rayonnement solaire en énergie thermique (eau chaude) pour les panneaux thermiques et en énergie électrique pour les panneaux photovoltaïques. Ils peuvent être utilisés dans l'espace extérieur (ombrières de parking, insérés dans les revêtements de sol) ou sur les bâtiments (en façade, en toiture, éventuellement en combinaison avec de la végétation).

En termes de rafraîchissement urbain, les panneaux solaires sont plus intéressants lorsqu'ils viennent remplacer une surface à faible albédo. C'est le cas des ombrières qui protègent des surfaces d'asphalte par exemple : les panneaux monteront à des températures similaires à celles atteintes par des surfaces sombres, mais refroidiront beaucoup plus vite.



Une partie du rayonnement solaire reçu par les panneaux solaires est utilisée pour produire de l'énergie, et ne participe pas au bilan thermique de la ville. Cependant, les panneaux solaires photovoltaïques restent des parois chaudes en présence d'ensoleillement. Du fait de leur faible inertie, ils refroidissent toutefois plus vite que des surfaces minérales.



Halle Pajol, Paris (75)
Françoise-Hélène
JOURDA
Crédits : Lionel
ALLORGE

A l'échelle locale

- Localement, la journée, l'augmentation de température de l'air peut être élevée du fait de l'échauffement du panneau photovoltaïque.

- Par leur effet d'ombrage, les panneaux en toiture réduisent les besoins de rafraîchissement des bâtiments. Mis en œuvre à l'échelle de la rue comme ombrière, les panneaux peuvent également contribuer à réduire la température ambiante à hauteur de piéton.

+ 4°C

augmentation très locale de température de l'air du fait de l'échauffement du panneau (Barron-Gafford et al., 2016)

- 0,8°C

A Athènes, c'est la réduction de la température ambiante à hauteur de piéton liée à l'intégration de panneaux solaires photovoltaïques dans le revêtement de sol d'une rue, en substitution de surfaces sombres (modélisation, Efthymiou et al., 2016)

A l'échelle du quartier et de la ville

- Dans les études portant sur l'application de PV à l'échelle du quartier ou de la ville, ils se substituent généralement à des surfaces sombres (asphalte, toitures) de sorte qu'ils contribuent à réduire l'îlot de chaleur urbain, même faiblement.

- Plus le taux de conversion du panneau est élevé, plus le rafraîchissement sera important. Un très mauvais taux de conversion peut réchauffer la ville.

- La nuit, les panneaux contribuent à réduire l'effet d'îlot de chaleur urbain. Cela tient à la faible inertie des panneaux : ils sont chauds en journée mais rafraîchissent vite la nuit, contrairement aux surfaces qu'ils remplacent.

- 0,4°C

C'est la réduction de la température ambiante à hauteur de piéton liée à l'intégration de PV sur tous les toits et façades d'un quartier d'Osaka (modélisation, Cortes et al., 2015)

- 0,2°C

Effet de rafraîchissement maximal de l'air à Los Angeles pour un déploiement de PV sur 70% des toitures, avec un taux de conversion élevé des PV (30%) et un albédo élevé des surfaces environnantes. (modélisation, Taha, 2013)

Les panneaux solaires

Rafraîchissement

●●● Etat des connaissances

Faible, très peu d'études

Très faible pour les panneaux thermiques

●●● A l'échelle de la ville

Réduction faible de l'ICU

●●● A l'échelle du piéton

Echauffement très localisé, crée de l'ombre en structure d'ombrage

Cobénéfices

●●● Biodiversité

Impact nul sauf si végétal intégré sous le panneau

●●● Gestion de l'eau pluviale

Impact nul

●●● Séquestration carbone

Impact nul

●●● Qualité urbaine et paysagère

L'impact paysager peut être positif ou négatif selon les perceptions. Le travail d'intégration de ces panneaux peut être vecteur d'identité architecturale

●●● Usages et socialité

Peut-être utilisé en ombrière, abris

●●● Santé

Pas d'impact sauf en ombrière : protection des UV nocifs pour la santé

●●● Confort

Dépend de l'application

Impacts

●●● Empreinte carbone

Le bilan carbone d'une installation photovoltaïque est intéressante : 55geqCO₂/kWh (6geqCO₂/kWh pour le nucléaire, 443geqCO₂/kWh pour le gaz naturel, 1058geqCO₂/kWh pour le charbon)

●●● Consommation énergétique

Les panneaux solaires produisent de l'énergie : de l'eau chaude pour les panneaux thermiques et de l'électricité pour les photovoltaïques

●●● Consommation d'eau potable

Nulle

●●● Ressources

Impact sur les ressources : silicium

Fin de vie nécessite un recyclage (DEEE)

●●● Coût global

Coût d'investissement : 200 à 1000€/m² selon la dimension de l'installation

Coût d'exploitation : revente d'énergie

Les revêtements à albédo élevé

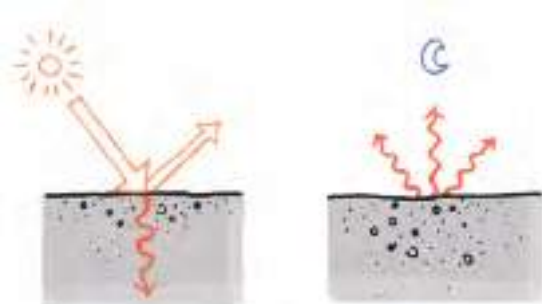
Les revêtements à albédo élevé sont caractérisés par leur fort pouvoir réfléchissant. Le plus souvent de couleur claire, ils peuvent être mis en place sur les sols, les murs, les toitures.

rue, l'efficacité de ces revêtements est discutée : ils améliorent la température d'air, mais peuvent dégrader le ressenti thermique en augmentant l'énergie renvoyée vers le piéton.

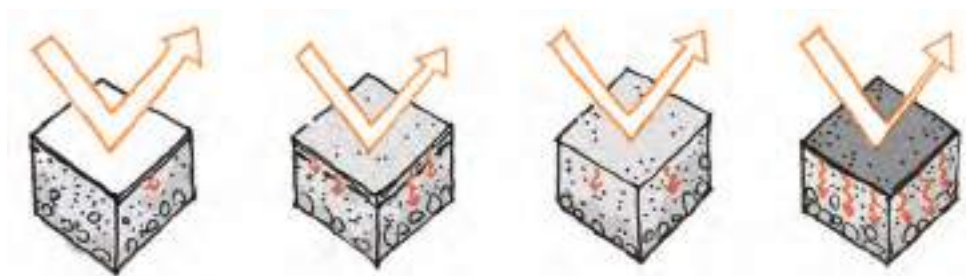
Parmi les revêtements à albédo élevé, on peut citer :

- les revêtements communs : revêtements blancs (ciment ou élastomère), bétons désactivés, sablés, sols stabilisés, tuiles en argile, graviers blancs ...
- les revêtements innovants dits « cool », caractérisés par un albédo supérieur 0,7 : peintures réfléchissantes, peintures thermochromiques.

Il s'agit d'une solution efficace pour lutter contre l'ICU, notamment lorsqu'une part importante des surfaces urbaines est traitée. Pour le confort du piéton à l'échelle de la



Lorsque l'albédo est élevé (proche de 1), la surface réfléchit une part importante de l'énergie solaire. Elle renvoie cette chaleur vers l'atmosphère et les surfaces urbaines environnantes sans le stocker. Un revêtement à albédo faible (entre 0 et 0,4) absorbe fortement l'énergie solaire. Si ce revêtement présente en plus une inertie forte (comme l'enrobé), il emmagasine la chaleur la journée et continuera à dégager de la chaleur durant la nuit.



(Bigorgne, Hendel, APUR 2017)

	revêtement «cool»	béton clair	stabilisé	enrobé bitumineux
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

A l'échelle locale

- Le dispositif est très efficace sur le confort du bâtiment en été, et notamment sur les indices de confort et la réduction des besoins de rafraîchissement des bâtiments.

- La salissure et le vieillissement influencent aussi négativement l'efficacité du dispositif, puisqu'ils dégradent l'albédo du matériau.

- L'efficacité sur la réduction des consommations énergétiques dépend des conditions climatiques locales, de l'environnement urbain, du type d'isolation du bâtiment, des systèmes de climatisation.

- 4°C

A Athènes, c'est l'effet de rafraîchissement de l'air en journée généré par le passage d'un revêtement foncé asphalté (albédo 0,04) à un revêtement blanc (albédo 0,55) pour les sols (Synnefa et al., 2011)

- 20% en moyenne

C'est la diminution de la demande énergétique des bâtiments résidentiels et commerciaux avec l'application d'un « cool roof » (albédo 0,6) par rapport à une toiture en asphalte (albédo 0,2). (Akbari & Konopacki, 2004).

+ 3 à 6° ressentis

A Milan, c'est l'effet de l'augmentation de 0,5 de l'albédo de toutes les surfaces urbaines sur la température ressentie (Falasca, 2019)

A l'échelle du quartier et de la ville

-Les études convergent vers l'efficacité de l'albédo pour réduire l'effet d'îlot de chaleur urbain en limitant le piégeage de la chaleur dans les rues.

- L'effet d'une augmentation de l'albédo en toiture est le plus prononcé pour les quartiers très denses. Inversement, l'effet de l'augmentation de l'albédo des revêtements de sol est plus important pour les secteurs ouverts au ciel et donc moins denses.

- 0,25 à - 0,5°C

A Melbourne et à Sydney, c'est la réduction moyenne de la température d'air en ville pour une augmentation de 0.1 de l'albédo des toits (Imran et al., 2018; Santamouris et al., 2018)

- 0,4 à - 0,8°C

A Milan, c'est la réduction moyenne de la température d'air en ville pour une augmentation de 0.1 de l'albédo de toutes les surfaces urbaines, ce qui correspond au passage de revêtements marron/gris à des revêtements blancs. (Falasca, 2019)

Les revêtements à albédo élevé

Rafrâichissement

+++ Etat des connaissances

Bonne, beaucoup d'études

+++ A l'échelle de la ville

Réduction de l'ICU

○○○ A l'échelle du piéton

Echauffement moindre des surfaces à albédo élevé mais il y a un inconfort potentiel du fait du rayonnement renvoyé sur le piéton

Cobénéfices

○○○ Biodiversité

Impact nul

○○○ Gestion de l'eau pluviale

Impact nul

○○○ Séquestration carbone

Impact nul

++○ Qualité urbaine et paysagère

Esthétique plus appréciée que le bitume ou l'asphalte

○○○ Usages et socialité

Impact nul

●○○ Santé

L'application de peinture peut générer des composés organiques volatils (COV)

●○○ Confort

Les revêtements clairs peuvent provoquer de l'éblouissement

Impacts

●○○ Empreinte carbone

Pour la fabrication uniquement

○○○ Consommation énergétique

Nulle, les revêtements de sol clairs contribuent à réduire les consommations d'éclairage public

○○○ Consommation d'eau potable

Nulle

●○○ Ressources

Les produits « cool » aluminium, dioxyde de zinc, dioxyde de titane contiennent des métaux

●○○ Coût global

Coût d'investissement : le surcoût dépend des produits

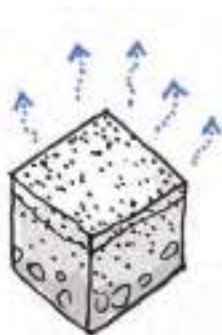
Coût d'exploitation : les couleurs claires sont plus salissantes et donc nécessite une un nettoyage plus fréquent

Les revêtements drainants

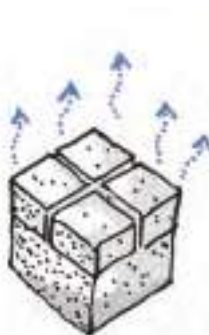
Les revêtements drainants, avec ou sans rétention, constituent une solution alternative aux revêtements urbains imperméables employés habituellement (béton, enrobé, asphalte...). Ces revêtements présentent l'intérêt de réduire le ruissellement pluvial. Parmi ces revêtements poreux, on compte le sol stabilisé, les enrobés poreux, les pavés poreux, les pavés poreux évaporatifs...

Les pavés poreux évaporatifs permettent la remontée de l'eau vers leur surface. Le dispositif prévoit un ouvrage de récupération des eaux de pluie en amont. À partir de ce stockage souterrain, l'eau pluviale est injectée en goutte-à-goutte dans le lit de pose des pavés. Elle remonte à travers les pavés par capillarité et s'évapore en atteignant la surface sous l'action des radiations solaires.

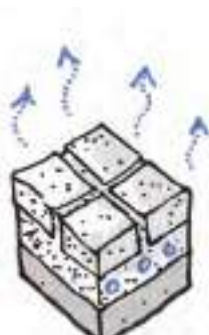
En condition sèche, les revêtements poreux peuvent présenter des températures de surfaces supérieures aux matériaux imperméables. Les revêtements poreux retenant l'eau, contenant du sable et équipés d'une arrivée d'eau optimisent l'effet de rafraîchissement par la montée de l'eau par capillarité et évaporation.



revêtement
drainant



pavé
drainant



pavé drainant
avec rétention

Les revêtements drainants stockent temporairement l'eau, ce qui favorise l'évaporation de l'eau plutôt que son évacuation rapide au réseau. Le processus d'évaporation génère un abaissement de la température locale et une augmentation de l'humidité relative de l'air, ce qui peut permettre de faire baisser la température ressentie.

Les pavés poreux, à l'échelle locale

- Les pavés sans arrosage ou sans alimentation en eau présentent des effets de rafraîchissement très limités, tant sur les températures de surface que sur les températures ressenties.

- Par contre, les revêtements perméables arrosés ou alimentés en eau présentent des effets de rafraîchissement importants : jusqu'à 5°C de différence de température ressentie, par comparaison avec des revêtements classiques.

- Des matériaux avec une porosité importante en profondeur et porosité faible en surface montrent des temps de séchage plus importants et des températures de surfaces plus faibles. Des écarts de température de surface allant jusqu'à 19°-25°C sont observés entre ce type de matériaux et des matériaux secs et imperméables.

1,6 (1) / 2,6°C (2)

Différence de température de l'air au moment le plus chaud de la journée entre des pavés poreux à joints enherbés non arrosés (1) ou de l'asphalte (2), à Taïwan (Lin et al., 2007).

- 19 à - 25°C

Différence de température de surface en journée entre des pavés perméables retenant l'eau, avec du sable et une arrivée d'eau, et des pavés standards imperméables à Toulouse et au Japon (Ishizuka et al., 2006).

- 5°C

Différence de température ressentie au-dessus de pavés perméables retenant l'eau, avec du sable et une arrivée d'eau, à Toulouse – par comparaison avec des pavés classiques (Hydroplus, Juillet-Sept 2020)

Pavés poreux, Saint-Etienne (42)



Les revêtements drainants

Rafrâichissement

⊕⊕⊖ Etat des connaissances

Moyen

⊖⊖⊖ A l'échelle de la ville

Impact à étudier

⊕⊕⊖ A l'échelle du piéton

Réduction modérée de la température d'air

Cobénéfices

⊖⊖⊖ Biodiversité

Impact nul ou très faible

⊕⊕⊖ Gestion de l'eau pluviale

Dispositif infiltrant, permettant de tamponner une partie des eaux pluviales, préviennent des inondations et autres dégâts des eaux potentiels, et contribuent à l'alimentation des nappes phréatiques.

⊖⊖⊖ Séquestration carbone

Impact nul

⊕⊕⊖ Qualité urbaine et paysagère

Esthétique plus appréciée que l'enrobé bitumineux ou l'asphalte

⊖⊖⊖ Usages et socialité

Accessibilité aux PMR, personnes à mobilité réduite, plus complexe, empêchent la formation de flaques

⊖⊖⊖ Santé

Impact nul

⊖⊖⊖ Confort

Impact dépendant du matériau choisi (bruit au roulement par exemple) et de sa couleur (éblouissement)

Impacts

⊖⊖⊖ Empreinte carbone

Pour la production uniquement

⊖⊖⊖ Consommation énergétique

Nulle

⊖⊖⊖ Consommation d'eau potable

La solution irriguée nécessite de l'eau.

⊖⊖⊖ Ressources

Les ressources utilisées sont le béton, le sable et système d'irrigation (s'il y a). les pavés, produits modulaire sont faciles à réemployer

⊖⊖⊖ Coût global

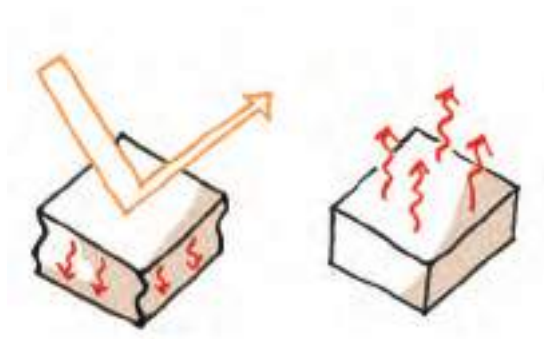
Coût d'investissement : de 30 à 100 €/m² en fonction des solutions.

Coût d'exploitation : les revêtements poreux peuvent se colmater dans le temps. Pour les solutions avec rétention et arrivée d'eau, les opérations de maintenance sont plus complexes.

Les matériaux à changement de phase

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des matériaux capables de changer d'état physique (de solide à liquide) dans une plage de température située, d'une manière générale, entre 10°C et 80°C. Matériaux innovants, les MCP ont l'avantage de réguler leur température par leur capacité élevée d'absorption et de stockage de l'énergie thermique. Il existe de nombreux types de matériaux à changement de phase de natures physico-chimiques très différentes.

Les MCP s'appliquent dans les espaces publics (incorporés dans les chaussées en asphalte et en béton, dans les trottoirs) et dans les bâtiments (intégrés dans des revêtements de toits et murs, essentiellement dans les toits et les murs légers ; associés à une membrane de toit, dans les tuiles).



Les MCP fondent et absorbent la chaleur lorsque la température extérieure dépasse leur température de fusion. Ils se solidifient en restituant l'énergie accumulée lorsque la température redescend. L'énergie est par conséquent stockée dans le matériau.

L'utilisation de MCP permet d'augmenter la capacité de stockage de la chaleur du bâtiment et des surfaces urbaines et de diminuer ainsi leur température de surface maximale. Elle limite également les besoins de refroidissement du bâtiment, et réduit donc les émissions de chaleur liées à la climatisation dans l'espace urbain.



Expérimentation d'échantillons de revêtements MCP (Karlessi, 2011)

Les MCP en revêtement de chaussées, à l'échelle locale

- L'association des surfaces réfléchissantes avec des MCP peut diminuer la température de surface maximale, déplacer le pic de température et augmenter leur capacité de refroidissement et d'atténuation.
- Les revêtements intégrant de faibles concentrations de MCP sont peu efficaces.
- Les MCP incorporés dans les chaussées en asphalte et en béton améliorent leur résistance mécanique et leur durabilité.
- Le choix du MCP est lié à sa température de fusion comparée aux conditions climatiques locales. La diminution de température de surface la plus importante se produit lorsque la température quotidienne de pointe s'approche de la température de fusion des matériaux.

- 12,5°C à - 19,7°C

C'est la réduction des températures de surface maximales des revêtements de chaussée en asphalte avec du MCP par rapport à des revêtements similaires sans MCP.

- 2,5°C à - 9,7°C

C'est la réduction des températures de surface des tuiles avec du MCP, en fonction du MCP retenu (Santamouris, 2020)

Les MCP dans les bâtiments, à l'échelle locale

- Les MCP intégrés dans les bâtiments peuvent réduire de 10 à 87 % la consommation de refroidissement
- L'utilisation des MCP doit être adaptée au climat local: sont notamment préconisées des températures de fusion optimales variant entre 10°C et 30°C, 23°C pour l'Italie par exemple.

- 2 °C (1) / - 7,53 °C (2)

C'est la réduction des températures de surface maximales d'un toit à Incheon en Corée, du fait de l'utilisation d'un système de modules de toit en bois composite renforcé avec un MCP appliqué avec une épaisseur de 0,01 m (1) et 0,03 m (2) (Chang et al., 2020)

Rafrâichissement

++ Etat des connaissances

Faible, en dehors du laboratoire et de la petite échelle d'application, les MCP ne sont pas encore utilisés dans les projets et les données de performance ne sont pas disponibles. La recherche actuelle sur l'impact de cette solution à grande échelle est très limité (Santamouris, 2020)

++ A l'échelle de la ville

Incertitude sur l'impact sur l'ICU

++ A l'échelle du piéton

Impact faible

Cobénéfices

+++ Biodiversité

Impact nul

+++ Gestion de l'eau pluviale

Impact nul, imperméable

+++ Séquestration carbone

Impact nul

++ Qualité urbaine et paysagère

Aspects variés en fonction des produits

+++ Usages et socialité

Impact nul

+++ Santé

Impact nul

+++ Confort

Impact nul

Impacts

+++ Empreinte carbone

Produits énergivores en fabrication

+++ Consommation énergétique

Nulle

+++ Consommation d'eau potable

Nulle

+++ Ressources

Ce sont des produit composites dont la disponibilité de la ressource et la fin de vie du matériaux est à prendre en considération : alliage de sels organiques et d'eau, paraffines...

+++ Coût global

Investissement : pas de donnée de surcoût mais il s'agit de matériaux innovants
Entretien : pas de donnée chiffrée, mais la durée de vie et la maintenance de ce type de produit pose question.

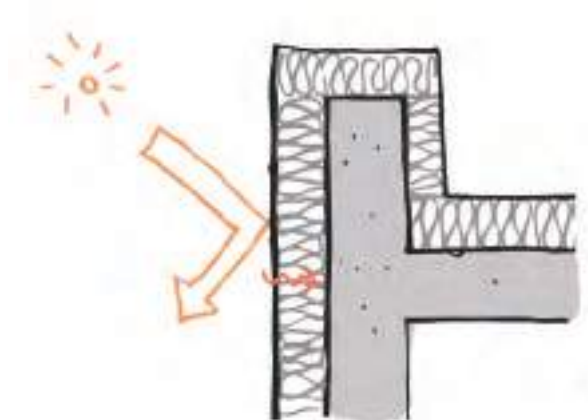
L'isolation et l'inertie thermique des bâtiments

L'enveloppe des bâtiments est un levier de modification de l'absorption et la dissipation de la chaleur de l'environnement urbain.

L'isolation renforcée des toits et façades des bâtiments, associée à des parois intérieures à inertie thermique élevée (béton, pierre, terre-crue...) et à une ventilation nocturne constitue une stratégie de gestion passive du confort en été. Elle se traduit par une réduction des besoins de refroidissement.

L'isolation par l'extérieur présente l'intérêt de limiter les apports d'énergie solaire sur les toits et les façades et de ne pas accumuler la chaleur du fait de son inertie thermique faible.

Pour optimiser l'efficacité de la solution, il s'agit de trouver la combinaison optimale entre les propriétés de l'isolant (capacité à conduire la chaleur, à la stocker et à l'échanger avec son environnement) et l'épaisseur de l'isolation.



Phénomène en jeu : les matériaux isolants situés à l'extérieur ont des caractéristiques physiques qui limitent l'échauffement du matériau, l'absorption et la restitution de chaleur (inertie thermique, diffusivité thermique, densité, capacité thermique).



Mise en place d'une isolation de murs par l'extérieur

Impact sur le confort intérieur et sur les besoins de refroidissement

L'isolation extérieure et l'inertie thermique intérieure de l'enveloppe favorisent le confort intérieur et la limitation des besoins de refroidissement.

Dans les climats tempérés, l'isolation des toitures gagne à être plus forte que dans les climats chauds où une isolation plus faible associée à un albédo élevé semble plus judicieuse.

7% ⁽¹⁾ et 2% ⁽²⁾

Réduction des besoins énergétiques pour le refroidissement à Milan (1) et à Rome (2) du fait de l'ajout d'une couche d'isolation thermique dans un toit standard. (Detommaso et al., 2020)

- 7,5%

Réduction des besoins énergétiques pour le refroidissement à Delhi du fait de la mise en œuvre d'un mur en béton de bambou composite de 15cm, par rapport à un mur en brique de 12.7cm d'épaisseur. (Kandya & Mohan, 2018)

Impact sur l'extérieur

Les murs sur lesquels est utilisée une isolation thermique par l'extérieur présentent des températures de surface en journée inférieures à celles de murs non isolés et permettent donc de réduire la surchauffe urbaine.

- 1,4°C

Réduction des températures extérieures associées à la mise en place de façades double peau. Ces façades participent également à la réduction des températures de surfaces de 7 à 19,9°C, mais elles présentent un coût de construction très élevé (Andoni & Wonorahardjo, 2018).

Rafrâichissement

+○○ Etat des connaissances

Faible à l'échelle urbaine (aucune étude)

+○○ A l'échelle de la ville

Impact intéressant, mais aucune étude a été effectuée à grande échelle

+○○ A l'échelle de piéton

Impact local moyen

Cobénéfices

○○○ Biodiversité

Impact nul

○○○ Gestion de l'eau pluviale

Impact nul, imperméable

○○○ Séquestration carbone

Pour les isolants biosourcés (stock carbone)

++○ Qualité urbaine et paysagère

Isolation des façades par l'extérieur occasion de travaux de ravalement de façades

○○○ Usages et socialité

Impact nul

○○○ Santé

Impact nul

++○ Confort

Amélioration du confort en hiver, du confort acoustique, confort d'été

Impacts

++○ Empreinte carbone

Les isolants biosourcés ont un bilan carbone très faible voire positif (stock carbone)

+++ Consommation énergétique

Contribue à la réduction des besoins énergétiques des bâtiments (chauffage et climatisation)

○○○ Consommation d'eau potable

Nulle

+○○ Ressources

Les isolants biosourcés sont des matériaux renouvelables

++○ Coût global

Investissement : en isolation par l'extérieur des murs, entre 80 et 150€/m² de façade
Entretien : pas d'entretien, retour sur investissement liée aux économies d'énergie générées



Bureaux sans climatisation, Gautier Conquet Architectes

LES SOLUTIONS DOUCES

Les solutions douces agissent sur les usages et les pratiques de la ville, à l'échelle individuelle comme à l'échelle collective. Ces solutions agissent sur deux dimensions :

- La limitation des apports de chaleur anthropiques (liés aux activités humaines) ;
- L'adaptation des comportements individuels et collectifs pour limiter la vulnérabilité des habitants à la surchauffe.

Les activités humaines sont responsables en partie de la surchauffe du climat urbain par les rejets de chaleur inhérents aux moteurs thermiques du trafic routier, aux systèmes énergétiques des bâtiments (climatisation, chauffage) et aux process industriels. Agir sur ces activités en les limitant et en proposant des alternatives, permet de réduire la surchauffe urbaine mais aussi réduire les consommations d'énergie et les émissions de pollutions associées.

En réaction notamment à la canicule de 2003, les politiques de santé publique en France ont adopté des « plans canicule » en vue de sensibiliser les populations les plus sensibles (malades, personnes âgées, nourrissons, femmes enceintes...) à adopter des gestes adaptés (hydratation...) et de stimuler la solidarité intergénérationnelle. D'autres actions existent comme l'adaptation de l'habillement, la modification des horaires de travail, mais peu d'études ont pu démontrer l'efficacité de ces solutions.

Réduction du trafic routier et des moteurs thermiques

On compte en ville de nombreuses sources de chaleur liées aux activités humaines. Parmi celles-ci, le trafic motorisé, l'activité industrielle et celle des bâtiments génèrent des rejets de chaleur anthropique élevés dans le microclimat urbain.

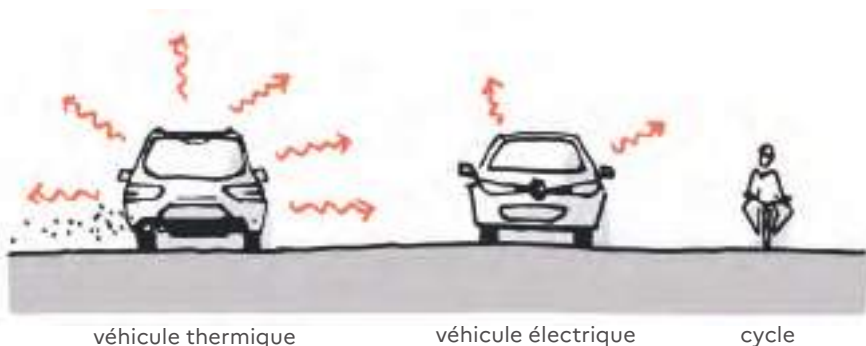


Annecy (74)
Crédit : JM Favre

Les actions de réduction des émissions de chaleur associées au trafic routier peuvent relever de plusieurs types :

- limitation de la circulation de tous les véhicules motorisés (péages urbains, piétonnisation des rues, zones 30 et zones de rencontre, limitation du gabarit des rues ...)
- limitation des vitesses de circulation ;
- sensibilisation à la conduite économe et l'utilisation raisonnée de la climatisation ;
- encouragement au report vers les transports en commun et modes doux (marche, vélo) ;
- encouragement au report vers les véhicules électriques (électrifiés, hybrides rechargeables, hybrides) ;
- mise en place d'infrastructures facilitant l'utilisation de la voiture partagée ;
- encouragement à la sobriété des déplacements (mixité fonctionnelle, vie de quartier, éducation ...)

Phénomènes en jeu :
La circulation routière émet de la chaleur sensible et, dans une moindre mesure, de la chaleur latente (vapeur d'eau chaude).



véhicule thermique

véhicule électrique

cycle

A l'échelle locale

A l'échelle locale, l'effet des véhicules motorisés sur le confort du piéton est surtout lié aux rejets de la climatisation.

Dans les villes américaines comme Houston, la chaleur anthropique totale du secteur des véhicules peut s'élever à 300 W/m² en heure de pointe (Sailor et Lu, 2004).

A l'échelle urbaine

(Kolbe, 2019) étudie l'impact de plusieurs alternatives aux véhicules conventionnels sur l'ICU de la ville de Pékin : les véhicules électriques (électricité produite par des éoliennes) ; les véhicules à hydrogène produit par électrolyse (avec un mix énergétique habituel) ; les véhicules à hydrogène produit par électrolyse (avec une l'électricité est produite par des éoliennes) ; les véhicules diesel performants et le remplacement des véhicules individuels par un métro efficace.

- Presque toutes les options conduisent à une réduction de l'ICU sauf les véhicules à hydrogène utilisant le mix énergétique actuel.

- La différence entre les véhicules électriques utilisant de l'électricité éolienne, les véhicules à hydrogène produit par électrolyse à partir d'électricité éolienne, et le métro est relativement faible.

- Ici ne sont estimés que les effets directs, mais cette réduction de température conduit également à une réduction des consommations de climatisation et donc aussi de ses rejets de chaleur.

1 °C

A Pékin, réduction de l'ICU du fait du remplacement de l'ensemble des véhicules conventionnels par le métro, les véhicules électriques utilisant de l'électricité éolienne, ou les véhicules à hydrogène produit par électrolyse à partir d'électricité éolienne (modélisation, Kolbe, 2019)

0,94°C

Le remplacement des véhicules conventionnels par des véhicules électrique à Pékin pourrait réduire l'intensité de l'ICU en été d'environ 0,94°C pour un ICU d'intensité moyenne l'été de 3°C. (Li et al., 2015)

Rafrâichissement

+○○ Etat des connaissances

Faible Il s'agit d'un sujet très peu étudié. Les seules études disponibles portent sur l'impact des changements de motorisation, à l'échelle d'une ville.

+○○ A l'échelle de la ville

Impact modéré

+○○ A l'échelle du piéton

Impact uniquement dans les rues à forte circulation

Cobénéfices

+○○ Biodiversité

Libère de l'espace urbain de voirie pour de potentielles plantations, limite les coupures dans la trame verte

+○○ Gestion de l'eau pluviale

Libère de l'espace urbain de voirie pour de potentiels espaces perméables

+○○ Séquestration carbone

Libère de l'espace urbain de voirie pour de potentielles plantations

+○○ Qualité urbaine et paysagère

Espace visuellement libéré de la voiture

+○○ Usages et socialité

Espace libéré pour accueillir des usages, ambiance acoustique favorable aux usages

+○○ Santé

Amélioration du bruit et de la qualité de l'air, réduction des accidents, les mobilités actives réduisent la sédentarité

+○○ Confort

Ambiance acoustique apaisée

Impacts

+○○ Empreinte carbone

La réduction du trafic routier et le report vers des modes doux à un impact très positif sur le bilan carbone

+○○ Consommation énergétique

Les consommations d'énergie sont réduites

○○ Consommation d'eau potable

Nulle

+○○ Ressources

La réduction du parc automobile et de la consommation de pétrole

○○ Coût global

Investissement et entretien : bilan nul voire positif, mais il est difficile à quantifier tant la diversité des mesures génère des coûts différents

Limitation de la climatisation

La climatisation consiste à modifier, contrôler et réguler les conditions climatiques (température, humidité) d'un local. Les installations les plus couramment installées sont les systèmes à air sec, qui traitent l'air et cela permet de le rafraîchir. Par un système d'échange de chaleur, l'unité intérieure diffuse du froid tandis que l'unité extérieure rejette de la chaleur dans l'air urbain. Ces systèmes sont responsables en partie de la surchauffe urbaine. Aussi, il est important de privilégier des solutions alternatives à la climatisation :

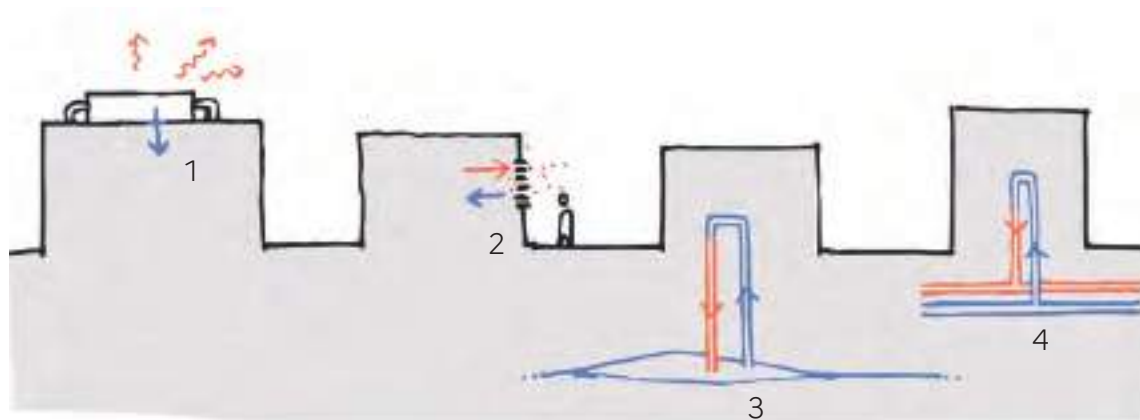
- par la conception bioclimatique passive des bâtiments en

construction et en rénovation :

- protections solaires, isolation de l'enveloppe, inertie intérieure associée à la ventilation nocturne ;
- par l'augmentation des températures de consigne des locaux climatisés à 28°C ou l'emploi de normes de confort adaptatifs.

Dans le cas où les solutions précédentes restent insuffisantes, il est préférable d'avoir recours à des solutions qui ne rejettent pas de chaleur dans les milieux naturels (air ambiant ou nappe).

Les différents types de systèmes de rafraîchissement actifs

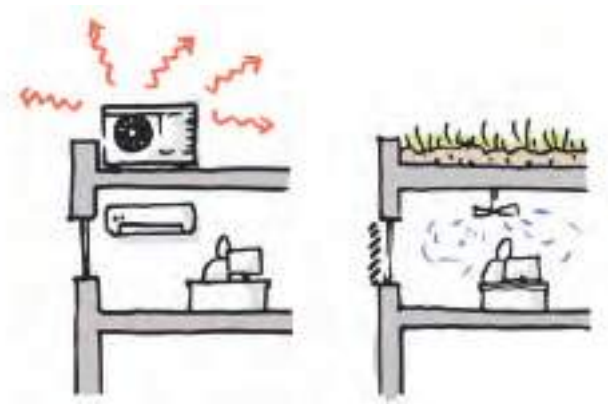


1. Les systèmes à air à rejet sec. Cette solution employée massivement engendre des rejets d'air chaud sur l'extérieur, ce qui aggrave l'effet d'îlot de chaleur urbain la nuit et entraîne en retour une augmentation des besoins de refroidissement.

2. Les systèmes adiabatiques, systèmes à air à rejet humide. La chaleur latente fait augmenter le taux d'humidité dans l'air et dégrade sensiblement le confort extérieur

3. Les systèmes géothermiques ou sur nappe. Ils ont des impacts sur les milieux aquifères souterrains en particulier en milieu urbain.

4. Les réseaux urbains de froid. Le refroidissement du réseau urbain n'augmente pas significativement les températures d'air dans le milieu urbain et les rejets sont déportés sur le lieu de production de froid.



climatisation

approche passive
du confort

Systèmes à air sec, à l'échelle locale

Le réchauffement augmente avec la puissance des rejets de chaleur.

+ 0,2 à + 2,5°C

Augmentation locale de la température de l'air à l'extérieur, pour une climatisation à air sec. (Wang et al., 2018), (Munck et al., 2013)

- 0,4 à - 0,8°C

A Hong-Kong, diminution de la température de l'air à 2m de haut durant un événement extrême dans les quartiers les plus denses, du fait de la mise en place de réseaux urbains de refroidissement (Wang et al., 2018)

Systèmes à air sec, à l'échelle urbaine

Les effets sont plus importants dans les centres urbains que dans les périphéries urbaines.

+ 3,75°C⁽¹⁾ / + 4,5°C⁽²⁾ / + 5,5°C⁽³⁾

Amplitude de l'ICU à Paris sans climatisation (1), avec rejet sensible de tous les bâtiments dans l'air (2), et dans le cas où tous les rejets sont doublés (3) (Tremeac et al., 2012)

10 à 120%

Fourchette d'augmentation de la consommation de refroidissement induite par l'îlot de chaleur urbain : une grande variabilité d'une ville à l'autre. (Li et al., 2014a)

Rafrâichissement

++○ Etat des connaissances
Rejets secs : bonne,
Rejets humides : moyenne,
Réseaux urbains : moyenne

++○ A l'échelle de la ville

Impact moyen

++○ A l'échelle du piéton

Impact moyen

Cobénéfices

○○○ Biodiversité

Impact nul

○○○ Gestion de l'eau pluviale

Impact nul

○○○ Séquestration carbone

Impact nul

++○ Qualité urbaine et paysagère

Impact nul

○○○ Usages et socialité

Impact nul

++○ Santé

Moins d'assèchement de l'air intérieur

++○ Confort

Ambiance acoustique apaisée

Impacts

+++ Empreinte carbone

Amélioration importante du bilan carbone,

+++ Consommation énergétique

Réduction significative des consommations électriques

○○○ Consommation d'eau potable

Pour le système à eau

+++ Ressources

Les systèmes techniques utilisés sont impactants sur les ressources

++○ Coût global

Investissement : rénovation ou conception intégrant des approches frugales, potentiellement coûteuses

Entretien : moins cher en fonctionnement que la climatisation

Adaptations individuelles et sociétales aux fortes chaleurs

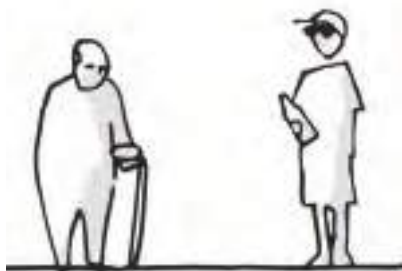
L'adaptation aux effets du changement climatique est « la démarche d'ajustement au climat actuel ou à venir, ainsi qu'à ses conséquences » (GIEC). On distingue, dans la littérature scientifique, l'adaptation physiologique (ou acclimatation) et les adaptations sociétales. Ne sont ici évoquées que les adaptations sociétales. On distingue, pour celles-ci, deux échelles d'adaptation, pourtant étroitement liées l'une à l'autre :

- L'adaptation individuelle. Ce sont

les modifications apportées aux comportements qui peuvent aider à réduire les impacts des vagues de chaleur, comme l'installation et le recours à un système de rafraîchissement, l'ouverture des fenêtres la nuit, la mobilité pour échapper à la chaleur, le décalage des horaires de sommeil, le changement des horaires de travail ou la réduction des activités en extérieur...

- L'adaptation planifiée à grande échelle, par les pouvoirs publics. Les politiques publiques de limitation des impacts sanitaires de la chaleur existent depuis les années 1990 aux Etats-Unis, et ont progressivement été mis en place suite à la canicule de 2003 en Europe. Elles comprennent l'amélioration des services de santé, un système d'alerte précoce, et des consignes relatives aux comportements à adopter pour le grand public.

Ces politiques permettent de limiter l'exposition à la chaleur, d'améliorer le ressenti thermique de la chaleur et de limiter ses impacts sanitaires (mortalité et morbidité).



Selon le métabolisme, l'habillement, l'activité, ses pratiques, chacun est plus ou moins vulnérable aux fortes chaleurs

Efficacité des comportements adaptatifs individuels

- Une enquête menée en 2018 au Québec sur l'adaptation individuelle aux vagues de chaleur a démontré que pour une grande majorité des individus sondés, l'adoption de comportements d'adaptation est efficace pour réduire les impacts de la chaleur sur leur santé physique ou mentale. Les personnes âgées de 60 ans et plus sont moins nombreuses à observer ces effets bénéfiques.

- Par ailleurs, et c'est parce que c'est une des rares mesures d'adaptation individuelle dont les effets ont été étudiés, le décalage des heures de sommeil (1h du matin au lieu de 11h du soir) améliore à la marge la qualité des nuits.

89,85 %
des 1000 québécois enquêtés en 2018 affirment que le fait d'adopter un ou plusieurs comportements d'adaptation à la chaleur les aide à ressentir moins de conséquences négatives sur leur santé physique ou mentale.
(OQACC, 2018)

14%
C'est la réduction des heures de sommeil marquées par une forte chaleur, du fait du décalage de l'horaire de coucher à 1h du matin (au lieu de 11h du soir) à Paris (Hendel et al, 2016)

Efficacité des politiques d'adaptation planifiée

Il existe un consensus scientifique sur l'efficacité de la mise en place de plans de prévention sur la réduction des impacts sanitaires des canicules, notamment dans la réduction de la mortalité des plus âgés.

3 à 4 fois moins
de morts qu'attendu sur des vagues de chaleur récentes à Stockholm, à Londres et en France, du fait de la mise en place de politiques nationales d'adaptation.
(Knappenberger et al, 2014 ; Green et al, 2016 ; Fouillet et al, 2006)

32 à 69%
De réduction du nombre de morts liées aux fortes chaleurs dans un futur marqué par le changement climatique (2050), dans le cas où des mesures d'adaptation seraient mises en œuvre (étude prospective sur le Grand Londres, Jenkins et al, 2014)

Rafrâichissement

+○○ Etat des connaissances
L'efficacité des comportements adaptatifs individuels est très peu étudiée. moyenne
○○○ A l'échelle de la ville
Impact nul
+ + ○ A l'échelle du piéton
Amélioration du ressenti de la chaleur
Amélioration mortalité & morbidité très élevée

Cobénéfices

○○○ Biodiversité
Impact nul
○○○ Gestion de l'eau pluviale
Impact nul
○○○ Séquestration carbone
Impact nul
○○○ Qualité urbaine et paysagère
Impact nul
+ + ○ Usages et socialité
Adaptation des usages, solidarité entre les générations, prise en compte des plus fragiles, proposition d'espaces d'accueil pour tous
+ + + Santé
Meilleur ressenti de la chaleur, impacts sanitaires important sur la santé mentale et physique
○○○ Confort
Pas d'impact

Impacts

○○○ Empreinte carbone
+○○ Consommation énergétique
Mesures complémentaires aux mesures lourdes, peu demandeuses en énergie
-○○ Consommation d'eau potable
Faible
○○○ Ressources
Mesures complémentaires aux mesures lourdes, peu demandeuses en ressources
+○○ Coût global
Investissement et fonctionnement : lourd pour les investissements en équipements de santé, en personnel de santé, en dispositifs de vigilance...
Mais à mettre en regard du coût évité (surcharge des équipements de santé)



Lyon-Confluence (69)
Paysagiste : Michel DESVIGNES
Crédit : MP COASSY

CONCLUSION

Les collectivités et les acteurs opérationnels (maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvre...) s'engagent de plus en plus vers des actions de rafraîchissement urbain.

De nombreux travaux de recherche ont été menés ces dernières années mais il reste encore un travail colossal avant de disposer de modèles fiables et de données quantifiables sur l'efficacité de ces solutions. Des tendances se dégagent, mais il faut encore prendre des précautions avant de tenter d'extrapoler les résultats donnés ici, aux villes françaises.

L'enjeu, à ce stade, est donc de multiplier les expérimentations et les démarches d'évaluation, et de capitaliser des données chiffrées qui pourront être partagées et permettront de consolider une connaissance pour les villes et les climats français. Aussi, nous encourageons les acteurs publics et privés à intégrer une démarche de suivi et d'évaluation dans leurs opérations d'aménagement, soit en associant des acteurs de la recherche, soit via des missions d'évaluation

spécifiques.

Par ailleurs, il n'existe pas de solution ou de combinaisons de solutions de rafraîchissement systématisables à l'ensemble des situations. Les effets attendus de chaque solution sur le climat urbain diffèrent selon le contexte urbain dans lequel ils s'insèrent. Aussi, une analyse fine du contexte, des enjeux et des impacts attendus de chaque projet reste indispensable pour choisir la où les solutions de rafraîchissement les mieux adaptées.

Enfin, la prise en compte des cobénéfices et des effets indirects de chaque solution, en plus de son impact climatique, permet d'assurer un meilleur bilan global en faveur de la transition écologique.

GLOSSAIRE

Enjeux du climat

GIEC, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a été créé en 1988 en vue de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques.

RCP « Representative Concentration Pathways » ou « Profils représentatifs d'évolution de concentration » correspondent aux scénarios à quatre profils d'évolution des concentrations des gaz à effet de serre (RCP) ont été retenus par les experts du GIEC :

- RCP 8.5 : pas de politique de lutte contre le changement climatique (le plus pessimiste) ;
- RCP 6.0 et RCP 4.5 : scénarios intermédiaires intégrant des politiques de réduction ;
- RCP 2.6 : politique de réduction des émissions susceptibles de limiter le réchauffement planétaire à 2°C.

La classification de Köppen-Geiger : La classification des climats selon Köppen est fondée d'une part sur la température et d'autre part sur l'importance des précipitations. Un codage en deux ou trois lettres permet de caractériser chaque climat de manière précise à l'échelle du globe.

Grandeurs météorologiques

Hygrométrie, Humidité Relative (HR) : rapport de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air sur la quantité de vapeur d'eau maximale possible. L'humidité relative s'exprime en pourcentage. 100 % correspond à un air saturé en vapeur d'eau (risque de nuage, pluie, brouillard, rosée ou givre), 0 % à un air parfaitement sec (cette valeur d'humidité relative n'est jamais atteinte dans la nature, pas même dans les déserts).

Vitesse du vent : mouvement de l'air et dont la vitesse s'exprime en mètre par seconde.

Température d'air en °K ou °C : degré de chaleur de l'air. L'unité internationale est le Kelvin (K) dont le 0 est le zéro absolu, la température la plus basse de l'univers où il n'y a aucune agitation moléculaire. En France la température s'exprime en degré Celsius (°C) dont 0°C est le point de congélation de l'eau et 100°C le point d'ébullition.

Température Moyenne Radiante (en °K ou °C), T_{MRT} correspond à une température uniforme qui permet de globaliser les échanges thermiques par rayonnement avec l'environnement. Elle rend compte de la contribution de toutes les surfaces «vues» par le corps humain (parois, ciel, soleil)...

Température globe noir : mesure la température de rayonnement utilisant un thermomètre à l'intérieur d'une sphère de cuivre peinte en noir de 15,2 cm de diamètre.

Rayonnement Infrarouge : rayonnement électromagnétique dont le domaine de longueurs d'onde est compris entre celui du rayonnement visible, qui s'achève avec la lumière rouge entre 0,75 et 0,80 m, et celui des ondes radioélectriques, qui commence conventionnellement à 1 mm, soit 1 000 m.

Caractéristiques et phénomènes physiques

ICU, Ilot de chaleur urbain, est un phénomène du climat local qui se caractérise par des températures plus élevées en ville par rapport à la campagne environnante, ou à une moyenne régionale. Il est causé par le cumul de phénomènes liés à la morphologie urbaine, aux surfaces fortement minérales et aux apports de chaleur anthropique. En moyenne, l'ICU est plus intense en hiver du fait des déperditions de chauffage. En été, l'ICU est principalement marqué en fin de journée et la nuit et il est plus problématique en période de fortes chaleurs.

Albédo : pouvoir réfléchissant d'une surface, c'est-à-dire le rapport de l'énergie solaire réfléchi à l'énergie solaire incidente. L'albédo dépend de la couleur et de la rugosité de la surface en question. Un revêtement noir ou foncé aura un albédo proche de 0 alors qu'une surface blanche aura un albédo se rapprochant de 1.

Inertie thermique est la capacité physique d'un élément à conserver, stocker puis restituer la chaleur. Les revêtements urbains minéraux (enrobé, béton, asphalte...) ont une inertie forte c'est-à-dire qu'ils stockent la chaleur du soleil en journée et la restitue jusque dans la nuit, cela est une des causes de l'effet d'ilot de chaleur. Dans le cas des bâtiments, une bonne inertie à l'intérieur permet de conserver la fraîcheur en journée en été quand cela est associé à une ventilation nocturne.

Chaleur anthropique : chaleur produite par les activités humaines (climatisation en été rejetant de la chaleur, émission de chaleur des industries et des véhicules). En ville, la chaleur anthropique est l'un des paramètres de l'ilot de chaleur urbain.

Chaleur sensible : Quand un corps est chauffé ou refroidi, l'augmentation ou la diminution de cette température sans changement d'état physique est appelée la chaleur sensible.

Chaleur latente est la chaleur consommée par un changement d'état sans modifier la température d'un corps. Par exemple, l'eau a la capacité de changer d'état physique en passant de l'état liquide à gazeux. Cela consomme de l'énergie, sous forme de chaleur, retirée de l'air ambiant.

Evapotranspiration provient de l'évaporation du sol et de la transpiration des plantes. Ces pertes de vapeur d'eau sont dues à la photosynthèse et dépendent particulièrement de la chaleur fournie par le rayonnement solaire, la quantité d'eau disponible dans le sol mais aussi de l'espèce végétale. En cas de sécheresse, le végétal est en stress thermique et réduit fortement son évapotranspiration.

Température de fusion est la température à laquelle un corps change d'état, de solide à liquide. Pour l'eau, elle est à 0°C.

Indices de confort

PET, Physiological Equivalent Temperature : L'indice PET Les paramètres nécessaires pour calculer la PET sont : la température d'air (°C), l'humidité relative (%), le rayonnement global (W/m²).

UTCI, Universal Thermal Climate Index : L'indice UTCI est un indicateur de confort qui agrège le rayonnement solaire, les températures des surfaces, la température, la vitesse et l'humidité de l'air ambiant. Il produit une température équivalente au ressenti thermique jusqu'à un niveau de stress thermique. Le calcul de l'indice UTCI s'appuie sur plusieurs hypothèses : l'activité de référence est la marche avec une vitesse de 4km/h pour un niveau métabolique de et l'isolation des vêtements moyen.

Stress thermique : désigne l'incapacité du corps humain à maintenir une température corporelle normale en raison de conditions de température et d'humidité trop élevées. Cela expose les personnes à des maladies liées à la chaleur (crampes de chaleur, l'épuisement et les coups de chaleur) voir à la mort.

Modèles urbains et environnementaux

Facteur de vue du ciel correspond à la portion de ciel observable à partir de la surface considérée. Il caractérise la morphologie urbaine.

COS, densité bâtie : indique le rapport entre la somme des surfaces de plancher et la surface totale du terrain étudié, on peut aussi appeler cela le COS, coefficient d'occupation du sol.

CES, emprise bâtie : correspond à l'empreinte du bâtiment au sol par rapport à la surface au sol du terrain, on l'appelle aussi le coefficient d'emprise au sol.

Rapport H/L ou H/W : rapport de la hauteur et de la largeur dans une rue de type « canyon ».

Compacité : Définit comme la relation entre l'espace utilisable des immeubles (volume) et l'espace occupé par l'urbain (superficie).

TEB, Town Energy Balance : Le modèle TEB a été développé par le CNRM et MétéoFrance pour calculer les échanges d'énergie et d'eau entre les villes et l'atmosphère. Il peut s'appliquer à l'échelle d'une ville, d'un quartier ou d'un bâtiment. Le modèle tient compte d'un grand nombre de processus physiques : ombres, piégeage radiatif, conduction de chaleur à travers les toits, routes et murs, interception de l'eau de pluie, évaporation et ruissellement, échanges turbulents et microclimat dans la rue, thermique du bâtiment.

Outils d'urbanisme

PCAET, Plan Climat Air Energie Territorial : Outil stratégique et opérationnel, obligatoire pour les collectivités de plus de 20 000 habitants. Il cadre la politique d'un territoire de lutte pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'adaptation au changement climatique, la sobriété énergétique, la qualité de l'air, le développement des énergies renouvelables.

SCOT, Schéma de Cohérence Territoriale : document de planification à l'échelle d'un bassin d'emploi servant de cadre de référence pour les différentes politiques sectorielles, (urbanisme, habitat, mobilités, économie, environnement...)

PLU, Plan Local d'Urbanisme PLUI, Plan Local d'Urbanisme Intercommunal : document d'urbanisme réglementaire qui concerne à la fois les terrains publics et privés. Il sert de référence obligatoire à l'instruction des diverses demandes d'occupation ou d'utilisation des sols comme les permis de construire.

OAP, Orientation d'Aménagement et de Programmation : pièce intégrée au PLU qui vise à définir des intentions d'aménagement sur un secteur donné, quelle qu'en soit l'échelle (îlot, quartier, commune, groupe de communes, territoire intercommunal...).

SPR, Site Patrimonial Remarquable a pour objectif de protéger et mettre en valeur le patrimoine architectural, urbain et paysager de nos territoires.

OPAH, Opération programmée d'amélioration de l'habitat est une convention passée entre une collectivité, l'État et l'Agence nationale de l'habitat (Anah) en vue de requalifier et de réhabiliter un quartier bâti en proposant une aide technique et financière aux copropriétés et propriétaires. L'OPATB, Opération programmée de l'amélioration thermique du bâtiments concernent spécifiquement l'amélioration énergétique que ce soit de l'habitat, du tertiaire.

PDM, Un Plan de Mobilité est un outil qui permet d'optimiser les déplacements liés à l'activité d'une entreprise, en valorisant les moyens les moins impactant pour l'environnement et les plus pratiques pour les salariés.

ZFE, Les zones à faibles émissions mobilité ont été créées pour protéger les habitants des villes et métropoles où la pollution de l'air est importante. Dans le périmètre d'une ZFE, seuls les véhicules les moins polluants ont le droit d'y circuler et des limitations du trafic.

Label EcoQuartier : projet d'aménagement multifacettes qui intègre tous les enjeux et principes de la ville et des territoires durables définit selon 20 engagements. Ce label est porté par le Ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales et Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire.

HQE, Haute Qualité Environnementale : La certification HQE Bâtiment Durable a pour but de faire progresser les performances des bâtiments, d'attester et de valoriser les performances durables atteintes. C'est une certification globale qui intègre l'ensemble des enjeux du développement durable.

LEED, Leadership in Energy and Environmental Design, est une certification environnementale écologique pour les bâtiments initiée aux Etats-Unis en l'an 2000 et actuellement la plus diffusée dans le monde.

BREEAM, BRE Environmental Assessment Method est la méthode d'évaluation du comportement environnemental des bâtiments développée en Grande-Bretagne.

RE 2020 : La nouvelle Réglementation Environnementale qui sera applicable 2022 intègre la consommation énergétique des bâtiments neufs, mais aussi leur bilan carbone, en incluant l'analyse du cycle de vie des matériaux et équipements employés.

SOLUTIONS VERTES

Parcs

- Amani-Beni, M., Zhang, B., Xie, G., & Xu, J. (2018). Impact of urban park's tree, grass and waterbody on microclimate in hot summer days: A case study of Olympic Park in Beijing, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 32, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.03.016>
- Asgarian, A., Amir, B. J., & Sakieh, Y. (2015). Assessing the effect of green cover spatial patterns on urban land surface temperature using landscape metrics approach. *Urban Ecosystems*, 18(1), 209–222. <https://doi.org/10.1007/s11252-014-0387-7>
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Chang, C.-R., Li, M.-H., & Chang, S.-D. (2007). A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and Urban Planning*, 80(4), 386–395. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.09.005>
- Demuzere, M., Orru, K., Heidrich, O., Olazabal, E., Geneletti, D., Orru, H., Bhawe, A. G., Mittal, N., Feliu, E., & Fahnle, M. (2014). Mitigating and adapting to climate change: Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 146, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.025>
- Giridharan, R., Lau, S. S. Y., Ganesan, S., & Givoni, B. (2008). Lowering the outdoor temperature in high-rise high-density residential developments of coastal Hong Kong: The vegetation influence. *Building and Environment*, 43(10), 1583–1595. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.003>
- Jagannathan, M., Knapp, S., Buchmann, C. M., & Schwarz, N. (2016). The Bigger, the Better? The Influence of Urban Green Space Design on Cooling Effects for Residential Areas. *Journal of Environmental Quality*, 45(1), 134–145. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.01.0062>
- Konarska, J., Holmer, B., Lindberg, F., & Thorsson, S. (2016). Influence of vegetation and building geometry on the spatial variations of air temperature and cooling rates in a high-latitude city. *International Journal of Climatology*, 36(5), 2379–2395. <https://doi.org/10.1002/joc.4502>
- Kong, F., Yin, H., James, P., Hutyra, L. R., & He, H. S. (2014). Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in a large metropolitan area of eastern China. *Landscape and Urban Planning*, 128, 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.04.018>
- Le, Minh Tuan, Cao, Thi Anh Tuyet, & Tran, Nguyen Anh Quan. (2019). The role of green space in the urbanization of Hanoi city. *E3S Web Conf.*, 97, 01013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199701013>
- Lu, J., Li, C., Yang, Y., Zhang, X., & Jin, M. (2012). Quantitative evaluation of urban park cool island factors in mountain city. *Journal of Central South University*, 19(6), 1657–1662. <https://doi.org/10.1007/s11771-012-1189-9>
- Monteiro, M. V., Doick, K. J., Handley, P., & Peace, A. (2016). The impact of greenspace size on the extent of local nocturnal air temperature cooling in London. *Urban Forestry & Urban Greening*, 16, 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.02.008>
- Taleghani, M. (2018). Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies- A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2011–2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.010>
- Wong, N. H., & Yu, C. (2005). Study of green areas and urban heat island in a tropical city. *Habitat International*, 29(3), 547–558. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2004.04.008>
- Yan, H., & Dong, L. (2015). The impacts of land

- cover types on urban outdoor thermal environment: The case of Beijing, China. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 13, 43–43. <https://doi.org/10.1186/s40201-015-0195-x>
- Yang, G., Yu, Z., Jørgensen, G., & Vejre, H. (2020). How can urban blue-green space be planned for climate adaption in high-latitude cities? A seasonal perspective. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101932. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101932>
- Yang, J., Kumar, D., Ilamathy [Mohan, Pyrgou, A., Chong, A., Santamouris, M., Kolokotsa, D., & Lee, S. E. (2018). Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate. *Solar Energy*, 173, 597–609. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.006>
- Yu, Z., Guo, X., Jørgensen, G., & Vejre, H. (2017). How can urban green spaces be planned for climate adaptation in subtropical cities? *Ecological Indicators*, 82, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.002>
- Yu, Z., Xu, S., Zhang, Y., Jørgensen, G., & Vejre, H. (2018). Strong contributions of local background climate to the cooling effect of urban green vegetation. *Scientific Reports*, 8(1), 6798. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25296-w>
- Yu, Z., Yang, G., Zuo, S., Jørgensen, G., Koga, M., & Vejre, H. (2020). Critical review on the cooling effect of urban blue-green space: A threshold-size perspective. *Urban Forestry & Urban Greening*, 49, 126630. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126630>

Arbres

- Arghavani, S., Malakooti, H., & Bidokhti, A.-A. [Ali A. (2020). Numerical assessment of the urban green space scenarios on urban heat island and thermal comfort level in Tehran Metropolis. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121183. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121183>
- Chen, J., Jin, S., & Du, P. (2020). Roles of horizontal and vertical tree canopy structure in mitigating daytime and nighttime urban heat island effects. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 89, 102060. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102060>
- de Munck, C. (2013). Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville [Ph. D. Thesis]. Université de Toulouse.
- Leuzinger, S., Vogt, R., & Körner, C. (2010). Tree surface temperature in an urban environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 56–62.
- Manickathan, L., Defraeye, T., Allegrini, J., Derome, D., & Carmeliet, J. (2018). Parametric study of the influence of environmental factors and tree properties on the transpirative cooling effect of trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 259–274. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.01.014>
- Morakinyo, T. E., Ouyang, W., Lau, K. K.-L., Ren, C., & Ng, E. (2020). Right tree, right place (urban canyon): Tree species selection approach for optimum urban heat mitigation—Development and evaluation. *Science of The Total Environment*, 719, 137461. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137461>
- Oke, T. R., Crowther, J. M., McNaughton, K. G., Monteith, J. L., Gardiner, B., Jarvis, P. G., Monteith, J. L., Shuttleworth, W. J., & Unsworth, M. H. (1989). The micrometeorology of the urban forest. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 324(1223), 335–349. <https://doi.org/10.1098/rstb.1989.0051>
- Rahman, M. A., Moser, A., Anderson, M., Zhang, C., Rötzer, T., & Pauleit, S. (2019). Comparing the infiltration potentials of soils beneath the canopies of two contrasting urban tree species. *Urban Forestry & Urban Greening*, 38, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.11.002>
- Rahman, M. A., Stratopoulos, L. M. F., Mo-

- ser-Reischl, A., Zölch, T., Häberle, K.-H., Rötzer, T., Pretzsch, H., & Pauleit, S. (2020). Traits of trees for cooling urban heat islands: A meta-analysis. *Building and Environment*, 170, 106606. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106606>
- Speak, A., Montagnani, L., Wellstein, C., & Zerbe, S. (2020). The influence of tree traits on urban ground surface shade cooling. *Landscape and Urban Planning*, 197, 103748. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103748>

Toitures végétalisées

- Alexandri, E., & Jones, P. (2006). Green Roofs versus Ponds and High Albedo Materials as Passive Cooling Techniques of Urban Spaces.
- Arghavani, S., Malakooti, H., & Bidokhti, A.-A. [Ali A. (2020). Numerical assessment of the urban green space scenarios on urban heat island and thermal comfort level in Tehran Metropolis. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121183. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121183>
- Berndtsson, J. C., Bengtsson, L., & Jinno, K. (2009). Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. *Ecological Engineering*, 35(3), 369–380. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.09.020>
- Bevilacqua, P., Mazzeo, D., Bruno, R., & Arcuri, N. (2017). Surface temperature analysis of an extensive green roof for the mitigation of urban heat island in southern mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 150, 318–327. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.081>
- Bianchini, F., & Hewage, K. (2012). How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. *Building and Environment*, 48, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.019>
- Bouzouidja, R., Séré, G., Clavier, R., Ouvrard, S., & Lacroix, D. (2018). Green roof aging: Quantifying the impact of substrate evolution on hydraulic performances at the lab-scale. *Journal of Hydrology*, 516, 416–423. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.032>
- Costanzo, V., Evola, G., & Marletta, L. (2016). Energy savings in buildings or UHI mitigation? Comparison between green roofs and cool roofs. *Energy and Buildings*, 114, 247–255. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.053>
- de Munck, C. (2013). Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville [Ph. D. Thesis]. Université de Toulouse.
- Guillaume, G., Gauthreau, B., & L'Hermite, P. (2013). Acoustic predictions for sustainable development of cities: Urban vegetation effects. *Proc. WGIC2013. VegDUD day*, Nantes (F), 9 sept. 2013, Nantes, France.
- Herrera-Gomez, S. S., Quevedo-Nolasco, A., & Pérez-Urrestarazu, L. (2017). The role of green roofs in climate change mitigation. A case study in Seville (Spain). *Building and Environment*, 123, 575–584. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.036>
- Huang, Y.-Y., Chen, C.-T., & Tsai, Y.-C. (2016). Reduction of temperatures and temperature fluctuations by hydroponic green roofs in a subtropical urban climate. *Energy and Buildings*, 129, 174–185. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.023>
- Jim, C. Y. (2015). Assessing climate-adaptation effect of extensive tropical green roofs in cities. *Landscape and Urban Planning*, 138, 54–70. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.014>
- Karachaliou, P., Santamouris, M., & Pangalou, H. (2016). Experimental and numerical analysis of the energy performance of a large scale intensive green roof system installed on an office building in Athens. *Energy and Buildings*, 114, 256–264. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.055>
- MacIvor, J. S., & Lundholm, J. (2011). Insect species composition and diversity on intensive green roofs and adjacent level-ground habitats. *Urban Ecosystems*, 14(2), 225–241. <https://doi.org/10.1007/s11252-014-0387-7>

org/10.1007/s11252-010-0149-0

- Madre, F., Vergnes, A., Machon, N., & Clergeau, P. (2014). Green roofs as habitats for wild plant species in urban landscapes: First insights from a large-scale sampling. *Landscape and Urban Planning*, 122, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.012>
- Mentens, J., Raes, D., & Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*, 77(3), 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>
- Reyes, R., Bustamante, W., Gironás, J., Pastén, P. A., Rojas, V., Suárez, F., Vera, S., Victorero, F., & Bonilla, C. A. (2016). Effect of substrate depth and roof layers on green roof temperature and water requirements in a semi-arid climate. *Ecological Engineering*, 97, 624–632. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.025>
- Shafique, M., Luo, X., & Zuo, J. (2020). Photovoltaic-green roofs: A review of benefits, limitations, and trends. *Solar Energy*, 202, 485–497. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.010>
- Susca, T. (2019). Green roofs to reduce building energy use? A review on key structural factors of green roofs and their effects on urban climate. *Building and Environment*, 162, 106273. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106273>
- Taleghani, M. (2018). Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies- A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2011–2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.010>
- Yang, J., Kumar, D., Iamathy [Mohan, Pyrgou, A., Chong, A., Santamouris, M., Kolokotsa, D., & Lee, S. E. (2018). Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate. *Solar Energy*, 173, 597–609. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.006>

Façades végétalisées

- Alexandri, E., & Jones, P. (2008). Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*, 43(4), 480–493. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.055>
- Bustami, R. A., Belusko, M., Ward, J., & Beecham, S. (2018). Vertical greenery systems: A systematic review of research trends. *Building and Environment*, 146, 226–237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.045>
- Charoenkit, S., & Yiemwattana, S. (2017). Role of specific plant characteristics on thermal and carbon sequestration properties of living walls in tropical climate. *Building and Environment*, 115, 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.017>
- Chiquet, C., Dover, J. W., & Mitchell, P. (2013). Birds and the urban environment: The value of green walls. *Urban Ecosystems*, 16(3), 453–462. <https://doi.org/10.1007/s11252-012-0277-9>
- Feitosa, R. (Castiglia, & Wilkinson, S. J. (2018). Attenuating heat stress through green roof and green wall retrofit. *Building and Environment*, 140, 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.034>
- He, Y., Yu, H., Ozaki, A., Dong, N., & Zheng, S. (2017). A detailed investigation of thermal behavior of green envelope under urban canopy scale in summer: A case study in Shanghai area. *Energy and Buildings*, 148, 142–154. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.014>
- Herath, H. M. P. I. K., Halwatura, R. U., & Jayasinghe, G. Y. (2018). Modeling a Tropical Urban Context with Green Walls and Green Roofs as an Urban Heat Island Adaption Strategy. *Procedia Engineering*, 212, 691–698. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.01.089>
- Lee, L. S. H., & Jim, C. Y. (2019). Energy benefits of green-wall shading based on novel-accurate apportionment of short-wave radiation components. *Applied Energy*, 238, 1506–1518. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.161>
- Malys, L. (2012). Evaluation des impacts directs et indirects des façades et des toitures végétales sur le comportement thermique des bâtiments [Ph. D. Thesis]. Ecole Centrale de Nantes.
- Ottelé, M., Bohemen, H. D. van, & Fraaij, A. L. A. (2010). Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls. *Ecological Engineering*, 36(2), 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.007>

- Perini, K., Ottelé, M., Fraaij, A. L. A., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011). Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment*, 46(11), 2287–2294. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.009>
- Shafiee, E., Faizi, M., Yazdanfar, S.-A., & Khanmohammadi, M.-A. (2020). Assessment of the effect of living wall systems on the improvement of the urban heat island phenomenon. *Building and Environment*, 106923. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106923>
- Taleghani, M., Sailor, D. J., Tenpierik, M., & Dobbeltstein, A. van Tan. (2014). Thermal assessment of heat mitigation strategies: The case of Portland State University, Oregon, USA. *Building and Environment*, 73, 138–150. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.006>
- Victorero, F., Vera, S., Bustamante, W., Tori, F., Bonilla, C., Gironás, J., & Rojas, V. (2015). Experimental Study of the Thermal Performance of Living Walls Under Semiarid Climatic Conditions. *Energy Procedia*, 78, 3416–3421. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.160>
- Wong, N. H., Kwang Tan, A. Y., Chen, Y., Sekar, K., Tan, P. Y., Chan, D., Chiang, K., & Wong, N. C. (2010). Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, 45(3), 663–672. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.005>

Plans d'eau et rivières

- Amani-Beni, M., Zhang, B., Xie, G., & Xu, J. (2018). Impact of urban park's tree, grass and waterbody on microclimate in hot summer days: A case study of Olympic Park in Beijing, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 32, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.03.016>
- Du, H., Wang, D., Wang, Y., Zhao, X., Qin, F., Jiang, H., & Cai, Y. (2016). Influences of land cover types, meteorological conditions, anthropogenic heat and urban area on surface urban heat island in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration. *Science of The Total Environment*, 571, 461–470. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.012>
- Gunawardena, K. R., Wells, M. J., & Kershaw, T. (2017). Utilising green and blue space to mitigate urban heat island intensity. *Science of The Total Environment*, 584–585, 1040–1055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.158>
- Hathway, E. A., & Sharples, S. (2012). The interaction of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect: A UK case study. *Building and Environment*, 58, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.013>
- Lin, Y., Wang, Z., Jim, C. Y., Li, J., Deng, J., & Liu, J. (2020). Water as an urban heat sink: Blue infrastructure alleviates urban heat island effect in mega-city agglomeration. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121411. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121411>
- Murakawa, S., Sekine, T., Narita, K., & Nishina, D. (1991). Study of the effects of a river on the thermal environment in an urban area. *Energy and Buildings*, 16(3), 993–1001. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(91\)90094-J](https://doi.org/10.1016/0378-7788(91)90094-J)
- Saaroni, H., & Ziv, B. (2003). The impact of a small lake on heat stress in a Mediterranean urban park: The case of Tel Aviv, Israel. *International Journal of Biometeorology*, 47(3), 156–165. <https://doi.org/10.1007/s00484-003-0161-7>
- Sun, R., Chen, A., Chen, L., & Lü, Y. (2012). Cooling effects of wetlands in an urban region: The case of Beijing. *Ecological Indicators*, 20, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.02.006>
- Theeuwes, N. E., Solcerova, A., & Steeneveld, G. J. (2013). Modeling the influence of open water surfaces on the summertime temperature and thermal comfort in the city. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(16), 8881–8896. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50704>
- Völker, S., Baumeister, H., Classen, T., Hornberg,

- C., & Kistemann, T. (2013). Evidence for the temperature-mitigating capacity of urban blue space - a health geographic perspective. *Erdkunde*, 67, 355–371.
- Völker, S., & Kistemann, T. (2015). Developing the urban blue: Comparative health responses to blue and green urban open spaces in Germany. *Health & Place*, 35, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2014.10.015>
- Wu, Z., & Zhang, Y. (2019). Water Bodies' Cooling Effects on Urban Land Daytime Surface Temperature: Ecosystem Service Reducing Heat Island Effect. *Sustainability*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/su11030787>
- Yang, G., Yu, Z., Jørgensen, G., & Vejre, H. (2020). How can urban blue-green space be planned for climate adaption in high-latitude cities? A seasonal perspective. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101932. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101932>
- Yu, Z., Yang, G., Zuo, S., Jørgensen, G., Koga, M., & Vejre, H. (2020). Critical review on the cooling effect of urban blue-green space: A threshold-size perspective. *Urban Forestry & Urban Greening*, 49, 126630. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126630>
- Žuvela-Aloise, M., Koch, R., Buchholz, S., & Früh, B. (2016). Modelling the potential of green and blue infrastructure to reduce urban heat load in the city of Vienna. *Climatic Change*, 135(3), 425–438. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1596-2>

SOLUTIONS GRISES

Les formes urbaines bioclimatiques

- Aida, M. (1982). «Urban albedo as a function of the urban structure : a model experiment (part I)». *Boundary-layer meteorology*(23), pp. 405–413.
- Aida, M. et K. Gotoh (1982). «Urban albedo as a function of the urban structure : a two dimensional numerical simulation (part II)». *Boundary-layer meteorology*(23), pp.415–424.
- Bonhomme, M. (2013). Contribution à la génération de bases de données multi-échelles et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine. Université de Toulouse.
- Chen, L., & Ng, E. (2011). Quantitative urban climate mapping based on a geographical database: A simulation approach using Hong Kong as a case study. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(4), 586–594. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.03.003>
- Depecker, P., Menezes, C., Virgone, J., & Lepers, S. (2007). Design of buildings shape and energetic consumption. *Building and Environment*, 36(5), 627–635. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00044-5](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00044-5)
- Dirksen, M., Ronda, R. J., Theeuwes, N. E., & Pagani, G. A. (2019). Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies. *Urban Climate*, 30, 100498. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100498>
- Kondo, A., M. Ueno, A. Kaga et K. Yamaguchi (2001). «The influence of urban canopy configuration on urban albedo». *Boundary-layer-meteorology* 100(2), pp. 225–242.
- Koopmans, S., Heusinkveld, B., & Steeneveld, G.-J. (2019). Standardization of 1-m spatial resolution urban heat maps of Physical Equivalent Temperature to facilitate climate stress tests in the Netherlands. 1.
- Leconte, F., Bouyer, J., & Clavierie, R. (2020). Nocturnal cooling in Local Climate Zone: Statistical approach using mobile measurements. *Urban Climate*, 33, 100629. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100629>
- Liu, N., & Morawska, L. (2020). Modeling the urban heat island mitigation effect of cool coatings in realistic urban morphology.

- Journal of Cleaner Production, 264, 121560. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121560>
- Mills, G. (2009). LUKE HOWARD, TIM OKE AND THE STUDY OF URBAN CLIMATES. 8.
 - Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). Urban Climates.pdf.
 - Pawlak, W. et K. Fortuniak (2003). Application of physical model to study effective albedo of the urban canyon. Fifth international conference on urban climate, Lodz Pl 1-5 septembre 2003, pp. 233-236.
 - Pigliautile, I., Châfer, M., Pisello, A. L., Pérez, G., & Cabeza, L. F. (2020). Inter-building assessment of urban heat island mitigation strategies: Field tests and numerical modelling in a simplified-geometry experimental set-up. *Renewable Energy*, 147, 1663–1675. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.082>
 - Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
 - Theeuwes, N. E., Steeneveld, G. J., Ronda, R. J., Heusinkveld, B. G., van Hove, L. W. A., & Holtslag, A. A. M. (2014). Seasonal dependence of the urban heat island on the street canyon aspect ratio: Street Geometry and the Urban Heat Island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140(684), 2197–2210. <https://doi.org/10.1002/qj.2289>
 - Theeuwes, Natalie E., Steeneveld, G.-J., Ronda, R. J., & Holtslag, A. A. M. (2017). A diagnostic equation for the daily maximum urban heat island effect for cities in northwestern Europe: Diagnostic equation for the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 37(1), 443–454. <https://doi.org/10.1002/joc.4717>
 - Xu, X., Azarijafari, H., Gregory, J., Norford, L., & Kirchain, R. (2020). An integrated model for quantifying the impacts of pavement albedo and urban morphology on building energy demand. *Energy and Buildings*, 211, 109759. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109759>
 - Yang, X., Yao, L., Peng, L. L. H., Jiang, Z., Jin, T., & Zhao, L. (2019). Evaluation of a diagnostic equation for the daily maximum urban heat island intensity and its application to building energy simulations. *Energy and Buildings*, 193, 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.001>
 - Yin, C., Yuan, M., Lu, Y., Huang, Y., & Liu, Y. (2018). Effects of urban form on the urban heat island effect based on spatial regression model. *Science of The Total Environment*, 634, 696–704. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.350>
 - Zhang, X., Steeneveld, G.-J., Zhou, D., Duan, C., & Holtslag, A. A. M. (2019). A diagnostic equation for the maximum urban heat island effect of a typical Chinese city: A case study for Xi'an. *Building and Environment*, 158, 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.05.004>
- Structures d'ombrage**
- Abdallah, A. A. (2020). The impact of outdoor shading strategies on student thermal comfort in open spaces between education building.
 - Ali-Toubert, F. (2007). Effects of asymmetry, galleries, overhanging façades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons.
 - Basaly, L. (2019). Improving the Functional Performance of Outdoor Spaces in Hot Arid Region Using Photovoltaics Systems Electricity generation and thermal comfort.
 - Cheung, P. K. (2018). Comparing the cooling effects of a tree and a concrete shelter using PET and UTCI.
 - Lin, T.-P. (2013). Effects of thermal comfort and adaptation on park attendance regarding different shading levels and activity types.
 - Outline Landscape Architecture. (n.d.). Shade Design for Public Places.
 - Peeters, A. (2020). A decision support tool for calculating effective shading in urban streets.
 - Rodonò, G. (2020). Simulation Workflow for Parametric Optimization of Outdoor Comfort-Based Origami Shelter.
 - Ryu, N.-H. (2013). Pergola's Shading Effects on the Thermal Comfort Index in the Summer Middays.
 - SunSmart Victoria. (2015). Shade Guidelines. Cancer Council Victoria, Melbourne.
 - Vartholomaios, A. (2020). Optimisation of outdoor shading devices with thermal comfort criteria: The case of the Venetian Port of Chania.
 - Yildirim, M. (2020). Shading in the outdoor environments of climate-friendly hot and dry historical streets: The passageways of Sanliurfa, Turkey.
 - Yin, S. (2019). Correlative Impact of Shading Strategies and Configurations Design on Pedestrian-Level Thermal Comfort in Traditional Shophouse Neighbourhoods, Southern China.
- Les panneaux solaires (photovoltaïque et thermique)**
- Barron-Gafford, G. A., Minor, R. L., Allen, N. A., Cronin, A. D., Brooks, A. E., & Pavao-Zuckerman, M. A. (2016). The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures. *Scientific Reports*, 6(1), 35070. <https://doi.org/10.1038/srep35070>
 - Cortes, A., Murashita, Y., Matsuo, T., Kondo, A., Shimadera, H., & Inoue, Y. (2015). Numerical evaluation of the effect of photovoltaic cell installation on urban thermal environment. *Sustainable Cities and Society*, 19, 250–258. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.07.012>
 - Efthymiou, C., Santamouris, M., Kolokotsa, D., & Koras, A. (2016). Development and testing of photovoltaic pavement for heat island mitigation. *Solar Energy*, 130, 148–160. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.054>
 - Masson, V., Bonhomme, M., Salagnac, J.-L., Briottet, X., & Lemonsu, A. (2014). Solar panels reduce both global warming and urban heat island. *Frontiers in Environmental Science*, 2, 14. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00014>
 - Taha, H. (2013). The potential for air-temperature impact from large-scale deployment of solar photovoltaic arrays in urban areas. *Solar Energy*, 91, 358–367. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.09.014>
- Les revêtements à albedo élevé**
- Akbari, H., & Konopacki, S. (2004). Energy effects of heat-island reduction strategies in Toronto, Canada. *Energy*, 29(2), 191–210. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2003.09.004>
 - Bretz, S. E., & Akbari, H. (1997). Long-term performance of high-albedo roof coatings. *Energy and Buildings*, 25(2), 159–167. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01005-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01005-5)
 - Dias, D., Machado, J., Leal, V., & Mendes, A. (2014). Impact of using cool paints on energy demand and thermal comfort of a residential building. *Applied Thermal Engineering*, 65(1–2), 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.12.056>
 - Fabiani, C., Pisello, A. L., Bou-Zeid, E., Yang, J., & Cotana, F. (2019). Adaptive measures for mitigating urban heat islands: The potential of thermochromic materials to control roofing energy balance. *Applied Energy*, 247, 155–170. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.020>
 - Falasca, S. (2019). High albedo materials to counteract heat waves in cities. An assessment of meteorology, buildings energy needs and pedestrian thermal comfort. *Building and Environment*, 14.
 - Georg A. Grell, David R. Stauffer, & Jimmy Duhdia. (1995). A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). M ESOSCALE AND M ICROSCALE M ETEOROLOGY DIVISION. <http://danida.vnu.edu.vn/cpis/files/Books/MM5%20Discription%20-%201995.pdf>
 - Imran, H. M., Kala, J., Ng, A. W. M., & Muthukumaran, S. (2018). Effectiveness of green and cool roofs in mitigating urban heat island effects during a heatwave event in the city of Melbourne in southeast Australia. *Journal of Cleaner Production*, 197, 393–405. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.179>
 - Jandaghian, Z., & Berardi, U. (2020). Analysis of the cooling effects of higher albedo surfaces during heat waves coupling the Weather Research and Forecasting model with building energy models. *Energy and Buildings*, 207, 109627. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109627>
 - Kolokotsa, D., Diakaki, C., Papantoniou, S., & Vlissidis, A. (2012). Numerical and experimental analysis of cool roofs application on a laboratory building in Iraklion, Crete, Greece. *Energy and Buildings*, 55, 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.011>
 - Levinson, R., & Akbari, H. (2002). Effects of composition and exposure on the solar reflectance of portland cement concrete. *Cement and Concrete Research*, 20.
 - Morini, E., Touchaei, A. G., Rossi, F., Cotana, F., & Akbari, H. (2018). Evaluation of albedo enhancement to mitigate impacts of urban heat island in Rome (Italy) using WRF meteorological model. *Urban Climate*, 24, 551–566. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.08.001>
 - Pigliautile, I., Châfer, M., Pisello, A. L., Pérez, G., & Cabeza, L. F. (2020). Inter-building assessment of urban heat island mitigation strategies: Field tests and numerical modelling in a simplified-geometry experimental set-up. *Renewable Energy*, 147, 1663–1675. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.082>
 - Pisello, A. L. (2017). State of the art on the development of cool coatings for buildings and cities. *Solar Energy*, 144, 660–680. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.068>
 - Pisello, A. L., & Rosso, F. (2016). Natural Materials for Thermal Insulation and Passive Cooling Application. *Key Engineering Materials*; Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.666.1>
 - Santamouris, M. (2014). Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682–703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
 - Santamouris, Mattheos, Haddad, S., Saliari, M., Vasilakopoulou, K., Synnefa, A., Paolini, R., Ulpiani, G., Garshabi, S., & Fiorito, F. (2018). On the energy impact of urban heat island in Sydney: Climate and energy potential of mitigation technologies. *Energy and Buildings*, 166, 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.007>
 - Synnefa, A., Karlessi, T., Gaitani, N., Santamouris, M., Assimakopoulos, D. N., & Papakatsikas, C. (2011). Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate. *Building and Environment*, 46(1), 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.06.014>
 - Tsitoura, M., Michailidou, M., & Tsoutsos, T. (2016). Achieving sustainability through the management of microclimate parameters in Mediterranean urban environments during summer. *Sustainable Cities and Society*, 26, 48–64. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.05.006>
 - Xu, X., Azarijafari, H., Gregory, J., Norford, L., & Kirchain, R. (2020). An integrated model for quantifying the impacts of pavement albedo and urban morphology on building energy demand. *Energy and Buildings*, 211, 109759. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109759>
- Les revêtements drainants**
- AMÉNAGEMENT URBAIN L'eau: Un outil précieux pour rafraîchir la ville. L'eau au service du rafraîchissement urbain : aperçu des solutions. (2020, Septembre). Hydroplus, 8.
 - Asaeda, T., & Ca, V. T. (2000). Characteristics of permeable pavement during hot summer weather and impact on the thermal environment. *Building and Environment*, 35(4), 363–375. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00020-7)

Tech. Sci. Méthodes 6 (6), 23–35, in French.

- Musy, M., Maillard, P., Azam, M.-H., Bailly, J.-B., Barel, E., Bozonnet, E., Calmet, I., Gros, A., Inard, C., Morille, B., Mouquet, D., Smadi, I., Tavares, R., & Zaba, S. (2016). EVA (Eau, Végétation, Albedo) évaluation quantitative de l'impact sur le microclimat, les consommations énergétiques des bâtiments et le confort intérieur et extérieur de trois principes de rafraîchissement urbain. Application au quartier de la Part-Dieu à Lyon. 329.
- Parison, S. (2020). Rôle des revêtements urbains et nouveaux usages de l'eau pour l'adaptation au changement climatique des villes : Le rafraîchissement urbain évaporatif et son impact sur le climat urbain. Thèse de doctorat.
- Takahashi, R., Asakura, A., Koike, K., Himeno, S., Fujita, S., 2010. Using Snow Melting Pipes to Verify the Water Sprinkling's Effect over a Wide Area. In: NOVATECH 2010, p. 10.
- Yamagata, H., Nasu, M., Yoshizawa, M., Miyamoto, A., Minamiyama, M., 2008. Heat island mitigation using water retentive pavement sprinkled with reclaimed wastewater. Water Sci. Technol. a J. Int. Assoc. Water. Pollut. Res. 57 (5), 763–771

SOLUTIONS DOUTES

Réduction du trafic routier, moteurs thermiques

- Afshari, A., Schuch, F., & Marpu, P. (2018). Estimation of the traffic related anthropogenic heat release using BTEX measurements – A case study in Abu Dhabi. Urban Climate, 24, 311–325. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.02.001>
- Kolbe, K. (2019). Mitigating urban heat island effect and carbon dioxide emissions through different mobility concepts: Comparison of conventional vehicles with electric vehicles, hydrogen vehicles and public transportation. Transport Policy, 80, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.05.007>
- Li, C., Cao, Y., Zhang, M., Wang, J., Liu, J., Shi, H., & Geng, Y. (2015). Hidden Benefits of Electric Vehicles for Addressing Climate Change. Scientific Reports, 5(1), 9213. <https://doi.org/10.1038/srep09213>

Limitation de la climatisation

- Adelia, A. S., Yuan, C., Liu, L., & Shan, R. Q. (2019). Effects of urban morphology on anthropogenic heat dispersion in tropical high-density residential areas. Energy and Buildings, 186, 368–383. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.026>
- Li, C., Zhou, J., Cao, Y., Zhong, J., Liu, Y., Kang, C., & Tan, Y. (2014a). Interaction between urban microclimate and electric air-conditioning energy consumption during high temperature season. Applied Energy, 117, 149–156. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.057>
- Li, C., Zhou, J., Cao, Y., Zhong, J., Liu, Y., Kang, C., & Tan, Y. (2014b). Interaction between urban microclimate and electric air-conditioning energy consumption during high temperature season. Applied Energy, 117, 149–156. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.057>
- Munck, C. de, Pigeon, G., Masson, V., Meunier, F., Bousquet, P., Tréméac, B., Merchat, M., Poef, P., & Marchadier, C. (2013). How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? International Journal of Climatology, 33(1), 210–227. <https://doi.org/10.1002/joc.3415>
- Salamanca, F., Georgescu, M., Mahalov, A., Moustau, M., & Wang, M. (2014). Anthropogenic heating of the urban environment due to air conditioning: Anthropogenic Heating due to AC. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119(10), 5949–5965. <https://doi.org/10.1002/2013JD021225>
- Schibuola, L., & Tambani, C. (2020). Performance assessment of seawater cooled chillers to mitigate urban heat island. Applied Thermal Engineering, 175, 115390. <https://doi.org/10.1016/j.ap-thermaleng.2020.115390>

- Tremaec, B., Bousquet, P., de Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Marchadier, C., Merchat, M., Poef, P., & Meunier, F. (2012). Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures. Applied Energy, 95, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.015>
- Wang, Y., Li, Y., Sabatino, S. D., Martilli, A., & Chan, P. W. (2018). Effects of anthropogenic heat due to air-conditioning systems on an extreme high temperature event in Hong Kong. Environmental Research Letters, 13(3), 034015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa848>
- Yu, Z., Guo, X., Jørgensen, G., & Vejre, H. (2017). How can urban green spaces be planned for climate adaptation in subtropical cities? Ecological Indicators, 82, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.002>
- Yuan, C., Adelia, A. S., Mei, S., He, W., Li, X.-X., & Norford, L. (2020). Mitigating intensity of urban heat island by better understanding on urban morphology and anthropogenic heat dispersion. Building and Environment, 176, 106876. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106876>

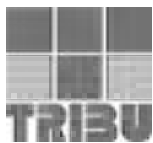
Adaptations individuelles et sociétales aux fortes chaleurs

- Ban, Jie, Wanying Shi, Liangliang Cui, Xia Liu, Chao Jiang, Lianyu Han, Rui Wang, et Tian Tian Li. « Health-Risk Perception and Its Mediating Effect on Protective Behavioral Adaptation to Heat Waves ». Environmental Research 172 (1 mai 2019): 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.01.006>.
- Donato, F. de', M. Scortichini, M. De Sario, A. de Martino, et P. Michelozzi. « Temporal Variation in the Effect of Heat and the Role of the Italian Heat Prevention Plan ». Public Health, Special issue on Health and high temperatures, 161 (1 août 2018): 154-62. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2018.03.030>.
- El-Fadel, Mutasem, et Sophia Ghanimeh. « Climate change and temperature rise in the Greater Beirut Area: Implications on heat-related premature mortality ». Regional Environmental Change 13 (1 octobre 2013). <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0415-9>.
- Fouillet, Anne, Grégoire Rey, Véroène Wagner, Karine Laaidi, Pascal Empereur-Bissonnet, Alain Le Tertre, Philippe Frayssinet, et al. « Has the impact of heat waves on mortality changed in France since the European heat wave of Summer 2003? A study of the 2006 heat wave ». International journal of epidemiology 37 (1 mai 2008): 309-17. <https://doi.org/10.1093/ije/dym253>.
- Green, Helen K., Nick Andrews, Ben Armstrong, Graham Bickler, et Richard Pebody. « Mortality during the 2013 Heatwave in England—How Did It Compare to Previous Heatwaves? A Retrospective Observational Study ». Environmental Research 147 (mai 2016): 343-49. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.02.028>.
- Hendel, Martin, Karina Azos-Diaz, et Brice Tremaec. « Behavioral Adaptation to Heat-Related Health Risks in Cities », novembre 2016. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01375603>.
- Hondula, David M., Robert C. Balling, Jennifer K. Vano, et Matei Georgescu. « Rising Temperatures, Human Health, and the Role of Adaptation ». Current Climate Change Reports 1, no 3 (1 septembre 2015): 144-54. <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0016-4>.
- Jenkins, Katie, Jim Hall, Vassilis Glenis, Chris Kilsby, Mark McCarthy, C. Goodess, Duncan Smith, Nick Malleson, et Mark Birkin. « Probabilistic spatial risk assessment of heat impacts and adaptations for London ». Climatic Change 124 (1 mai 2014): 105-17. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1105-4>.
- Knappenberger, Paul, Patrick Michaels, et Anthony Watts. « Adaptation to extreme heat in Stockholm County, Sweden ». Nature Climate Change 4 (30 avril 2014). <https://doi.org/10.1038/nclimate2201>.
- Martinez, Gerardo S., Cristina Linares,

Ana Ayuso, Vladimir Kendrovski, Melanie Boeckmann, et Julio Diaz. « Heat-Health Action Plans in Europe: Challenges Ahead and How to Tackle Them ». Environmental Research 176 (1 septembre 2019): 108548. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108548>.

• Pascal, M., V. Wagner, M Corso, K. Laaidi, et A Le Tertre. « Évolutions de l'exposition aux canicules et de la mortalité associée en France métropolitaine entre 1970 et 2013 ». Santé Publique France, 2019. www.santepublique-france.fr

• Scortichini, Matteo, Francesca de' Donato, Manuela De Sario, Michela Leone, Christoffer Åström, Ferran Ballester, Xavier Basagaña, et al. « The inter-annual variability of heat-related mortality in nine European cities (1990–2010) ». Environmental Health 17, no 1 (8 août 2018): 66. <https://doi.org/10.1186/s12940-018-0411-0>.



TRIBU

(Techniques, Recherches, Innovations pour le Bâtiment et l'Urbain) est un bureau d'études spécialisé dans la conception éco-responsable appliqué aux bâtiments et à l'urbanisme. Depuis sa création en 1986, TRIBU a accompagné plus de 500 constructions de bâtiments, 100 projets urbains et des études de recherche et de développement autour de la transition écologique. TRIBU est une SCOP qui regroupe 27 experts dans 3 agences à Paris, Lyon et Nantes. TRIBU est un bureau d'études indépendant qui est animé par une éthique profonde : concevoir un cadre de vie sain et confortable pour toutes et tous et pour les générations futures, en préservant les ressources et la biodiversité.



CEREMA

(Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement) est un établissement public tourné vers l'appui aux politiques publiques en matière d'aménagement, de cohésion territoriale et de transition écologique et énergétique. Le Cerema intervient à différentes échelles spatiales, auprès des collectivités territoriales comme au niveau national ou international. L'envergure de ses prestations est large, portant sur les sujets relatifs à l'environnement, les risques, la mobilité ou l'aménagement et vont de l'expertise sur un sujet spécifique et ponctuel au pilotage de projets complexes. Véritable centre de ressources, le Cerema met à disposition de tous les connaissances et la promotion des résultats de ses activités.

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME – l'Agence de la transition écologique – nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, air, économie circulaire, alimentation, déchets, sols, etc., nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

Les collections de l'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur :

Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert :

Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent :

Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en oeuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir :

Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



ILS L'ONT FAIT

Rafrâchir les villes des solutions variées

Le rafraîchissement urbain est un sujet récent et les connaissances produites par la recherche et les premières expérimentations donnent des résultats divers, parfois difficiles à décrypter pour les acteurs opérationnels.

Ce guide propose une approche synthétique, multicritères et opérationnelle des solutions émergentes ou éprouvées, adaptées à différents contextes climatiques et urbains. Il s'agit d'éclairer la décision des acteurs publics et privés, tant sur leurs choix d'aménagement, de construction, de rénovation des bâtiments que d'aménagement des espaces extérieurs.

Ce recueil rassemble les résultats les plus récents de la recherche sur le domaine synthétisé en schémas comparatifs et 19 fiches de solutions de rafraîchissement urbain. Il constitue un véritable support d'aide à la conception et à la décision à destination des acteurs opérationnels de l'urbain.

