

## Ec'Eau-responsabilité, résilience et sobriété des aménagementements urbains en béton



# ADAPTER LES VILLES

*Réduction de la surchauffe urbaine  
et désimperméabilisation*

**Elodie MOULIN (Cerema)**



# Définition de la surchauffe urbaine

- L'îlot de chaleur urbain



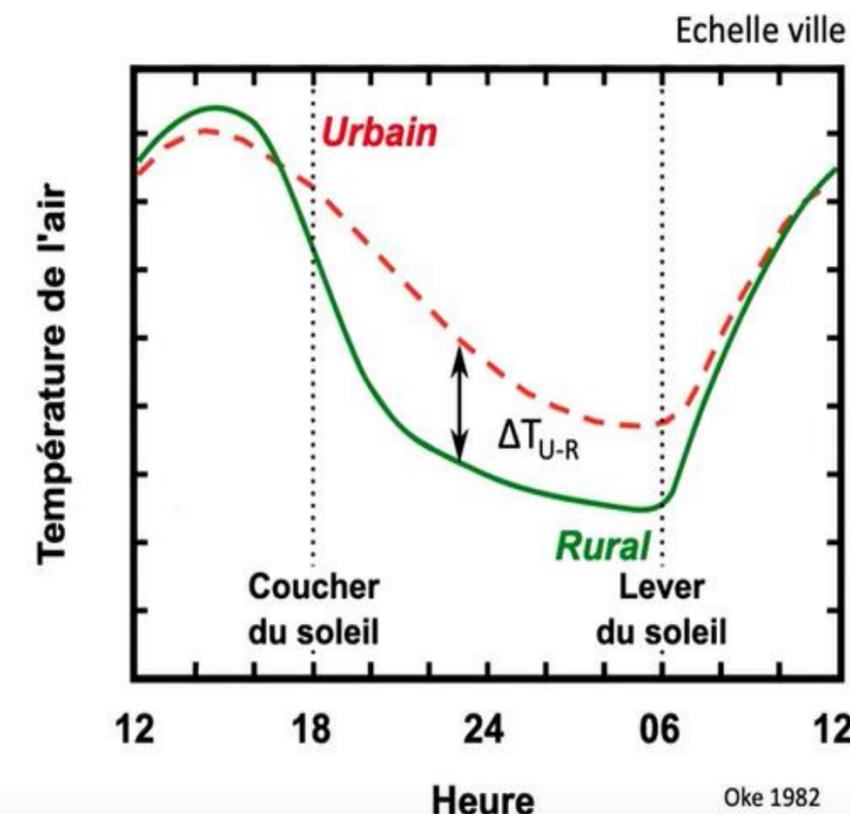
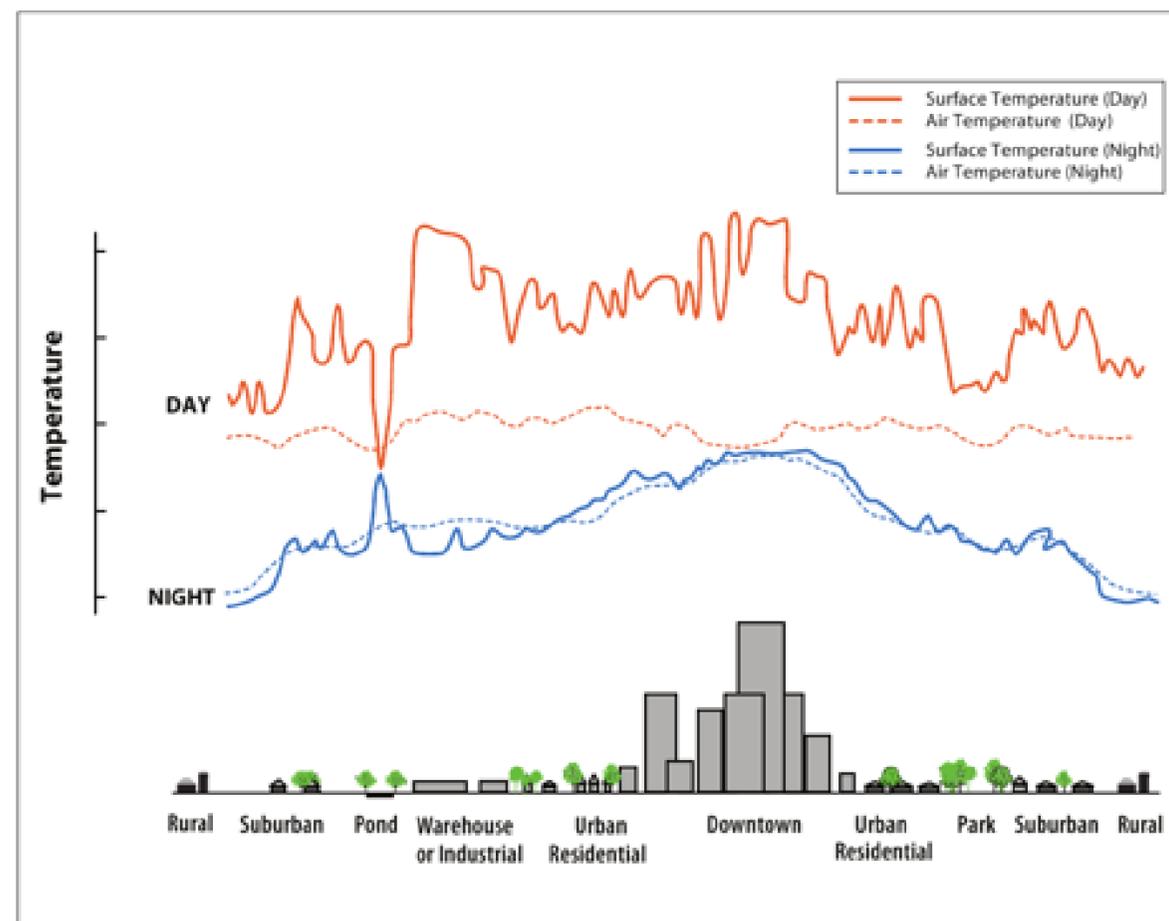
## Le jour

- Des températures d'air quasi-constantes
- Des températures de surface supérieures à T<sub>air</sub> et dépendantes des propriétés thermiques



## La nuit

- Des températures d'air et de surface similaires
- Il existe une différence de température (Urbain – Rural)



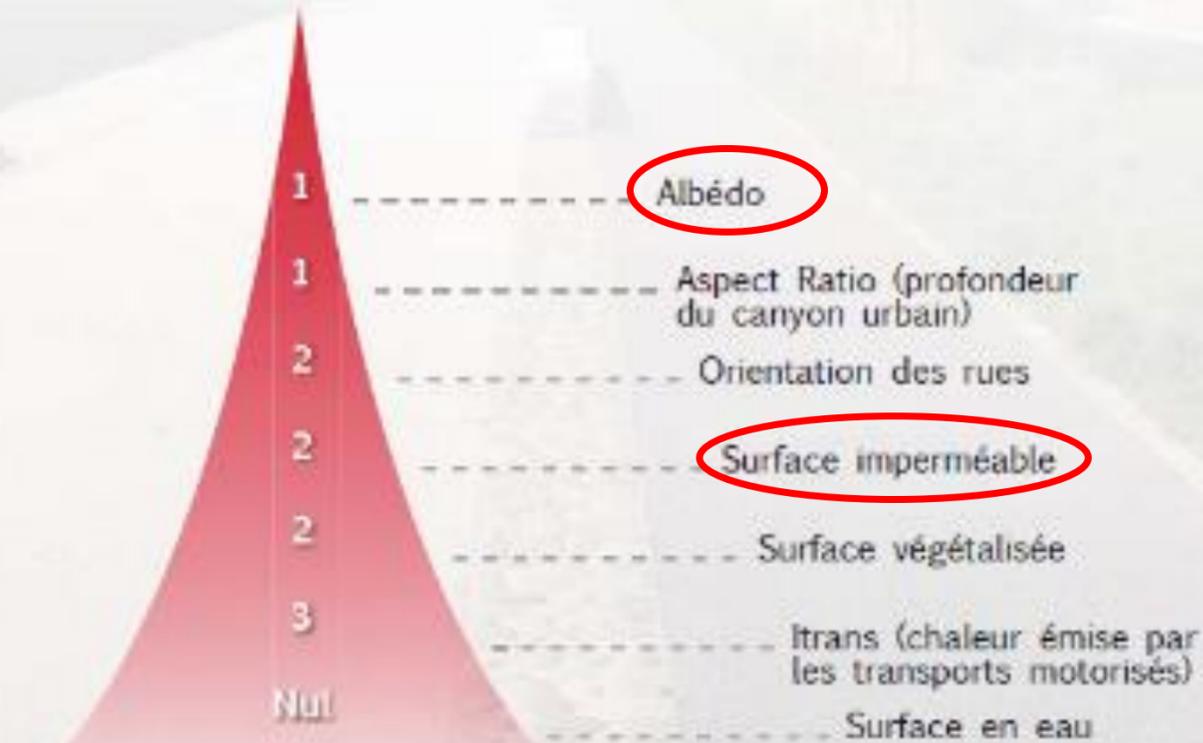
[US-EPA, 2011] U.S. EPA. Report on the 2011 U.S. Environmental Protection Agency (EPA) Decontamination Research and Development Conference. Washington, DC, EPA/600/R/12/557, 2012.



# Définition de la surchauffe urbaine

## • L'îlot de chaleur urbain

### Hierarchisation des éléments influant sur l'augmentation des îlots de chaleur



© Grand Lyon

L'îlot de chaleur urbain est dû à quatre mécanismes liés aux caractéristiques des villes :

#### Le manque d'évapotranspiration

Le manque de végétation et de sols naturels prive la ville de ce moyen de rafraîchissement

#### Les rejets de chaleur anthropique

par la circulation automobile, l'industrie, les rejets de climatisation...

#### Le piégeage radiatif

les façades et les sols minéralisés captent et stockent la chaleur en journée et la dégagent pendant la nuit

#### L'obstruction du vent

les immeubles denses réduisent l'évacuation de la chaleur par l'air

©Agence Parisienne du Climat

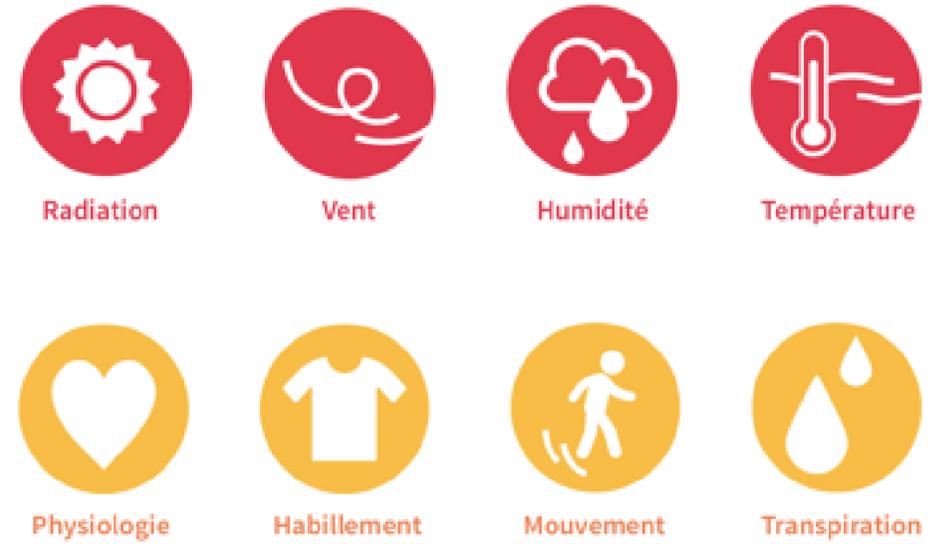


# Définition de la surchauffe urbaine

- L'INCONFORT THERMIQUE



Crédits : Ademe/ Tadaa



Crédits : Ademe/ Tadaa

Un ressenti pas exclusivement dépendant de la température d'air, mais de l'ensemble des variables microclimatiques (**externes**) et thermiques inter-individuelles (**internes**).

Un équilibre entre sollicitations climatiques et mécanismes thermophysologiques

- Au delà : mécanismes de thermorégulation
- Et au-delà... risque sur la santé !



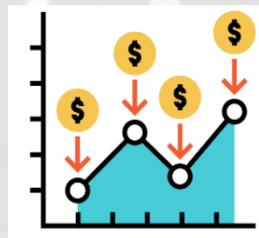
# Quelques chiffres sur les impacts



## Impacts sanitaires

Entre 2014 et 2019 pendant les canicules (ARS) :

- 5 700 décès en France hexagonale
- 5 200 passage aux urgences pour coups de chaleur (dont 1 500 enfants)
- 5 900 passage aux urgences pour déshydratation (dont 3 500 personnes âgées)



## Impacts économiques

Sur la période 2015 – 2020, les impacts sanitaires représentent au total entre 22 et 37 Mds€ (Adélaïde et al, 2021)

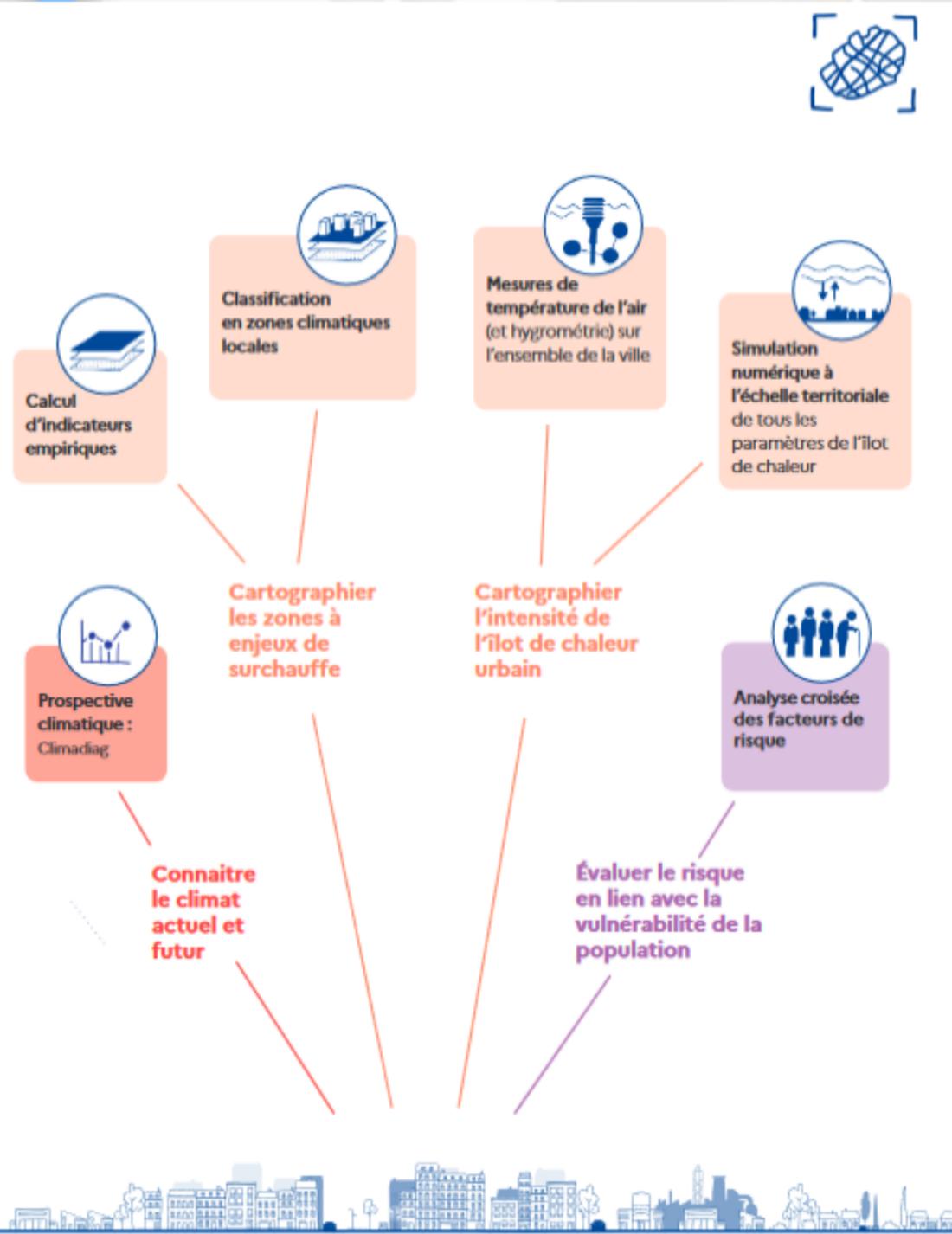


## Impacts environnementaux

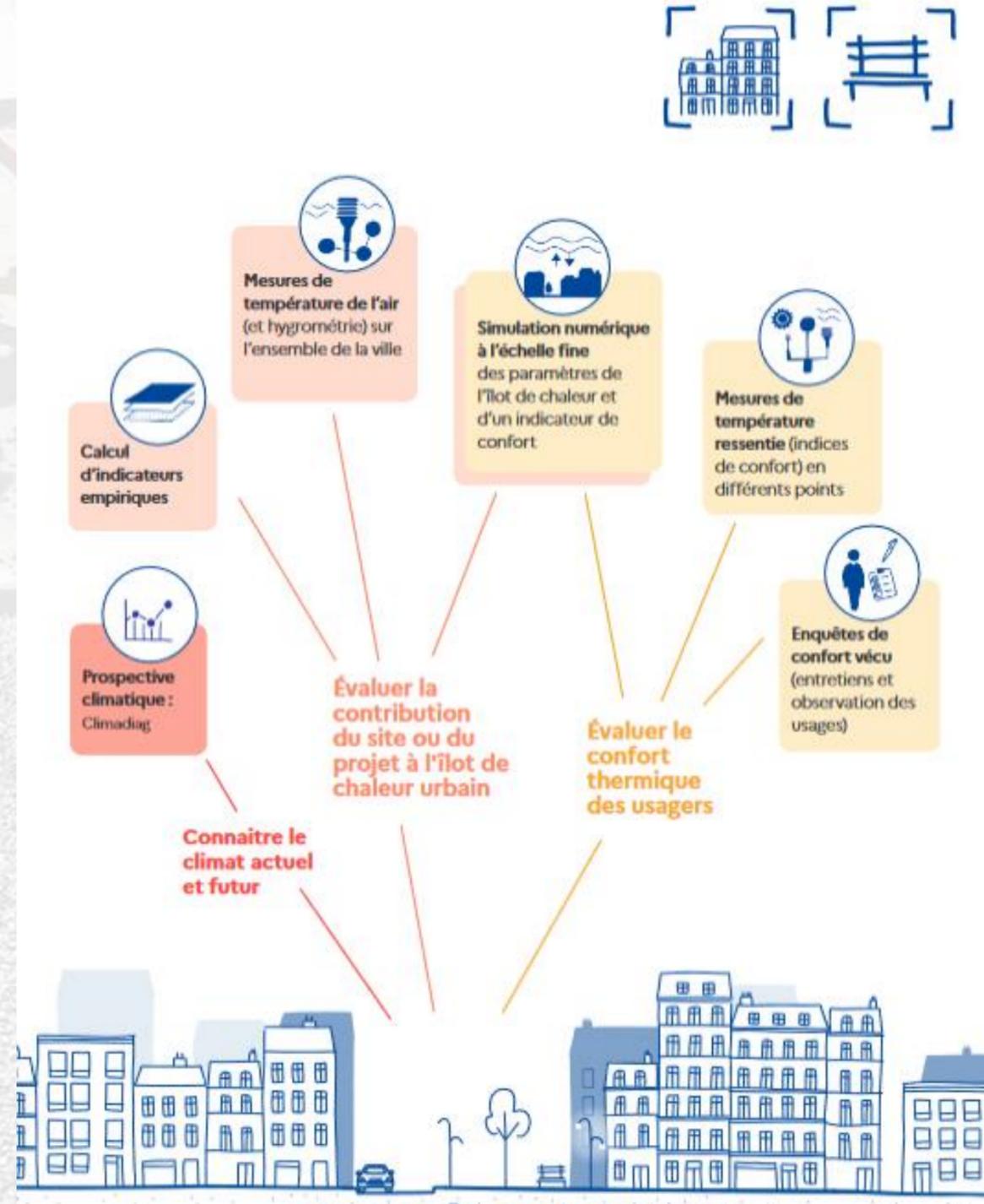
- Détérioration de la qualité de l'air extérieur 20 % du SMOG attribuable à l'ICU (Akbari, 2005)
- Augmentation de la demande énergétique : une hausse de 2°C de la température d'air augmente la demande énergétique de 5 % (Anquez et al, 2011)
- Hausse de la demande en eau potable à des fins de rafraîchissement (consommation personnelle, irrigation, piscines, etc). La ville de Québec a chiffré à 40 % cette hausse en période de pointe.



# A chaque échelle ses méthodes



Définir une stratégie territoriale de réduction de la surchauffe urbaine



Prendre en compte la surchauffe dans un projet d'aménagement



<https://librairie.ademe.fr/7401-diagnostic-de-la-surchauffe-urbaine.html>

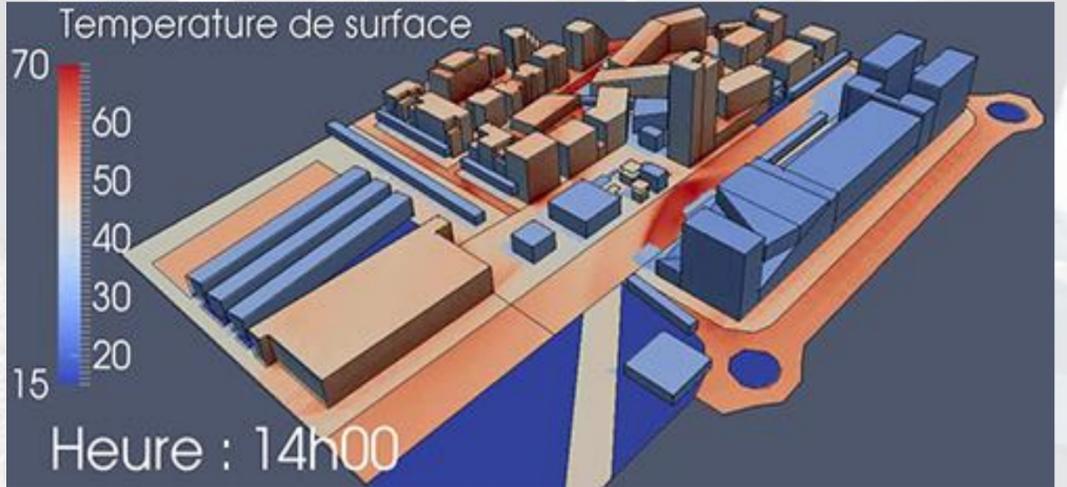


# Quelques outils

Mesure de confort thermique (suivi de l'effet des aménagements de cours d'école et de collèges )



**Véhicule de mesure mobile**  
(campagne de mesure autour de la place Delille, Clermont-Ferrand)



**Simulation des températures de surface avec le modèle Solene-microclimat** dans un quartier de Toulouse.

> Optimiser le rafraîchissement végétal avec la modélisation : découvrir la méthode.

### Capteurs thermiques



PFPN-LOM16-001  
LOM16

Température de fonctionnement	-40°C ... +70°C
Exactitude	± 0,3°C [-30°C...+60°C], ± 1°C au-delà

### Abri pour capteur



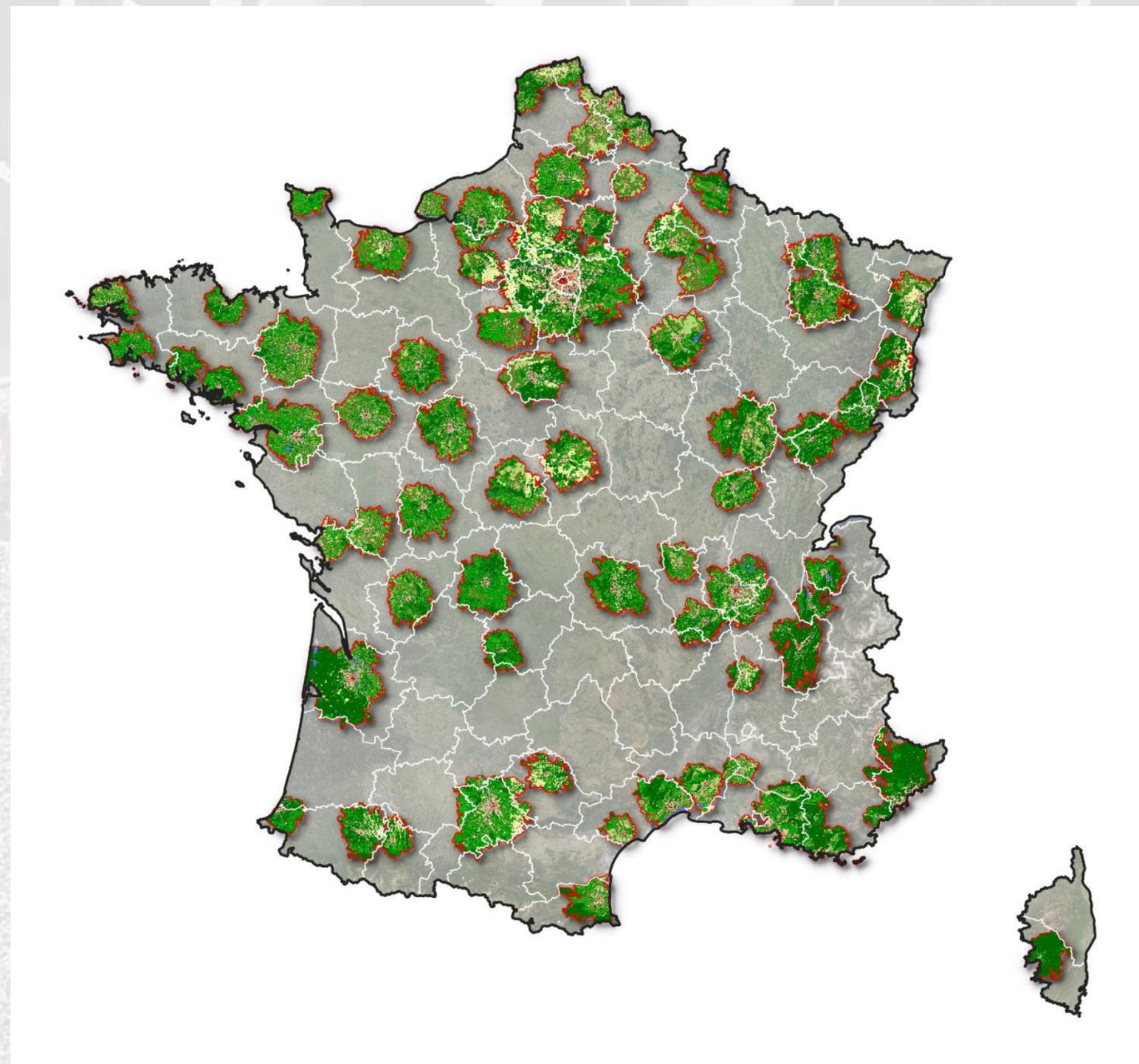
Dimensions de l'article L x l x H : 10,2 x 9,5 x 17,5 centimètres

Activités de recherche de l'équipe BPE  
<https://www.cerema.fr/fr/actualites/equipe-recherche-bpe-developpe-valide-util-simulation>



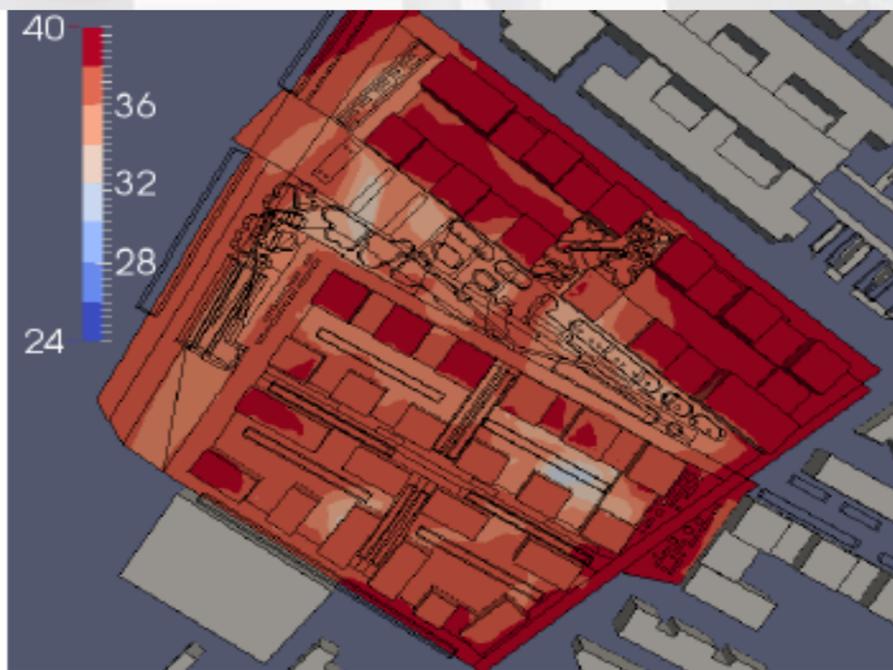
# Une production nationale des données LCZ

- **83 aires urbaines de plus de 50 000 habitants**
  - = 11 500 communes (/ 34 826)
  - = 151 000 km<sup>2</sup> (/ 550 000 km<sup>2</sup>)
  - = 42 M habitants (/ 65 M habitants)dont 114 communes de plus de 50 000 habitants
- Basée sur la **couverture nationale SPOT-6/7 2022**
- Téléchargeable sur [data.gouv.fr](https://data.gouv.fr), par aire urbaine
- Visualisable sur [cartagene.cerema.fr](https://cartagene.cerema.fr), avec des statistiques de répartition surfacique par commune





# Evaluation des actions à mettre en place



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

Solutions vertes (et bleues)	Solutions grises	Solutions douces
Services écosystémiques, nature en ville (végétal, eau)	Infrastructures urbaines : revêtements, mobilier urbain, bâtiment, bâti	Gestion et usages de la ville : services, mobilités, modes de vie...

Rafraîchir les villes, recueil des solutions (ADEME, 2021). Guide produit par le Cerema et financé par l'ADEME.

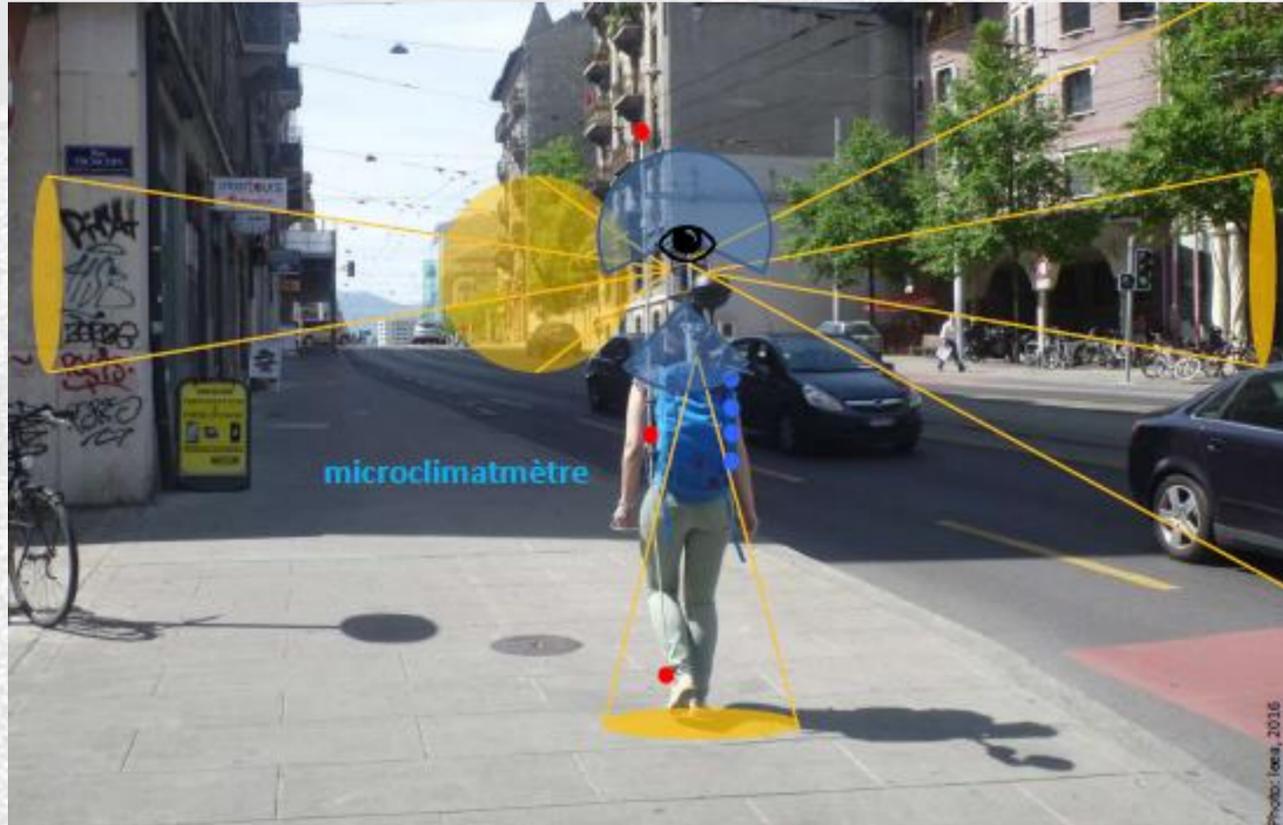
**IMPACTS DU VÉGÉTAL EN VILLE**

FICHES DE SYNTHÈSE

Programme de recherche VegDUD - Rôle du végétal dans le développement urbain durable  
AUTEURS : Guillaume Pommier, Damien Provendier, Caroline Gutleben, Marjorie Musy

**Plante&Cité**  
Ingénierie de la nature en ville

Avril 2014



Cityfeel - HEPIA



Simulation températures de surfaces avec IceTool - Ecole Floirac - Cerema





# Comment passer à l'action



Grille et capteurs utilisés en **balade climatique** (Toulon).



+ campagne de mesures  
+ concertation

90% de nuits tropicales (îlot Courdouan Toulon) dont 1/6 induite par le contexte urbain



## 1) Garantir la continuité de la dynamique engagée pour la prise en compte de la surchauffe urbaine

Mobilisation transversale des acteurs, rôle des paysagistes pour le pilotage des équipes de maîtrise d'œuvre, concertation et aménagements transitoires.

## 2) Faire de la place à la nature partout où c'est possible

Étude de sols, GEPU, favoriser l'existant, désimpermeabiliser, planter, y compris en zone contrainte.

## 3) Changer de paradigme, pour des espaces publics inclusifs et rendus aux riverains

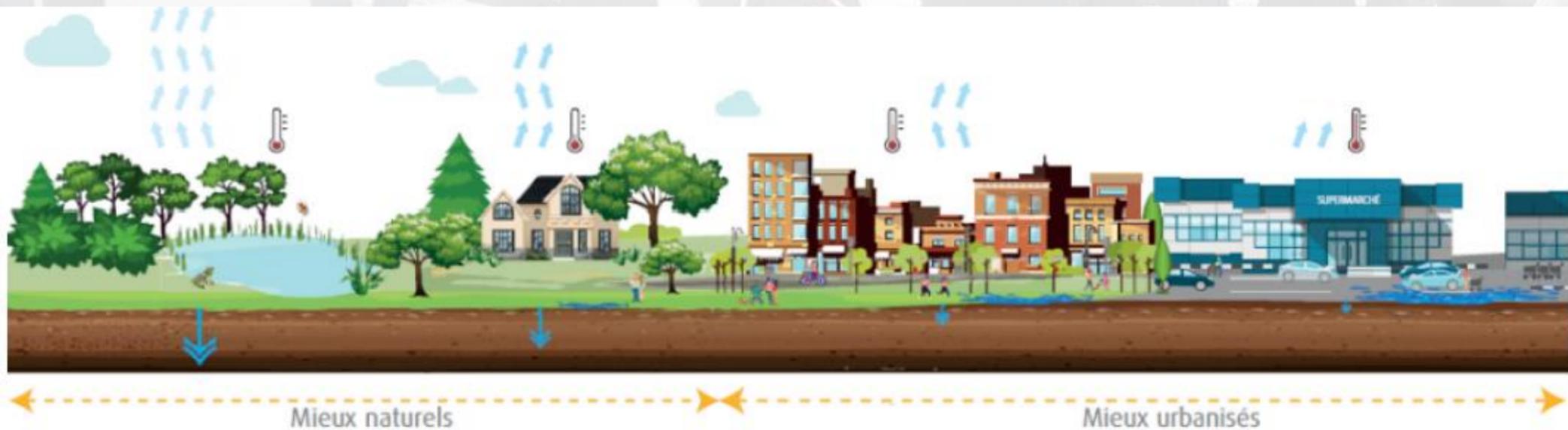
Étude de mobilité pour repenser la place de la voiture, lisibilité des parcours fraîcheurs, refuges.

## 4) Penser les solutions grises

Revêtements adaptés aux usages et aux rayonnements, promouvoir les brasseurs d'air.



# Réintroduire le cycle de l'eau dans l'espace urbain : la désimperméabilisation



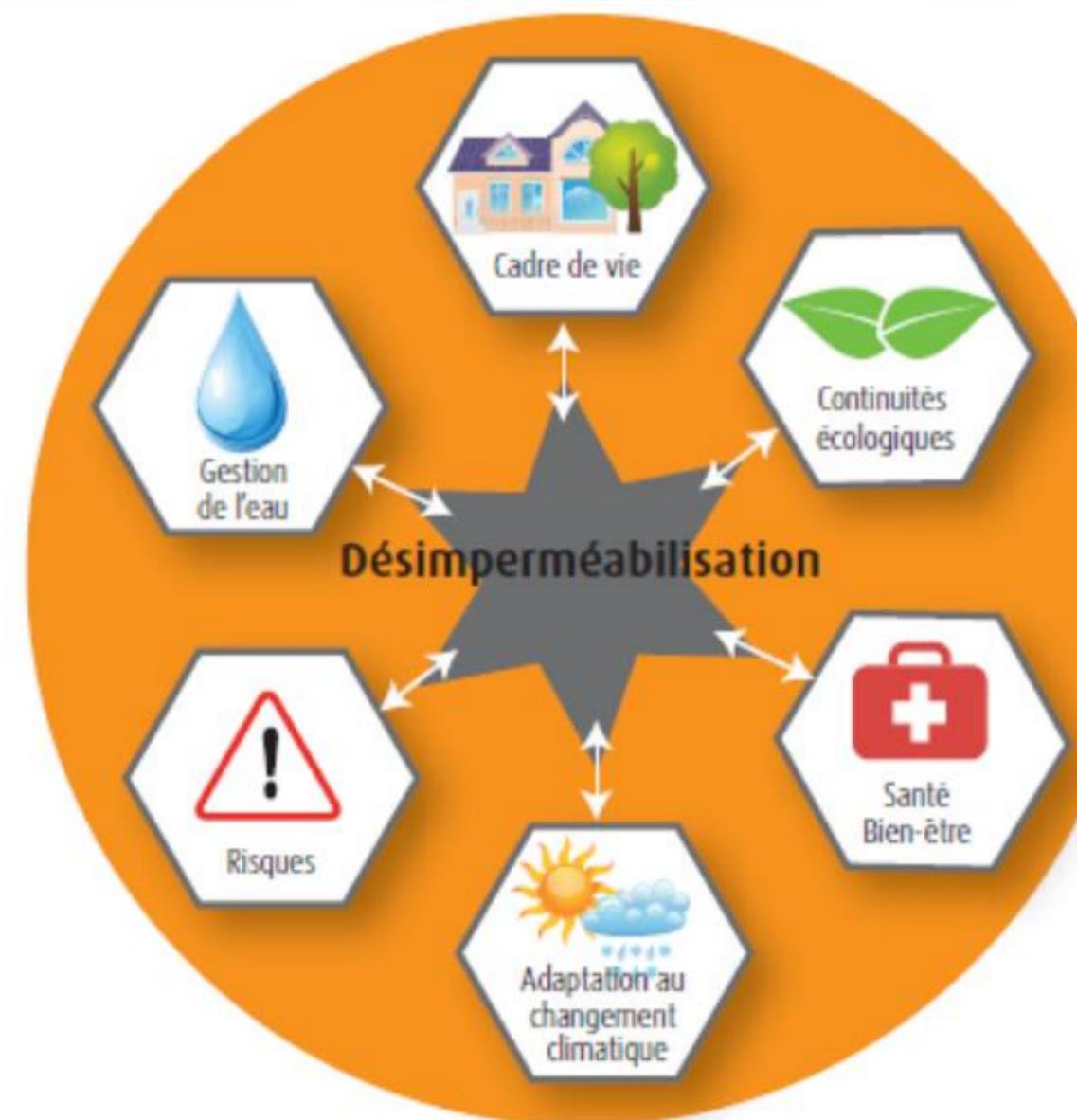
Gestion des eaux pluviales à la source, au plus près du point de chute.

D'abord limiter l'imperméabilisation.

Dans les secteurs déjà urbanisés, désimperméabiliser.

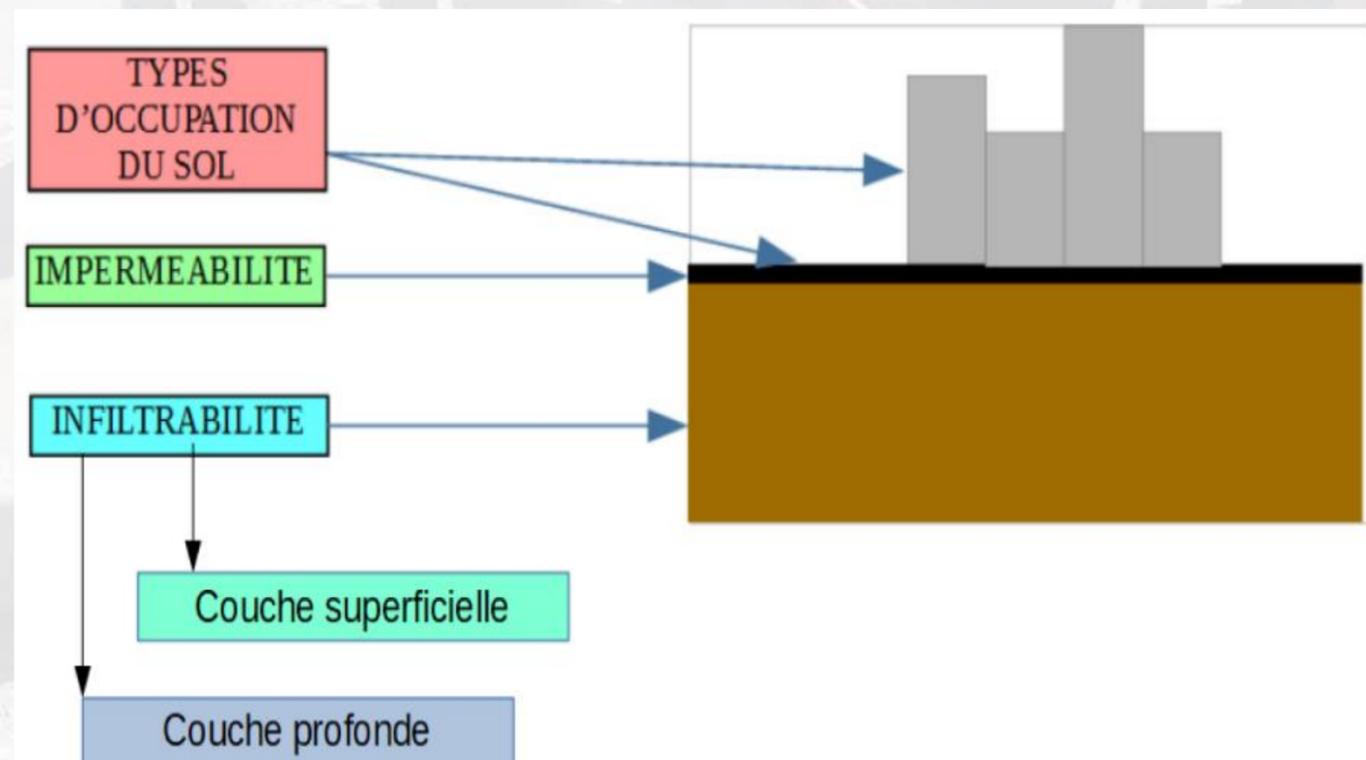
Désimperméabiliser c'est :

- remplacer des surfaces imperméables par des surfaces plus perméables
- faire de la déconnexion des eaux pluviales à la parcelle

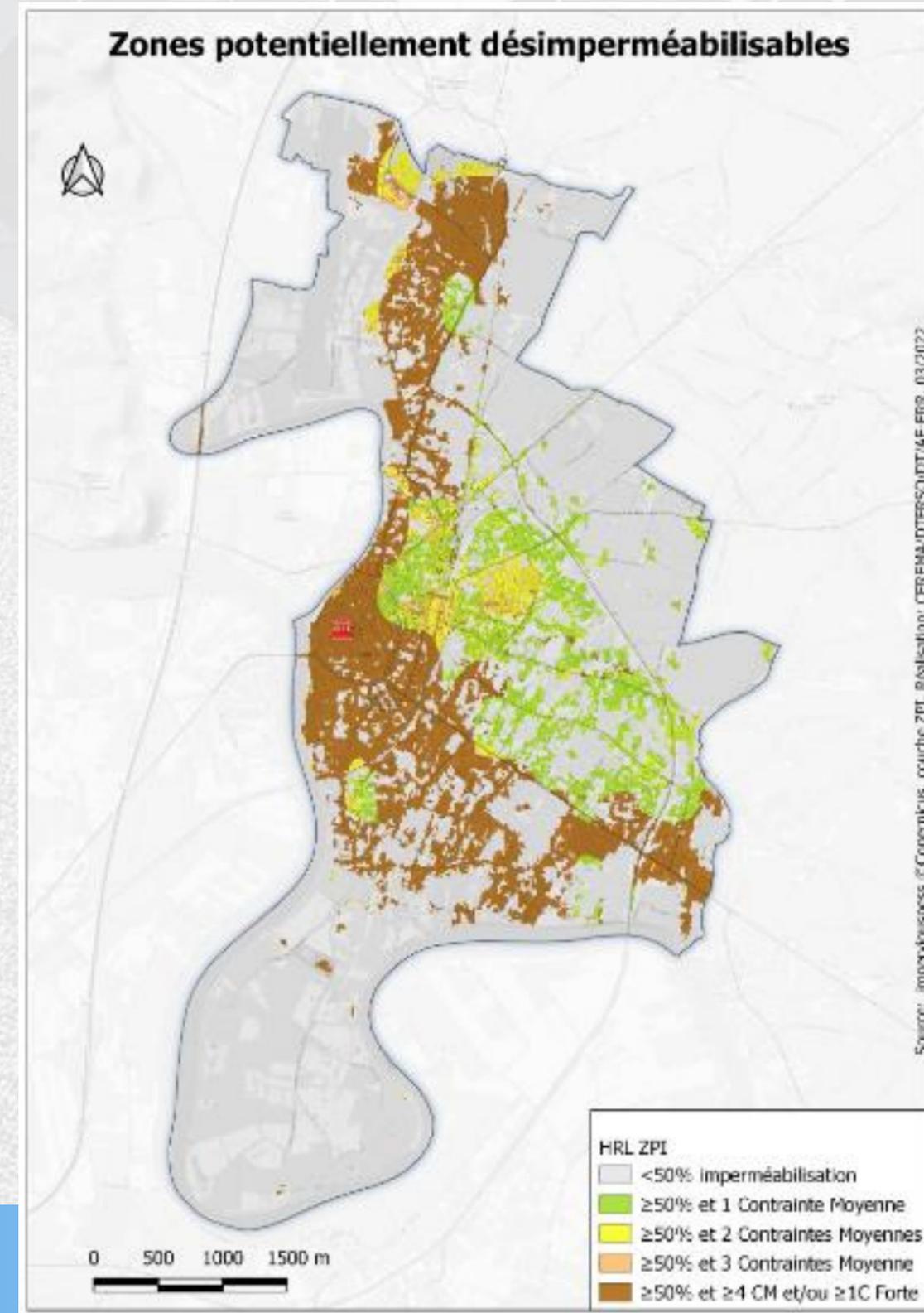




# Réintroduire le cycle de l'eau dans l'espace urbain : la désimperméabilisation



- Texture du sol (perméabilité)  
Couches hydrogéologiques
- Remontée de nappes  
Retrait/gonflement des argiles  
Forte pente (ruissellement)  
Captages d'eau potables (périmètre de protection)  
Sites et sols pollués, carrières





# Réintroduire le cycle de l'eau dans l'espace urbain : la désimperméabilisation

1. Identifier le potentiel de désimperméabilisation à l'échelle du territoire, ville, communauté urbaine....

→ avoir une cartographie et des données chiffrées

2. Identifier les leviers à mobiliser pour agir sur la désimperméabilisation :

→ Documents d'urbanisme

→ Leviers financiers

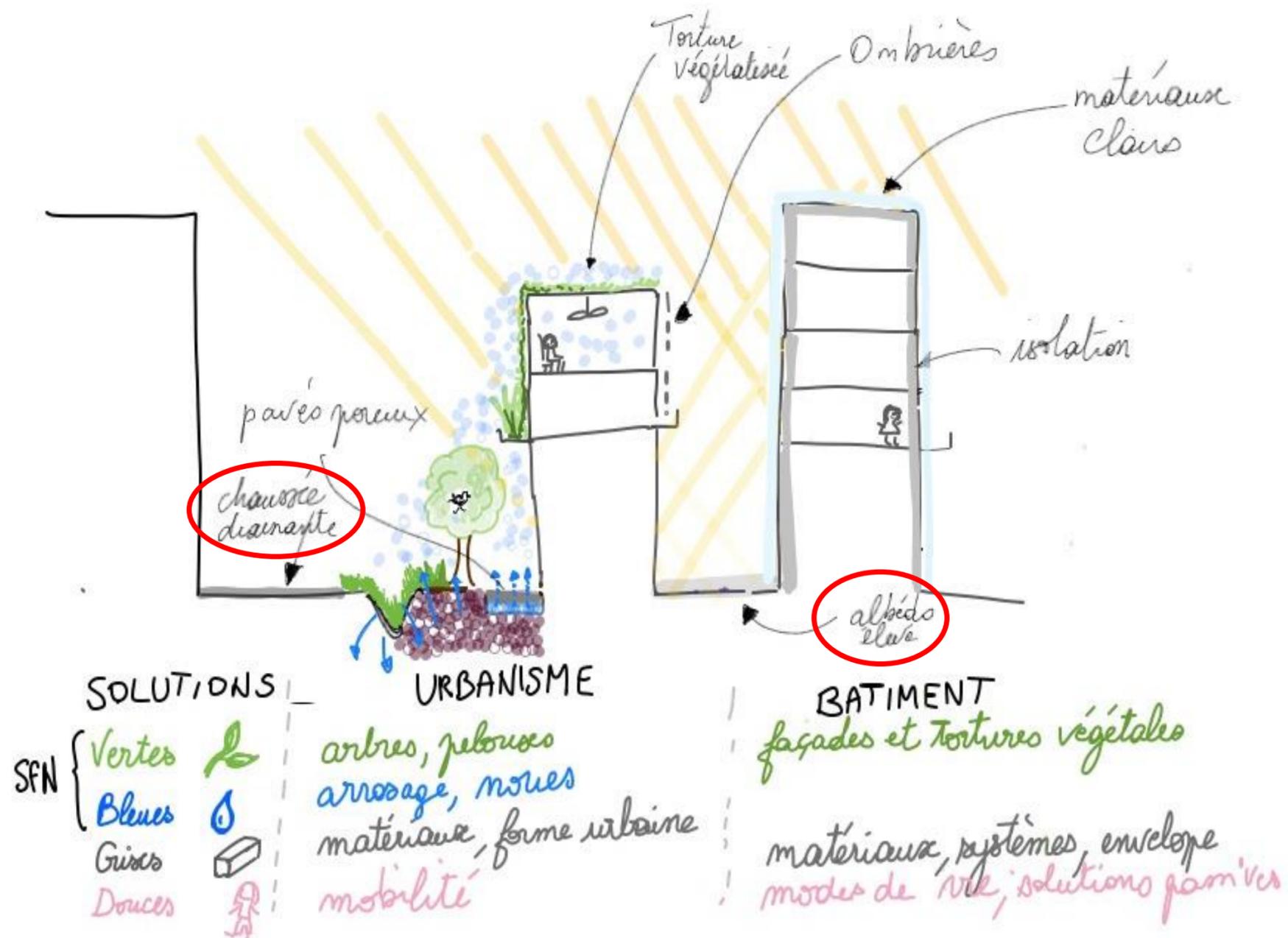
→ Leviers fonciers

→ Leviers techniques

3. Construire un plan d'actions à différentes échelles, de la communauté urbaine jusqu'au quartier, à l'école ou à la place



# Solutions de rafraîchissement urbain : les grandes familles





# La nécessité de raisonner à deux échelles



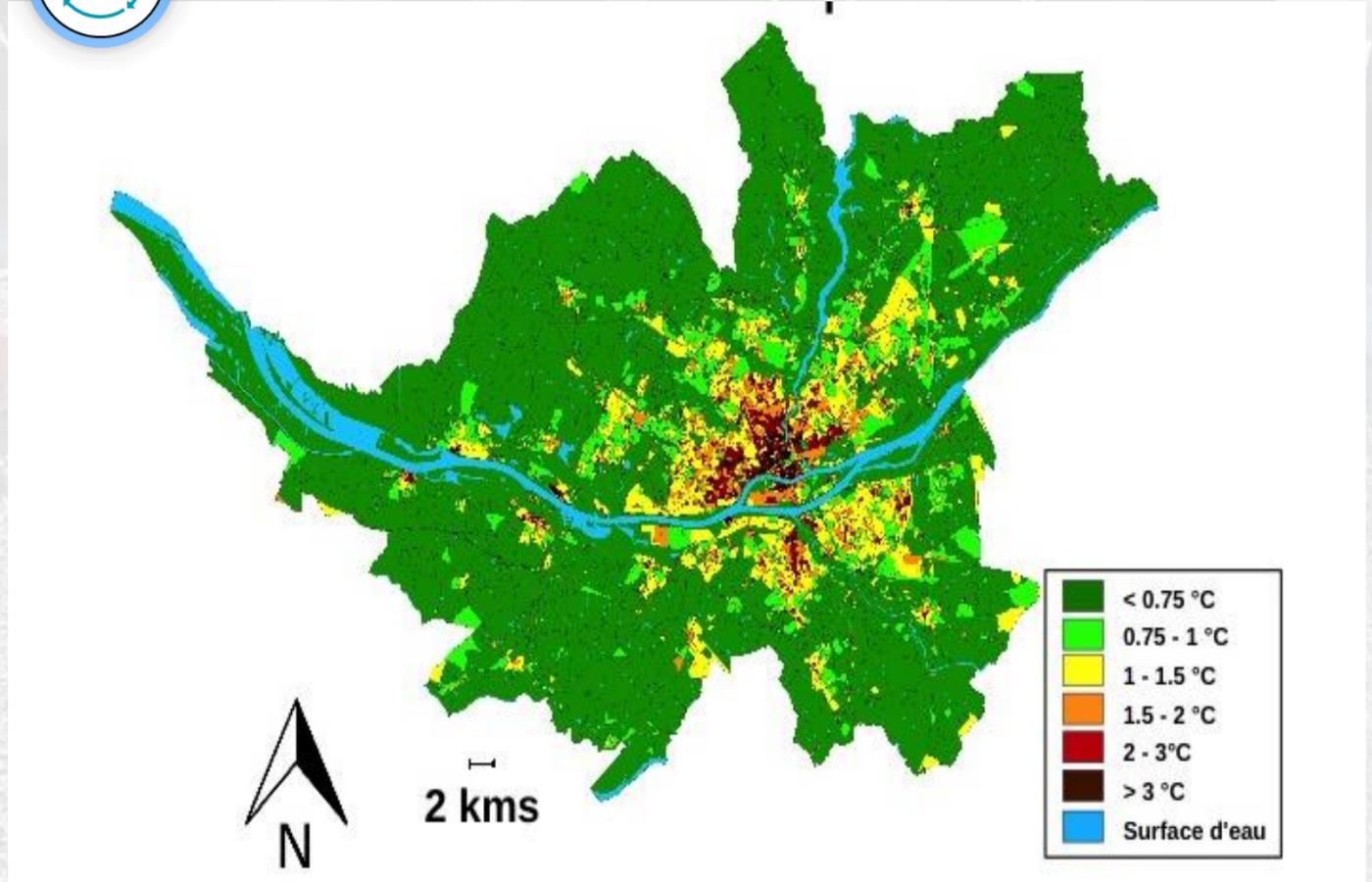
Surchauffe urbaine = Deux échelles à bien différencier :

Celle du confort thermique

et



celle de l'îlot de chaleur Urbain (ICU)



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

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



# La nécessité de raisonner à deux échelles

## La désimperméabilisation

### A l'échelle de la ville:

#### Perméabilité des sols

Pour tout aménagement, réaliser au préalable une étude de sol pédologique et définir l'occurrence de la pluie à traiter

#### Remontée de nappe

Faire un relevé piézométrique ponctuel avant tout projet avec suivi piézométrique de l'évolution saisonnière de la nappe en cas d'aléa fort

#### Retrait-gonflement des argiles

En cas d'aléa fort, réaliser études de sols fines pour caractériser le phénomène physique de retrait gonflement

#### Sites et sols pollués

Étudier l'historique du site et réaliser des analyses chimiques des sols. Si pollution avérée du site, faire une zone tampon

#### Périmètres de captage des eaux potables

Se rapporter aux arrêtés communaux

#### Pentes

Faire une analyse fine de la topographie des voiries et mener une réflexion sur le remodelage des pentes douces





# Solutions d'adaptation



Cerema / Tribu  
Édité par l'ADEME  
ISBN: 979-10-297-1748-2

Solutions en climat tempéré	A l'échelle de la ville		A l'échelle du piéton	
	le jour	la nuit	le jour	la nuit
Parcs	●●●	●●●	●●●	●●●
Arbres	●●●	●●●	●●●	●●●
Pelouses, prairies	●●●	●●●	●●●	●●●
Toiture végétalisée	●●●	●●●	●●●	●●●
Façade végétalisée	●●●	●●●	●●●	●●●
Plans d'eau, rivières	●●●	●●●	●●●	●●●
Ouvrages paysagers de gestion des eaux pluviales	●●●	●●●	●●●	●●●
Forme urbaine bioclimatique	●●●	●●●	●●●	●●●

Effet de rafraîchissement

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



# Solutions d'adaptation

## Les Solutions Fondées sur la Nature (SFN)

### Les parcs urbains

De  $-0,15\text{ °C}$  à  $-5,9\text{ °C}$  à l'échelle du parc

- Effet rafraîchissant corrélé à la taille du parc
- Effet seuil
- Impact de forme du parc
- L'effet s'estompe en sortant du parc



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>



# Solutions d'adaptation

## Les Solutions Fondées sur la Nature (SFN)

### Les arbres

-3°C max à l'échelle de l'arbre

- Effet rafraîchissant surtout apporté par l'ombrage

-2.5°C max à l'échelle de la ville

- Étude EPICEA : végétalisation de 75 % des surfaces



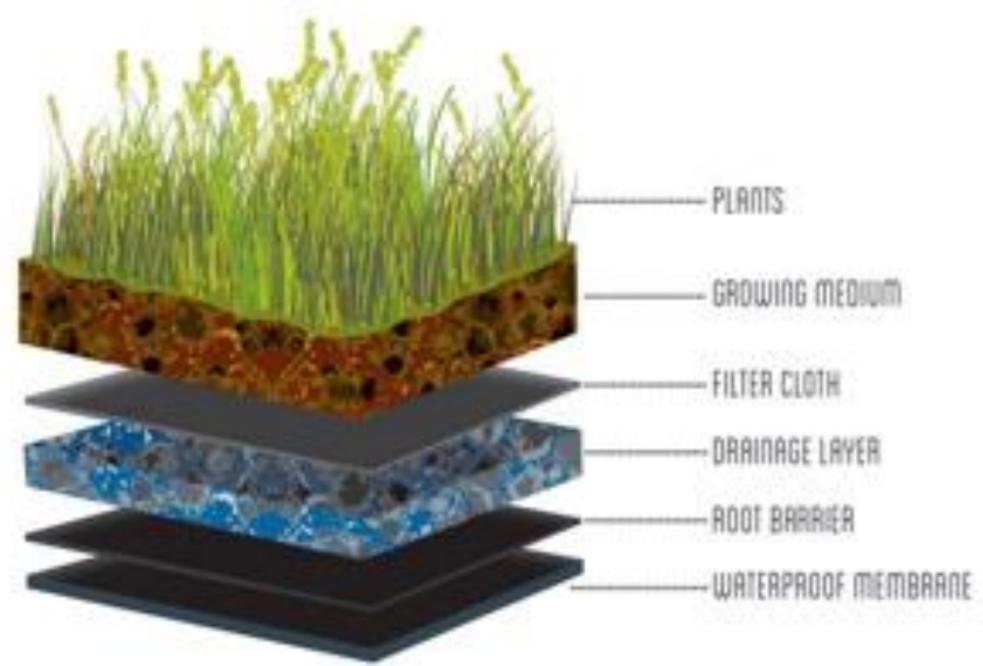
de Munck, C. (2013). Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville [Ph. D. Thesis]. Université de Toulouse.



# Solutions d'adaptation

## Les Solutions Fondées sur la Nature (SFN)

### Les toitures végétalisées



De -1°C à proximité de la toiture à -0,5°C à l'échelle de la ville si toutes les toitures disponibles sont pourvues de TV.

Jim, C. Y. (2015). Assessing climate-adaptation effect of extensive tropical green roofs in cities. *Landscape and Urban Planning*, 138, 54-70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.014>

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.

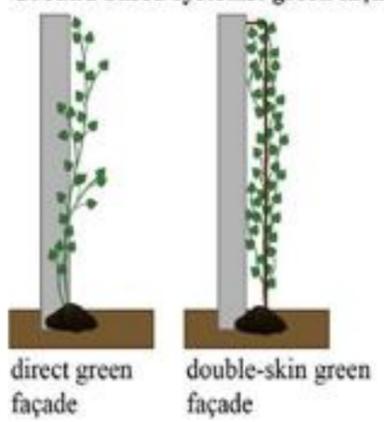


# Solutions d'adaptation

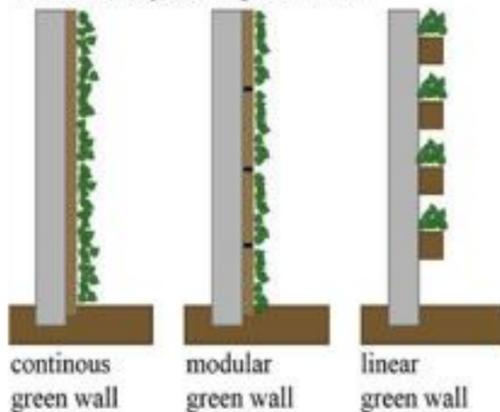
## Les Solutions Fondées sur la Nature (SFN)

### Les façades et murs végétalisés

Ground based systems: green façades



Wall-based systems: green walls



Façades



Réduction de la température de surface (de -1°C à -2,7°C)

Murs vivants



Forte réduction de la température d'air à proximité, effet contraire la nuit

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), 2287–294. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.009>  
Besir et al, 2018, Green roofs and facades : a comprehensive stpdy, *Renewable and sustainable energy reviews*, 82 (2018), pp915-939



# Solutions d'adaptation

## Les Solutions Fondées sur la Nature (SFN)

## Les autres aménagements végétalisés

### - Noue

Effet locaux uniquement, peu de données chiffrées

### - Pelouse

De -1.2°C au niveau de la pelouse à -1°C à l'échelle de la ville

### - Jardin de pluie

Effet très locaux uniquement, pas de données chiffrées



Crédits: Adopta

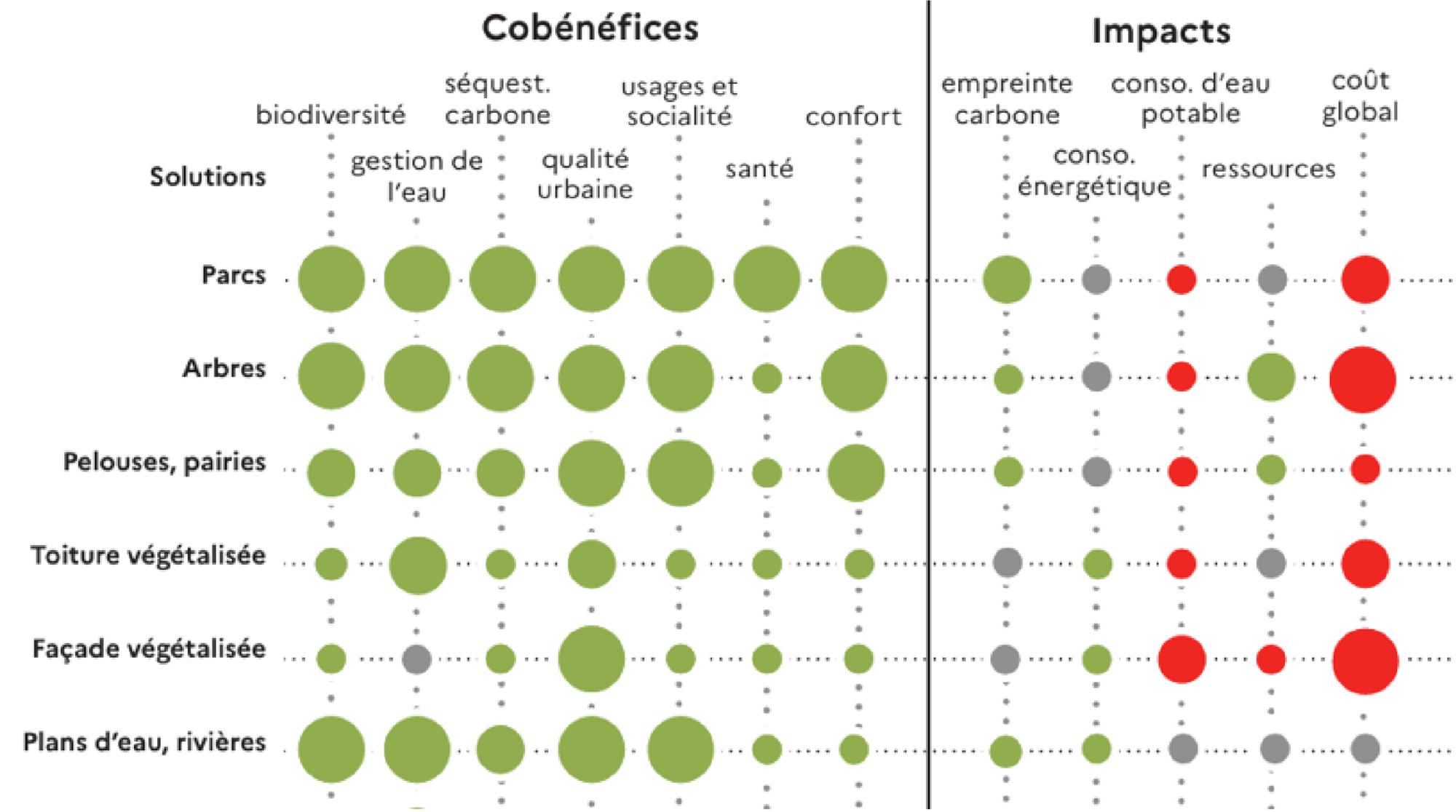


# Solutions d'adaptation

## Les aménagements végétalisés : de nombreux bénéfices associés

### Impacts et Cobénéfices

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

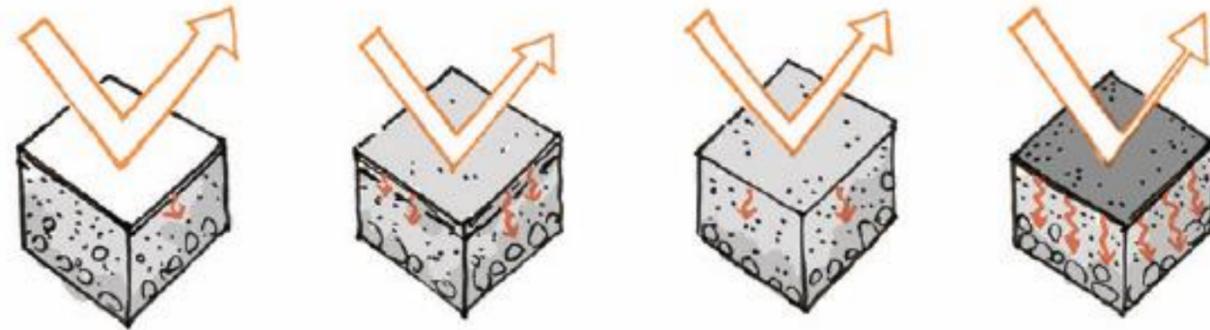


Cerema / Tribu, édité par l'ADEME, ISBN : 979-10-297-1748-2



# Solutions d'adaptation : un albedo en béton !

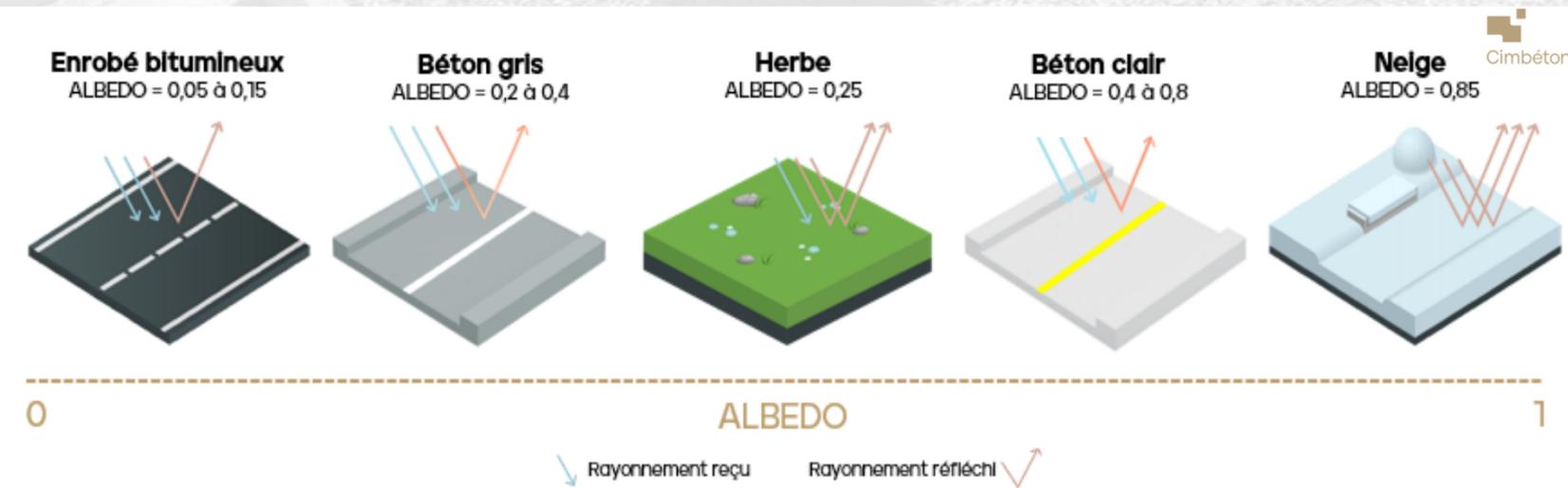
CEREMA - ADEME – recueil rafraichissement urbain - 2021 :



(Bigorgne, Hendel, APUR 2017)

	revêtement «cool»	béton clair	stabilisé	enrobé bitumineux
albedo	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

<https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4649-rafraichir-les-villes.html>



Synthèse | Matériaux et coûts | Mise en œuvre | Financements | Oups !

Solution grise

### Reflète le rayonnement solaire et rafraîchit l'air ambiant

Les villes des Cyclades adoptent un revêtement clair pour renvoyer la chaleur solaire sans l'emmagasiner, grâce à leur albedo élevé. Ces surfaces, souvent de couleur claire mais pas toujours blanches, réfléchissent l'énergie solaire avec un albedo supérieur à 0,7, limitant ainsi l'absorption de chaleur. En revanche, les matériaux urbains habituels comme l'asphalte ont un albedo faible, absorbant fortement la chaleur. Certains, comme l'enrobé, retiennent la chaleur le jour pour la libérer la nuit, contribuant à l'effet d'îlot de chaleur urbain. Cependant, privilégier systématiquement les revêtements à albedo élevé peut causer des inconforts thermiques pour les piétons en renvoyant le rayonnement solaire. Une évaluation approfondie des impacts avant leur adoption est donc vivement conseillée !

Baisse médiane de la température de l'air **-3°C**

Délai des travaux de 1 à 3 mois

Coût de 20 à 35 € HT / m<sup>2</sup>

- Réduire les consommations énergétiques
- Améliorer le cadre de vie
- Améliorer le bien-être et la santé

Logos: République Française, ADEME, Plus fraîche ma ville

<https://plusfraichemaville.fr/fiche-solution/revetement-albedo-eleve>

Surfaces en béton = surfaces claires avec albedo adapté :

- **Absorption limitée de chaleur** → réduction des Îlots de Chaleur Urbain et meilleur confort thermique local
- **Réduction des besoins énergétiques en éclairage** → économies





# Solutions d'adaptation : un béton perméable !

## Pourquoi opter pour un revêtement drainant dans une cour d'école ?

Les matériaux en asphalte, imperméables et de couleur foncée utilisés dans les villes contribuent à augmenter significativement les températures de surfaces, ce qui peut être source d'inconfort.

Trottoirs, chaussées, revêtements des immeubles, toitures en zinc participent fortement au phénomène d'ICU. Deux effets se combinent : absorption et stockage de l'énergie. Le matériau de surface (généralement constitué d'enrobé imperméable de couleur sombre) capte l'énergie solaire qui est ensuite stockée dans le matériau sous-jacent (béton, grave).

Ces revêtements imperméables empêchent l'infiltration des eaux de pluie dans le sol. L'eau de pluie qui ruisselle, est collectée puis évacuée dans les réseaux d'assainissement. L'eau est ainsi considérée comme un déchet et non comme une ressource pour les sols, les végétaux et la biodiversité.

## Rafrâichissement attendu

- Les revêtements drainants ou revêtements perméables ont la capacité d'infiltrer l'eau en surface. Ils peuvent aussi la stocker dans leur structure avant de la redistribuer progressivement vers la nappe ou vers des exutoires dédiés.
- L'eau qui s'infiltré dans le sol pourra être remobilisée ultérieurement (par évaporation) et/ou utilisée par les végétaux à proximité (par évapotranspiration).
- Evaporation du sol et évapotranspiration des végétaux favorisent une réduction localisée de la température de l'air.
- 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).
- Les pavés poreux peuvent être arrosés ou alimentés en haut via un système de goutte à goutte installé dans le lit de pose pour diminuer la température ressentie grâce au phénomène d'évaporation.
- 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)

Arbres    Revêtements drainants    Revêtements à albédo élevé

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

<https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4649-rafraichir-les-villes.html>



Avant



Après

Aubervilliers, Tierce Forêt

Logos: République Française, Ademe, Plus fraîche ma ville.

### Revêtement drainant / perméable - école

Synthèse    Matériaux et coûts    Mise en œuvre    Financements    Oups !

Solution grise

#### Conserve les usages habituels de l'école tout en infiltrant les eaux de pluie

Les cours d'école ont un formidable potentiel pour passer d'îlot de chaleur à îlot de fraîcheur, notamment en jouant sur le revêtement du sol. Les revêtements drainants sont constitués de matériaux spécialement conçus pour permettre à l'eau de s'écouler efficacement sur une surface, évitant les flaques d'eau et les risques de chute. Sols en béton, sols naturels... chaque usage de la cour correspond un type de revêtement drainant qui permettra de gérer les eaux pluviales tout en rendant la cour plus agréable à vivre pour les élèves. Ces types de surfaces peuvent parfois accueillir des plantes (fleurs, arbustes) qui bénéficieront elles aussi de la bonne infiltration de l'eau dans le sol.

Baisse médiane de la température de l'air **-2,1°C**

Délai des travaux de 1 à 2 mois

Coût de 5 à 150 € HT / m²

- Gérer les eaux pluviales
- Prévenir les risques d'inondation

<https://plusfraichemaville.fr/fiche-solution/revetement-drainant-ecole>

Bétons perméables =

- Désimperméabilisation, meilleure gestion des eaux pluviales, alimentation en eau de la végétation et des nappes...
- Réduction des Îlots de Chaleur Urbain et meilleur confort thermique local par moindre inertie thermique (vides) et évaporation-évapotranspiration





# Solutions d'adaptation : le béton

Deux types de strategies pour la combinaison de revêtements :

**1. Faire ruisseler l'eau sur des revêtements imperméables vers des dispositifs de récupération dédiés**

- si l'eau ne peut pas s'infiltrer partout
- si proche d'un bâtiment
- si sur voie très circulée

**2. Infiltrer l'eau là où elle tombe grâce à des revêtements poreux**

- si peu de place pour faire des espaces végétalisés
- si le sous-sol n'est pas propice à la concentration des eaux en un point, car sensible ou peu perméable.



Pour gérer les eaux de pluie à la parcelle, la municipalité de Gennevilliers a créé de larges espaces plantés, vers lesquels ruissellent les eaux pluviales sur du béton désactivé. À gauche, la place Jaffeux, à droite, la place du Cadran Solaire.



Trottoirs en béton = entretien facile, évite les nuisances sonores liées aux valises des voyageurs et assure le confort des piétons.



© Flavio Coddou pour Fieldwork architecture



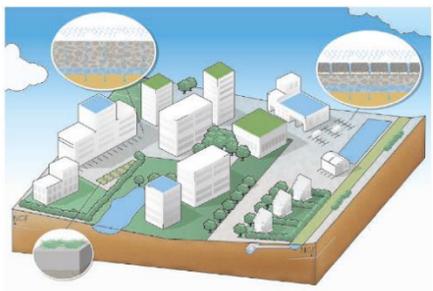
# Surchauffe urbaine et solutions d'adaptation

TECHNIQUE  
CIMENTON

T 69

## LUTTER CONTRE L'IMPERMÉABILISATION DES SURFACES URBAINES

Les revêtements drainants en béton



La rivière pédagogique, alimentée notamment par le surplus d'eau des robinets extérieurs.



Butte végétalisée et plateforme tour d'arbre

Terrain de sport



JT VECU

Photos 10 à 13 - Série de 4 photos de revêtements drainants en béton illustrant différentes applications : abords de piscine, place, parking et trottoir.