

# Îlot de Chaleur Urbain

Comment le mesurer ?

Quelles mesures d'atténuation et de rafraîchissement ?

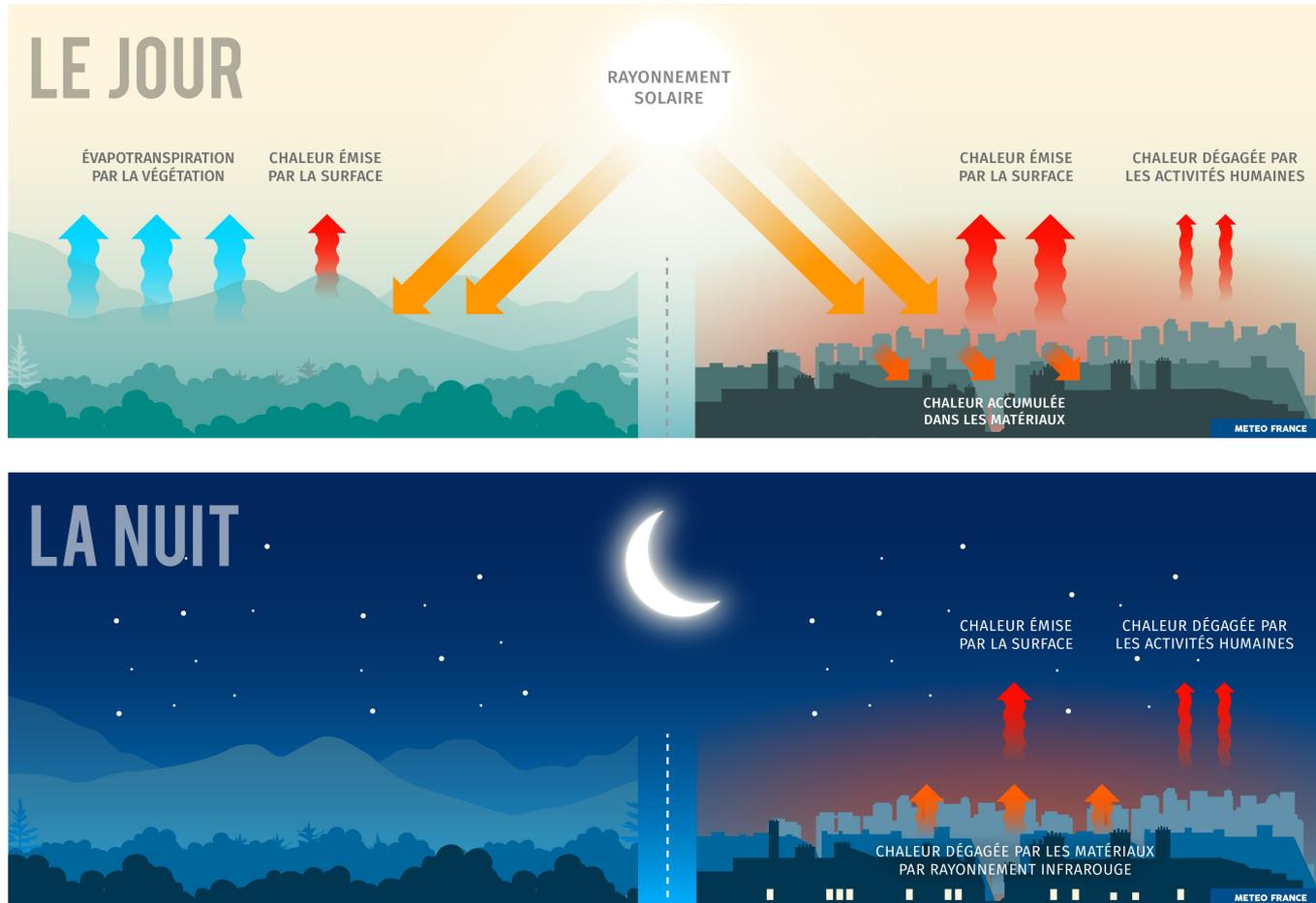
**Rémy Claverie**, Julien Bouyer

Équipe de Recherche TEAM : **T**ransferts et Interactions liés à l'**E**Au en **M**ilieus construits

# Origine de l'ICU

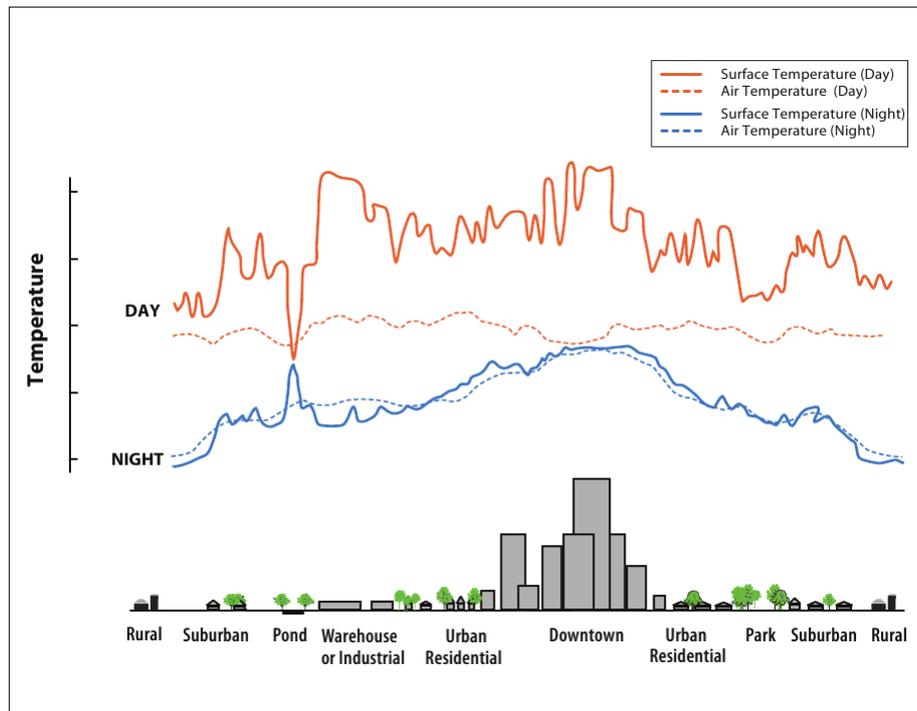
## Milieu rural

## Milieu urbain

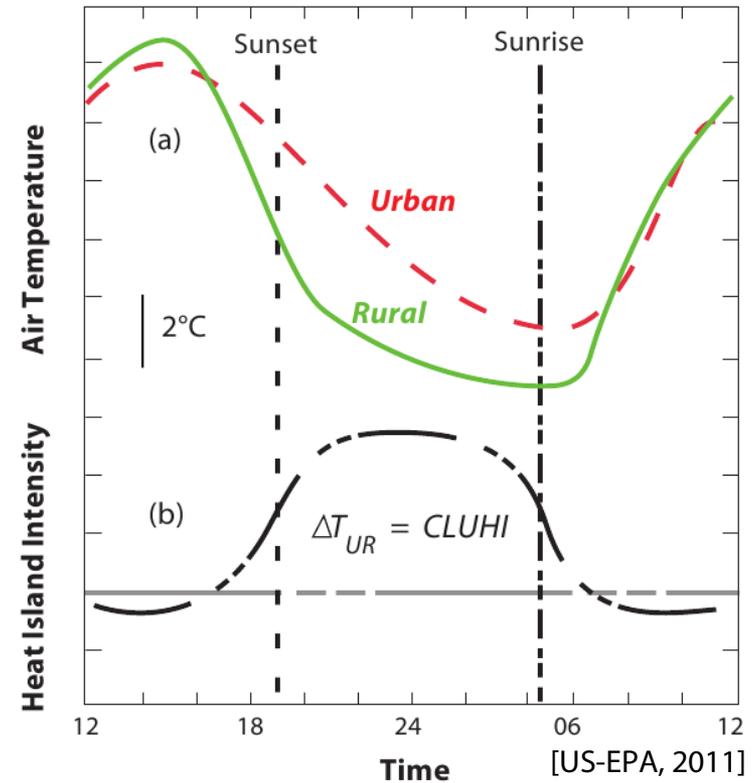


[APC 2018, L'îlot de Chaleur Urbain, Agence Parisienne du Climat, disponible sur <http://www.apc-paris.com>]]

# L'îlot de chaleur urbain (ICU) un phénomène spatialisé et nocturne



[US-EPA, 2011]

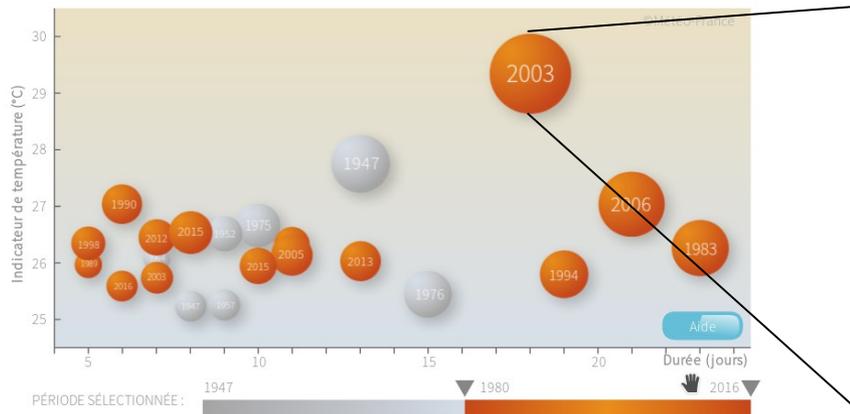


[US-EPA, 2011]

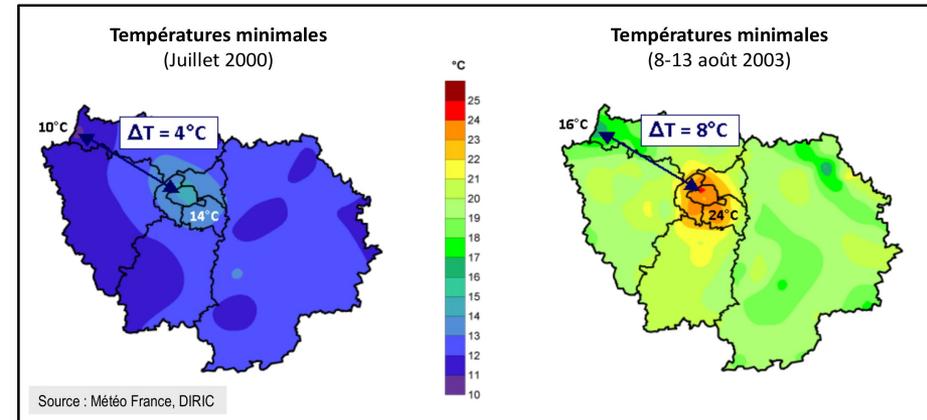
[US-EPA, 2011] U.S. EPA. Report on the 2011 U.S. Environmental Protection Agency (EPA) Decontamination Research and Development Conference. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R/12/557, 2012.

# Changement climatique, augmentation de la fréquence et de l'intensité des canicules... et amplification des ICU

France



Île de France - Paris



## ► **Un exemple de vague de chaleur extrême : la canicule de 2003**

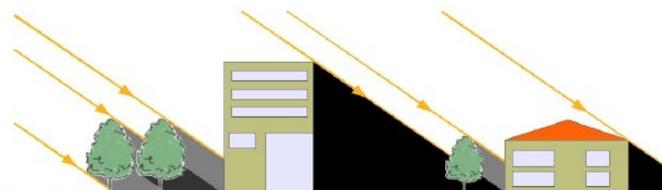
- Surmortalité de 15000 personnes au niveau national (entre le 1er et le 20 août)
- À Paris : conditions climatiques de Séville
- 82% des décès ont touché les + de 75ans

# Les principales causes de l'ICU

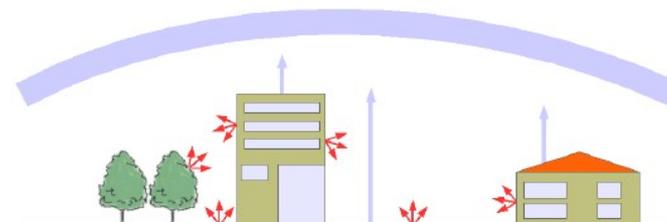


[ADEME, TRIBU & IRSTV, Diagnostic de la surchauffe urbaine 2017]

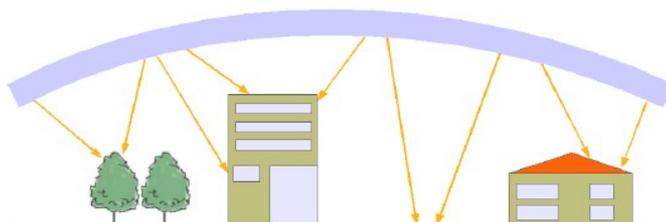
# Les phénomènes microclimatiques à l'échelle de la rue



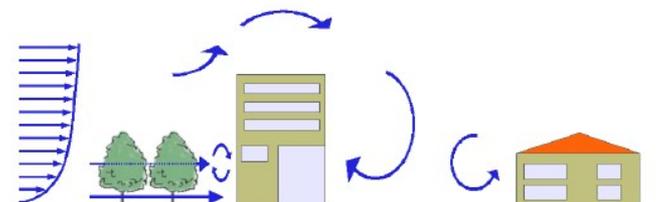
Ensoleillement direct, masques solaires



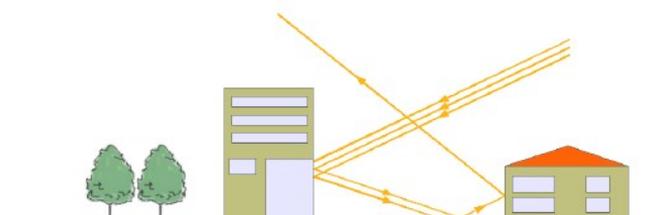
Echanges infrarouges



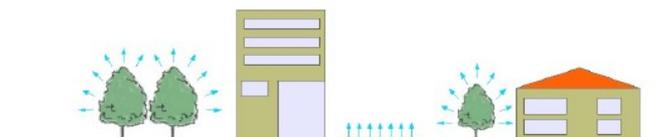
Ensoleillement diffus



Phénomènes aérodynamiques



Inter-réflexions solaires, piégage radiatif



Phénomènes évaporatifs

[Bouyer 2016, Formation IFORE]

# Matériaux, albédo et stockage du rayonnement

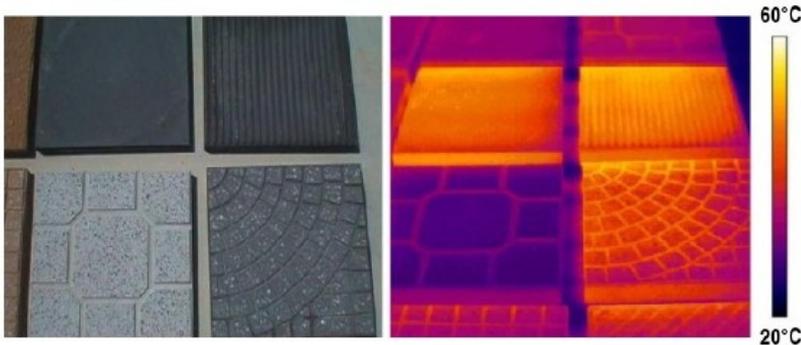
*L'albédo d'une ville ou d'un quartier dépend de la forme du tissu urbain et de la nature des matériaux de revêtements utilisés.*

## ◆ **Forme**

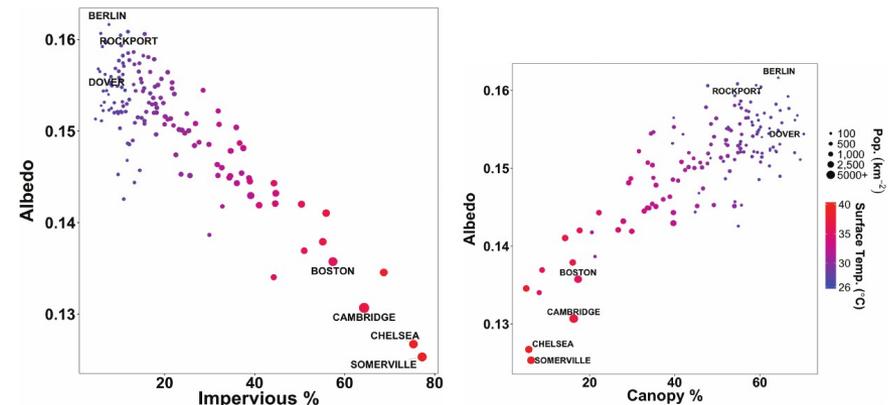
- ◆ L'albédo diminue quand les irrégularités augmentent, (plus marqué en hiver)
- ◆ L'hétérogénéité des hauteurs fait également diminuer l'albédo
- ◆ L'albédo augmente avec l'angle solaire zénithal.
- ◆ Il y a une variation saisonnière de l'albédo moyen calculé sur une journée.

## ◆ **Matériaux**

- ◆ Les caractéristiques de réflexion des toits ont le plus d'influence sur l'albédo équivalent de la surface urbaine.
- ◆ Quand la hauteur des bâtiments diminue, les caractéristiques de réflexion du sol et des murs reprennent de l'importance.



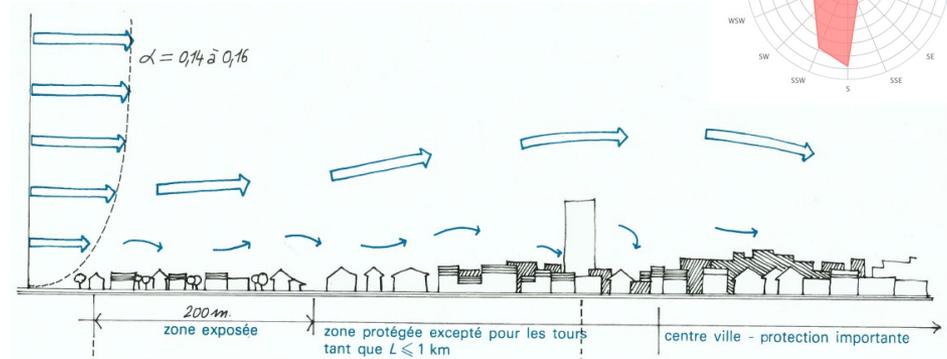
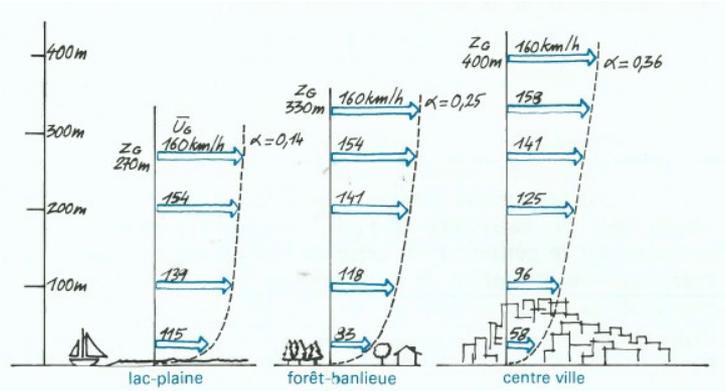
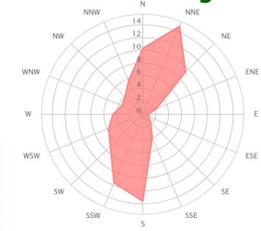
Doulos, et al, Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials Solar Energy, 2004, 77, 231-249



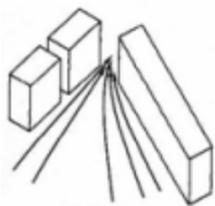
Trlica et al., (2017). Albedo, landcover, and daytime surface temperature variation across an urbanized landscape. Earth's Future, 5, 1084-1101, <https://doi.org/10.1002/2017EF000569>

# Importance de la configuration urbaine

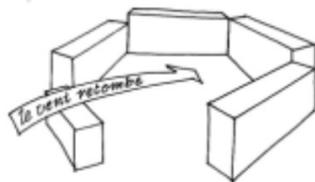
## Rose des vents - Strasbourg



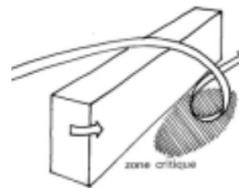
## Effets aérodynamiques



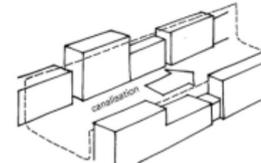
Venturi



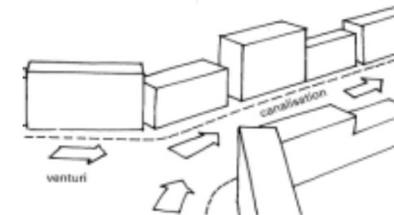
Maille



Barre



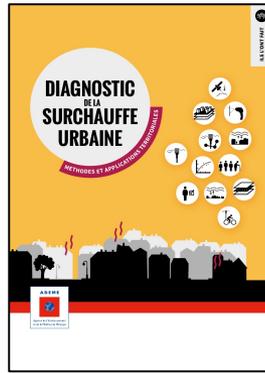
Canalisation



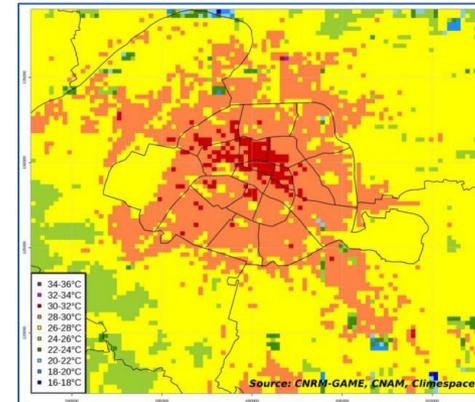
Venturi canalisé

Gandemer, J. (1976). "Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti" La documentation française, CSTB, 132p.

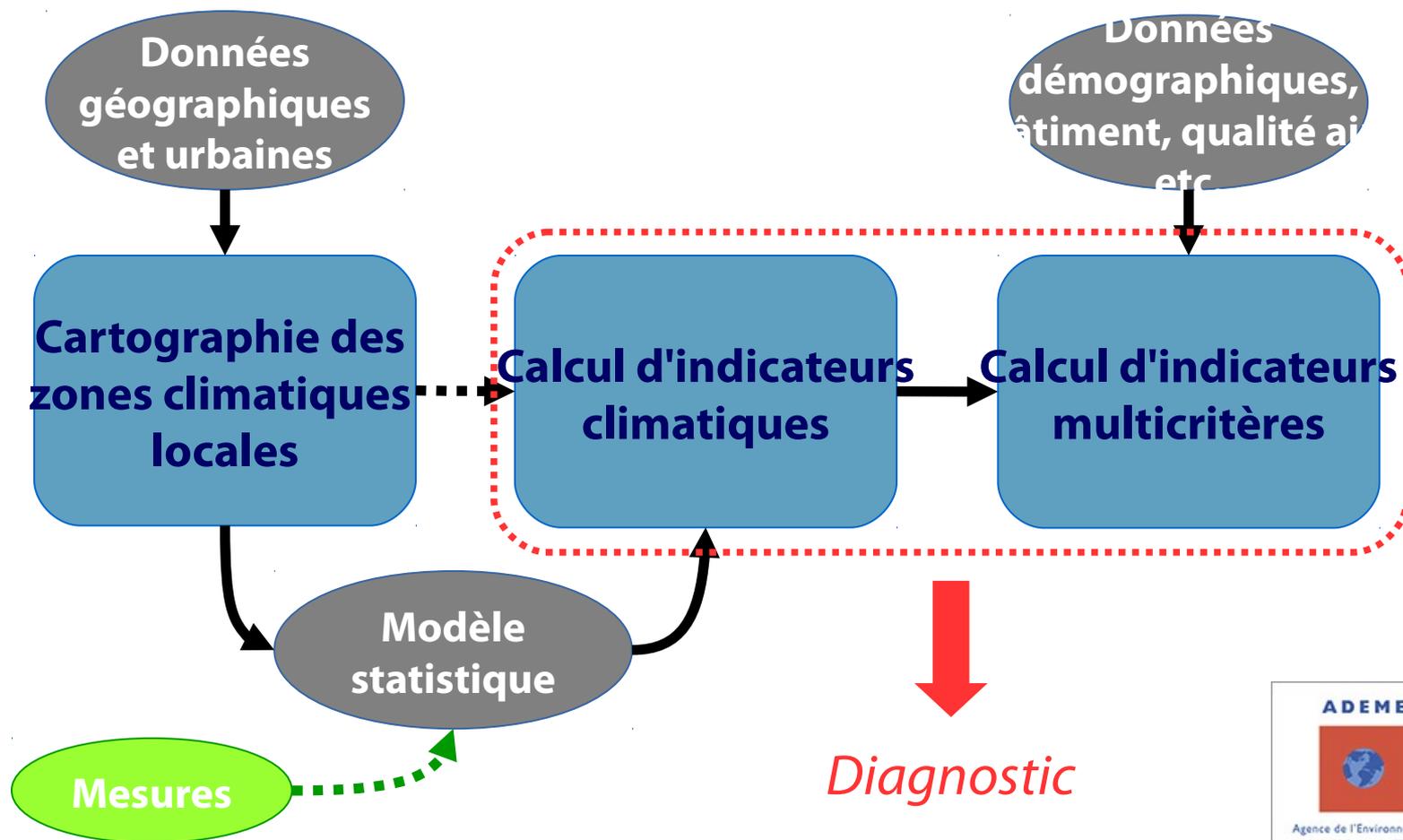
# Diagnostiquer les ICU pour connaître climatiquement le milieu urbain



[ADEME, 2017]



# DiaClimap : outil de diagnostic climatique pour la planification urbaine



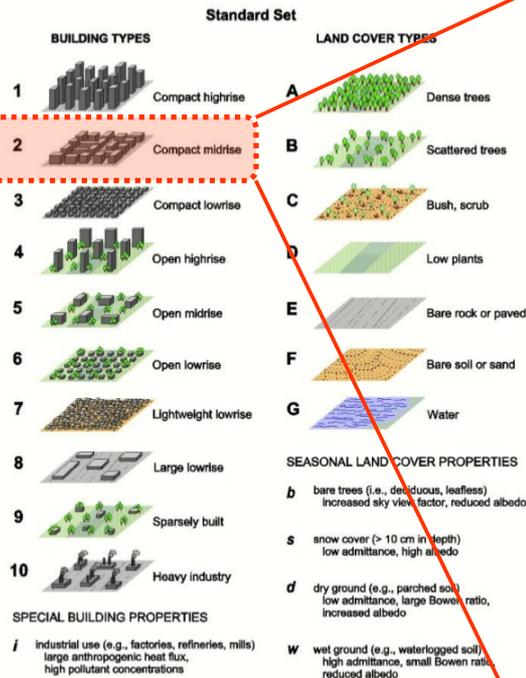
# DiaClimap : outil de diagnostic climatique pour la planification urbaine

Concept de Zones Climatiques Locales (LCZ) →

LCZ = zone homogène

Aménagement  
Climatique

## Les 17 typologies



## Typologie « centre ville dense »



## Indicateurs urbains

### Indicateurs morphologiques

- Facteur de vue du ciel
- Rapport d'aspect (AR)
- Hauteur moyenne des bâtiments
- Classe de rugosité

### Indicateurs d'occupation du sol

- Taux de surface bâtie
- Taux de surface imperméable
- Taux de surface perméable

### Indicateurs thermiques

- Effusivité thermique
- Albedo
- Flux anthropogénique

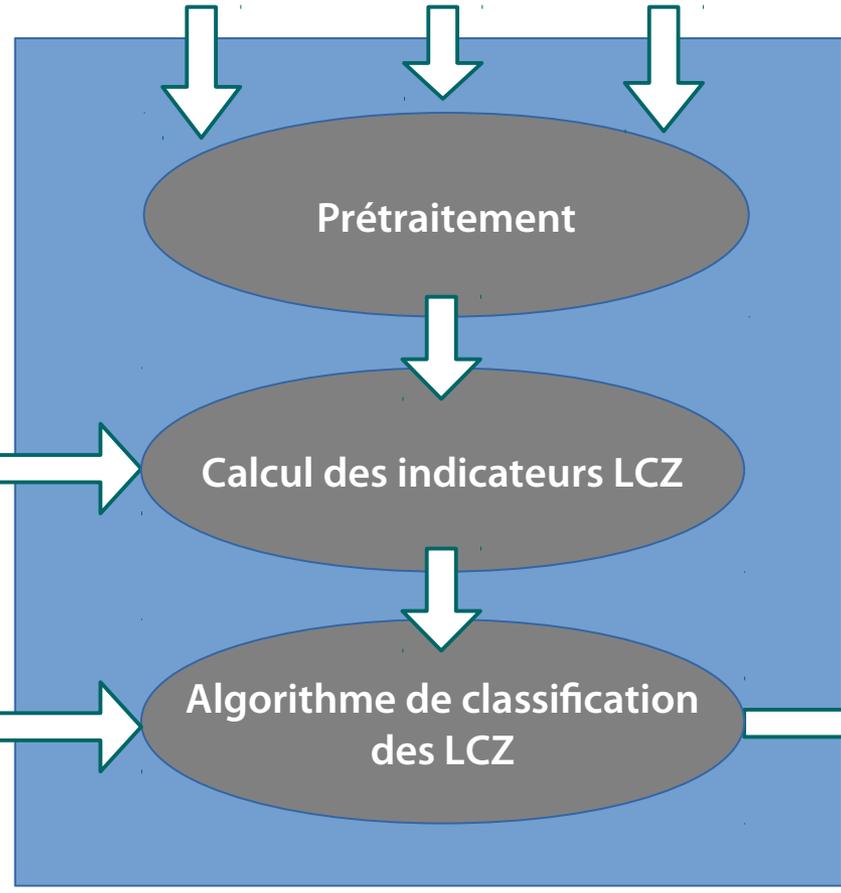
# DiaClimap : outil de diagnostic climatique pour la planification urbaine

Données Sat. HR (Peiades)      Cadastre (IGN)      Topographe (IGN)



## Urban Atlas

Urban Atlas		2006	2012
Legende	Nomenclature		
Code			
11100	Continuous Urban Fabric (S.L.>80%)		
11210	Discontinuous Dense Urban Fabric (S.L. 50% - 80%)		
11220	Discontinuous Medium Density Urban Fabric (S.L. 30%-50%)		
11230	Discontinuous Low Density Urban Fabric (S.L.10%-30%)		
11240	Discontinuous Very Low Density Urban Fabric (S.L.<10%)		
11300	Isolated Structures		
12100	Industrial, commercial, public, military and private units		
12210	Fast transit roads and associated land		
12220	Other roads and associated land		
12230	Railways and associated land		
12300	Port areas		
12400	Airports		
13100	Mineral extraction and dump sites		
13300	Construction sites		
13400	Land without current use		
14100	Green urban areas		
14200	Sports and leisure facilities		
20000	Agricultural + Semi-natural areas + Wetlands		
21000	Arable land (annual crops)		
22000	Permanent crops		
23000	Pastures		
24000	Complex and mixed cultivation patterns		
25000	Orchards		
31000	Forests		
32000	Herbaceous vegetation associations		
33000	Open spaces with little of no vegetations		
40000	Wetlands		
50000	Water bodies		



- ### LCZ classification
- LCZ 1 = Compact high-rise
  - LCZ 2 = Compact midrise
  - LCZ 3 = Compact low-rise
  - LCZ 4 = Open high-rise
  - LCZ 5 = Open midrise
  - LCZ 6 = Open low-rise
  - LCZ 7 = Lightweight low-rise
  - LCZ 8 = Large low-rise
  - LCZ 9 = Sparsely built
  - LCZ 10 = Heavy industry
  - LCZ A = Dense trees
  - LCZ B = Scattered trees
  - LCZ C = Bush, scrub
  - LCZ D = Low plants
  - LCZ E = Bare rock or paved
  - LCZ F = Bare soil or sand
  - LCZ G = Water

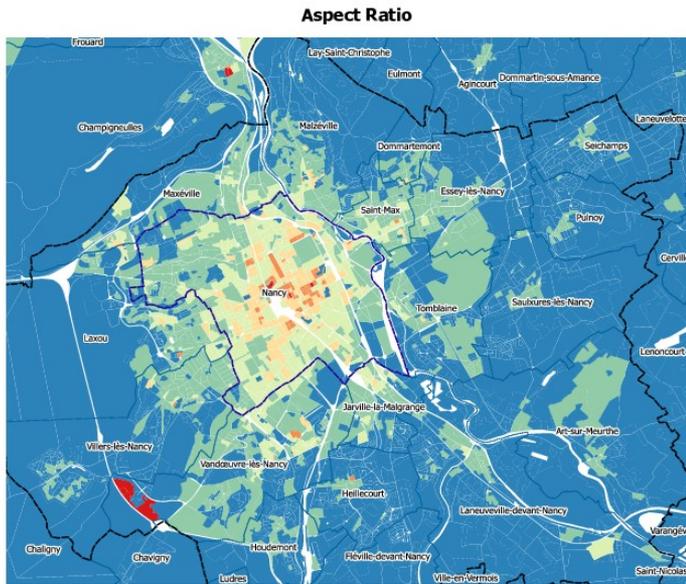
Diagnostic climatique

# DiaClimap : outil de diagnostic climatique pour la planification urbaine

## Indicateurs morphologiques...



Diagnostic climatique

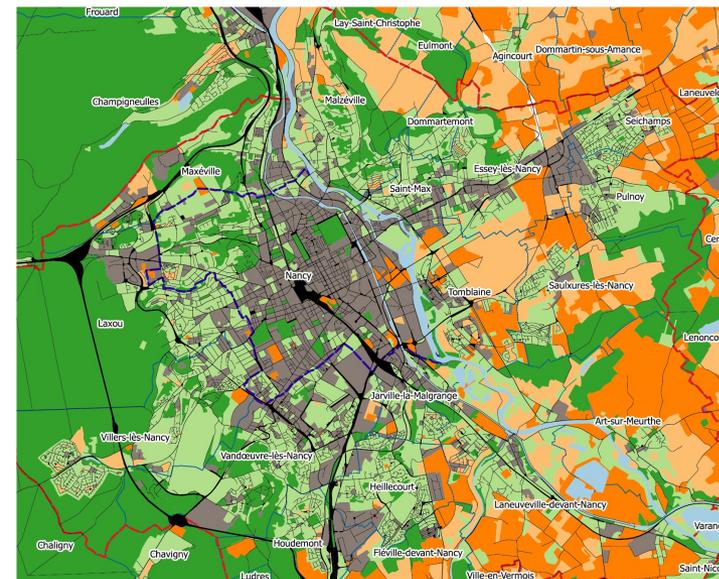


Sources : IGN, Grand Nancy

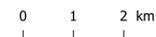


## et d'occupation du sol

**Mode d'occupation du sol à l'échelle des îlots urbains**

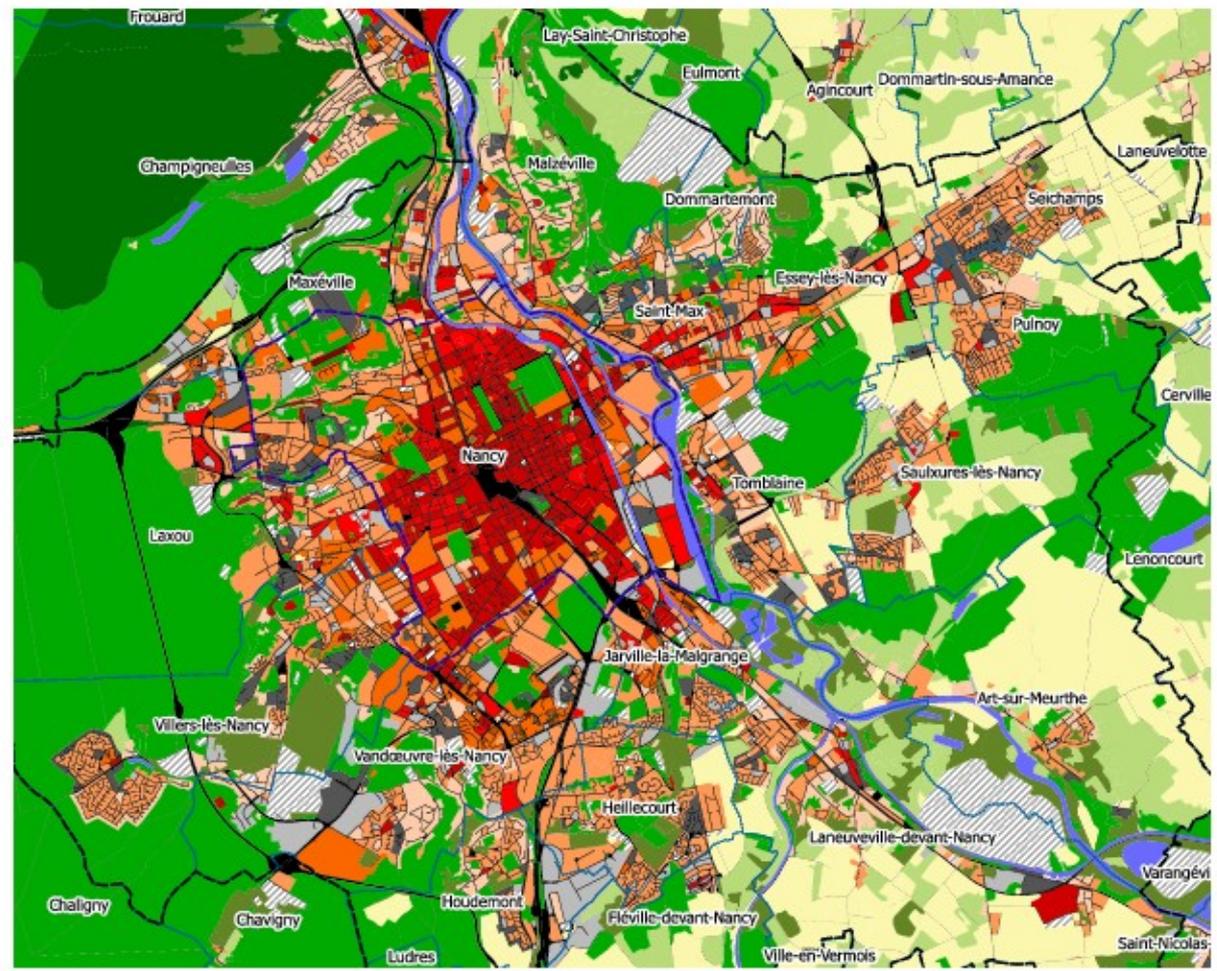


Sources : IGN RGE, BD TOPO, Urban Atlas, PLEIADES

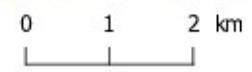




## Classification des LCZ



- ClassifLCZ\_v10.0
- LCZ 1 = Compact high-rise
  - LCZ 2 = Compact mid rise
  - LCZ 3 = Compact low-rise
  - LCZ 4 = Open high-rise
  - LCZ 5 = Open mid rise
  - LCZ 6 = Open low-rise
  - LCZ 7 = Lightweight low-rise
  - LCZ 8 = Large low-rise
  - LCZ 9 = Sparsely built
  - LCZ 10 = Heavy industry
  - LCZ A = Dense trees
  - LCZ B = Scattered trees
  - LCZ C = Bush, scrub
  - LCZ D = Low plants
  - LCZ E = Bare rock or paved
  - LCZ F = Bare soil or sand
  - LCZ G = Water
  - ▨ Non-classé
- contours
- ▭ Ville de Nancy
  - ▭ Communes
  - ▭ Grand Nancy



Sources : INSEE, IGN, Grand Nancy

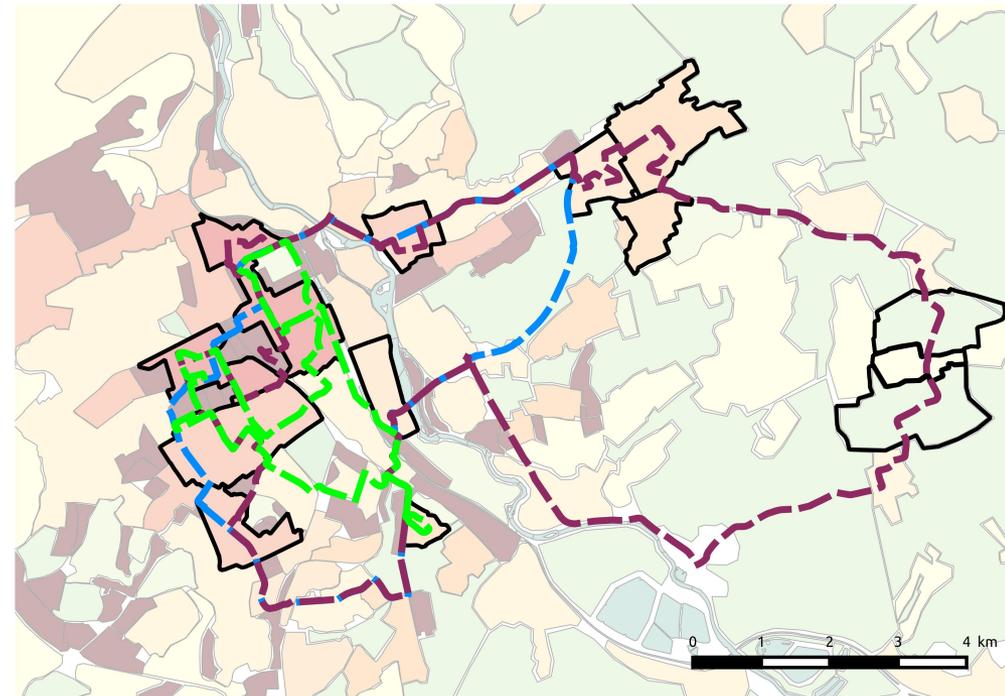
Diagnostic climatique

# DiaClimap : outil de diagnostic climatique pour la planification urbaine

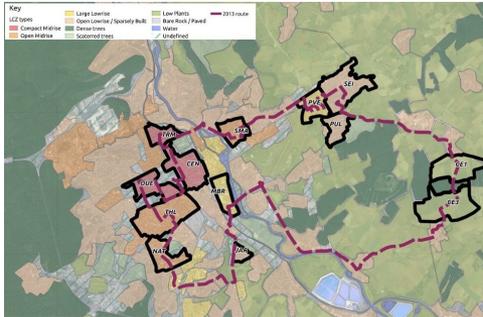


## Quelle relation entre LCZ et ICU ?

- Conditions météorologiques anticycloniques
- Résolution spatiale : 3m
- Protocole 1 : 3 boucles de mesure par jour (34 x 2 sessions)
  - Période diurne (14h – 17h)
  - Période nocturne (0h – 3h)
- Protocole 2 : 2 boucles de mesure horaire pendant 24 heures (2 sessions)



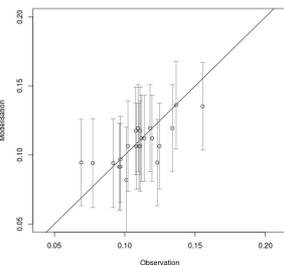
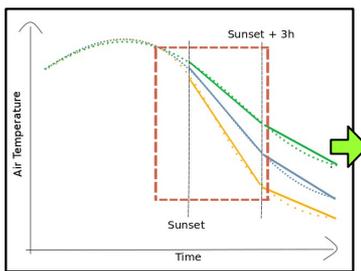
# DiaClimap : outil de diagnostic climatique pour la planification urbaine



Nocturnal, row - column

LCZ Type	Compact Midrise	Open Midrise	Open Lowrise / Sparsely Built	Large Lowrise	Low Plants
Compact Midrise	0.2 (0.5)	1.8 (0.6)	1.5 (0.6)	4.4 (1.0)	4.4 (1.0)
Open Midrise	0.4 (0.3)	1.5 (0.6)	1.3 (0.7)	4.2 (1.0)	4.2 (1.0)
Open Lowrise / Sparsely Built	0.3 (0.3)	-0.1 (0.4)	-0.3 (0.4)	2.4 (0.7)	2.4 (0.7)
Large Lowrise	0.0 (0.3)	-0.3 (0.3)	-0.2 (0.3)	2.9 (0.7)	2.9 (0.7)
Low Plants	0.8 (0.5)	0.5 (0.4)	0.6 (0.4)	0.8 (0.4)	0.8 (0.4)

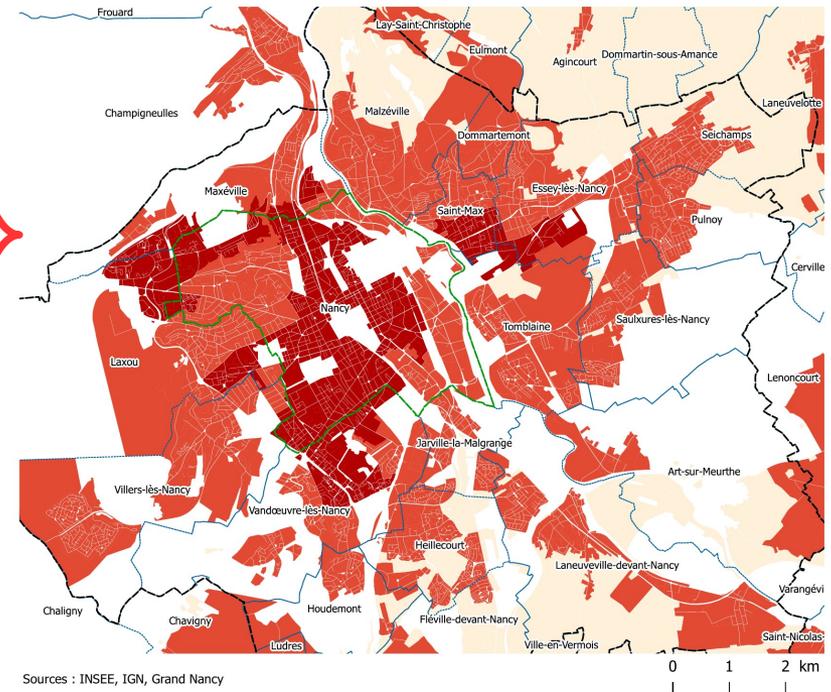
Diurnal, column - row



Pot. Refr. = f(SVF, Per, Pos)

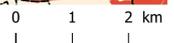
## Potentiel d'ICU moyen nocturne (dans les conditions favorables)

Potentiel d'ICU nocturne (°C)



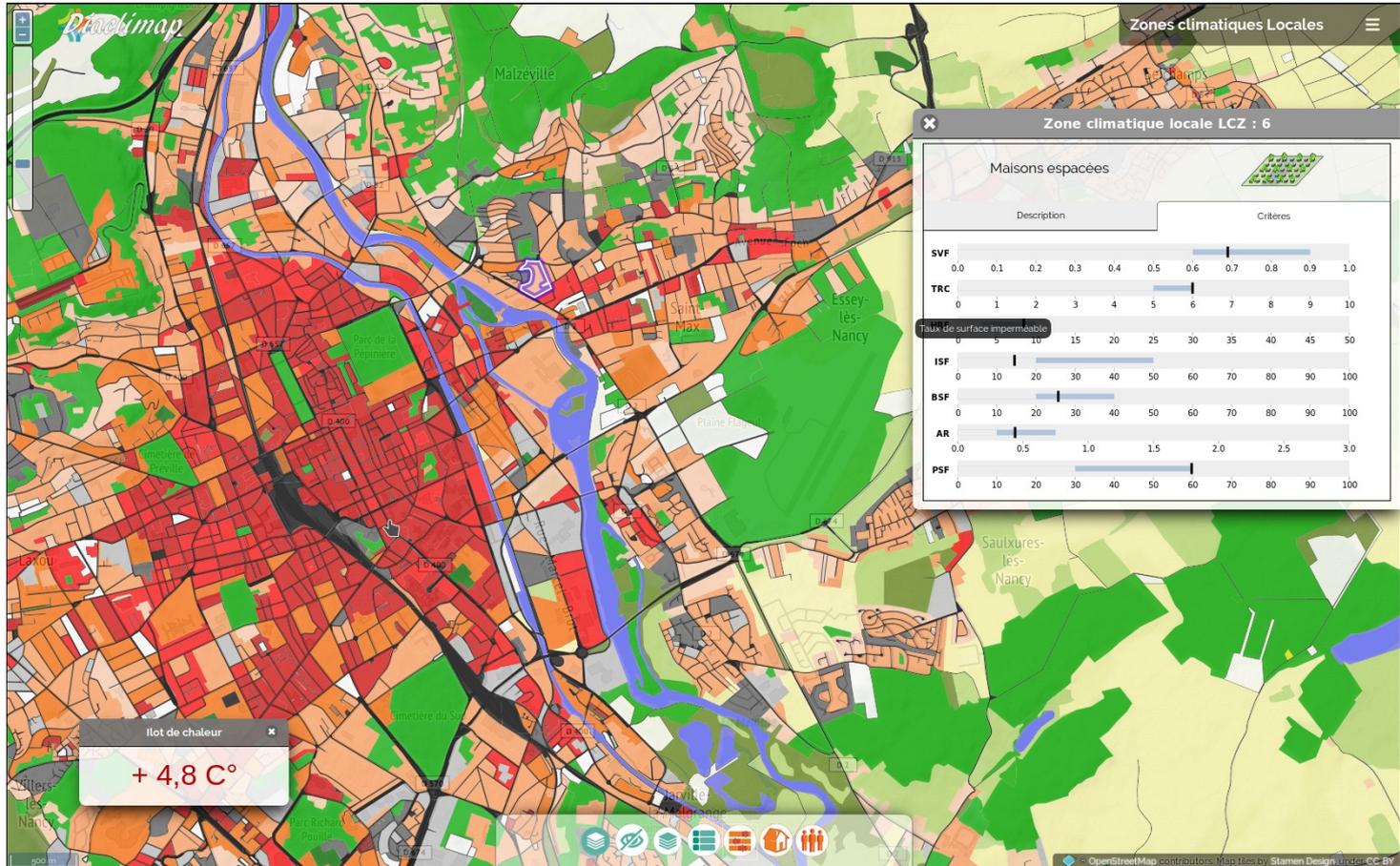
- Métropole Grand Nancy
  - Nancy
  - Communes
- Potentiel d'ICU Nocturne (°C)
- 0 - 1
  - 1 - 2
  - 2 - 3
  - 3 - 4
  - > 4

Sources : INSEE, IGN, Grand Nancy



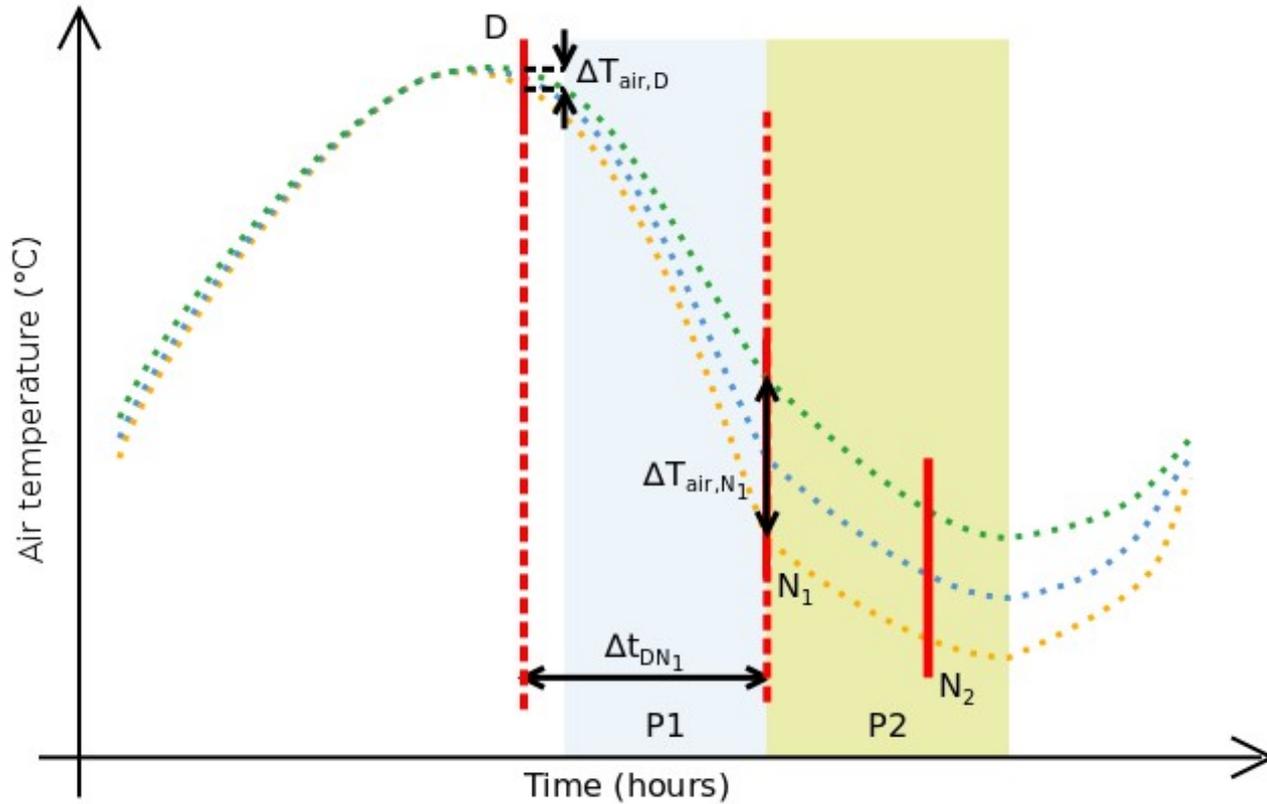
# DiaClimap → Outil opérationnel

- Application WEB cartographique



Valorisation

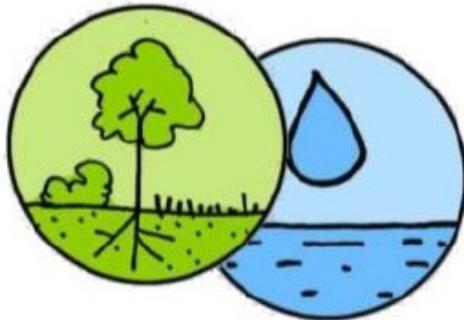
Chaque type de LCZ se rafraîchit avec sa propre dynamique



Rafraîchissement du milieu urbain

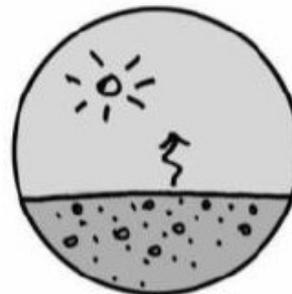
# Un panel de solutions d'adaptation

## Solutions vertes (et bleues)



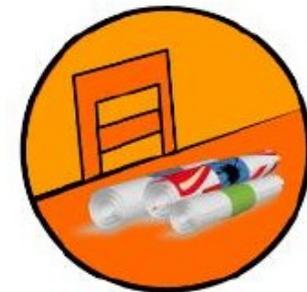
Services écosystémiques,  
nature en ville  
(végétal, eau)

## Solutions grises



Infrastructures urbaines :  
revêtements, mobilier  
urbain, bâtiment, bâti

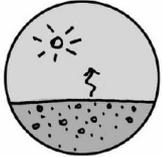
## Solutions douces



Gestion et usages de la  
ville :  
services, mobilités, modes  
de vie...

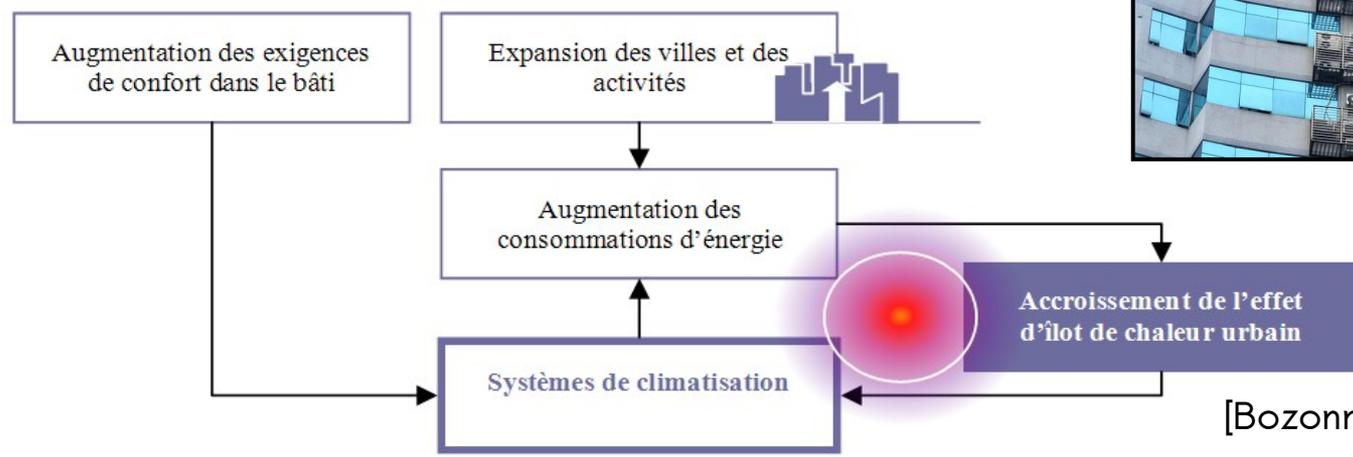
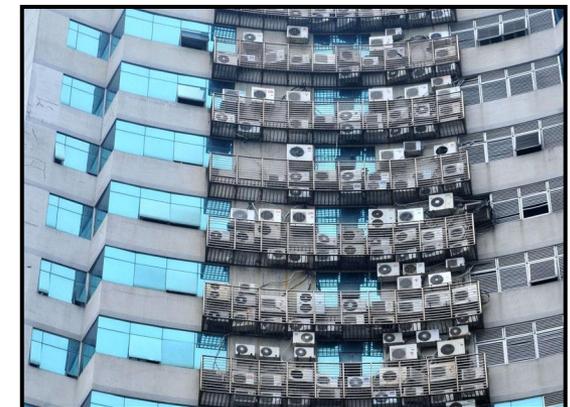
[ADEME et coll, 2017]

# Grises



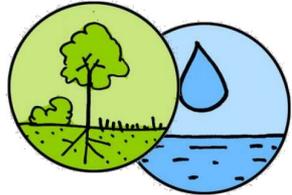
## La climatisation : une solution de (mal-)adaptation technique...

Rafraîchissement du milieu urbain

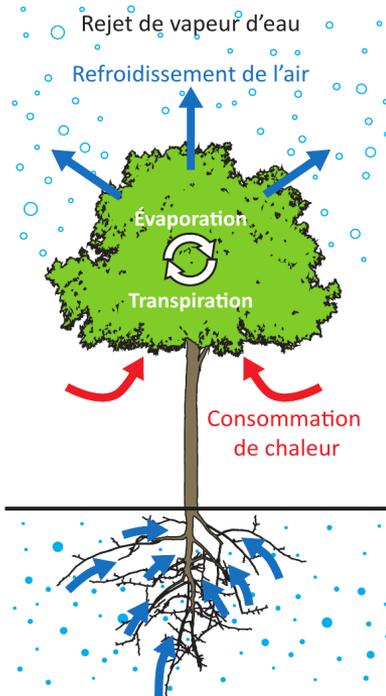


[Bozonnet, 2005]

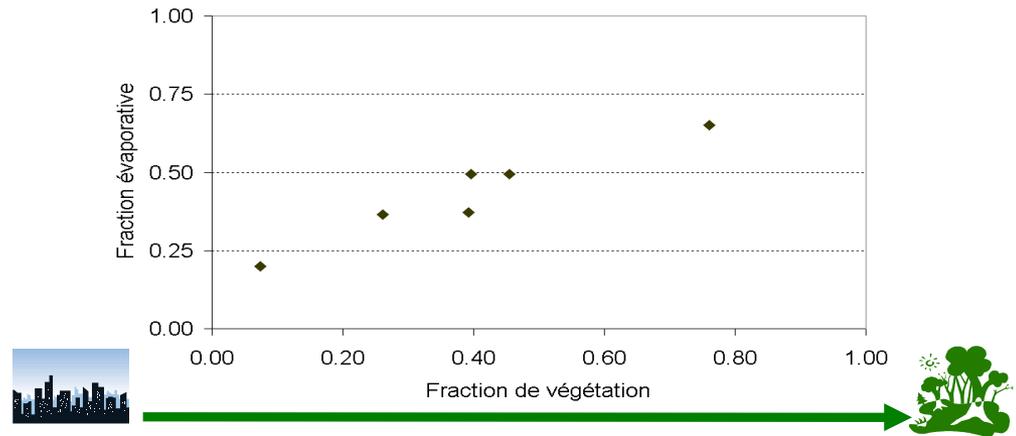
# Vertes



## La bioclimatisation



## Végétalisation et flux évaporatifs à l'échelle du quartier (Projet HYCLAU – IFSTTAR/Cerema)



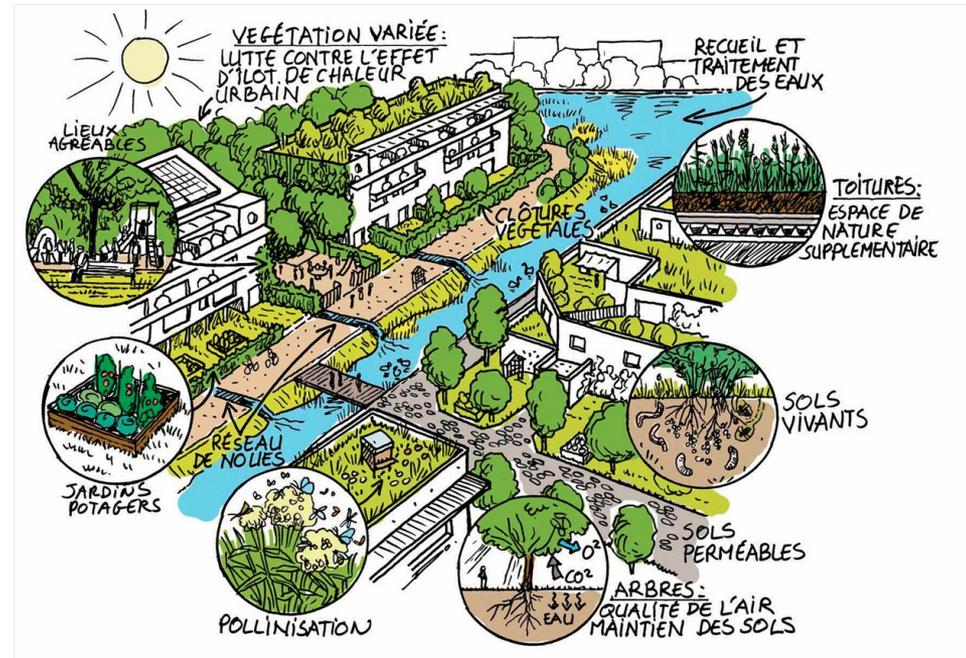
### Facteurs d'influence :

- ◆ Teneur en eau du substrat ;
- ◆ Quantité d'eau reçue ;
- ◆ Température ;
- ◆ Nébulosité ;
- ◆ Vitesse et orientation du vent
- ◆ Biomasse végétale, espèces présentes, état de santé ...

# La végétalisation du milieu urbain, une opportunité à intégrer dans le tissu urbain



- Rafrâichissement urbain :
- Où mettre ces dispositifs ?
  - Lesquels ?
  - Combien ?



[Natureparif, 2013]



Photo Luc Chrétien, Cerema

**SÉSAME :**

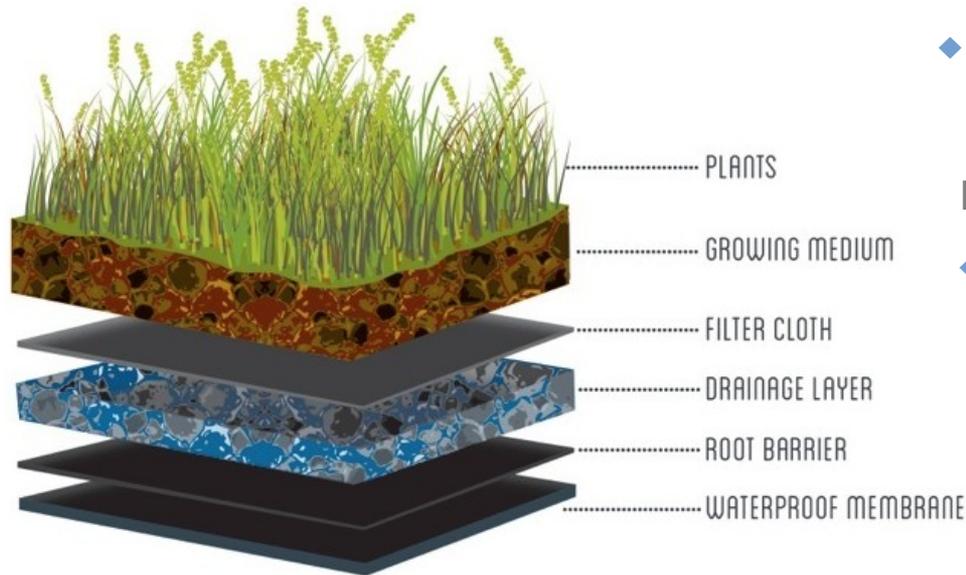
« Services **Éco**Systémiques  
rendus par les **Arbres**,  
**Modulés** selon l'**Espèce** »

Connaître les services rendus par les végétaux en milieu urbain  
Choisir les espèces en fonction des services attendus

**Contact :** Luc Chrétien (luc.chretien@cerema.fr)

# Toitures végétalisées

Quelle(s) toiture(s) ?  
Quel(s) bénéfice(s) ?



From : <http://www.architectureanddesign.com.au>

Trois techniques :

- ◆ Extensive (Substrat 3cm → 15cm) : Forte teneur en matière minérale
- ◆ Semi-intensive (Substrat 15cm → 60cm)
- ◆ Intensive (Substrat > 60cm) : terre végétale

Les bénéfices potentiels :

- ◆ « **Écosystémiques** » :

Support de **biodiversité**

Diminution des **consommations énergétiques**

**Rafrâichissement urbain**

**Services culturels** : intégration paysagère, ressenti en terme de confort et bien-être

→ **L'évapotranspiration impacte quasiment tous ces bénéfices**

# Toitures végétalisées : différentes techniques



Toiture semi-intensive



Toiture intensive



Toiture extensive

## Importance de la conception :

- ◆ De l'épaisseur du substrat, dépend : le coût, la strate végétale, la quantité d'eau disponible (ou retenue), l'entretien, l'utilisation
- ◆ Type de végétation
  - ◆ TV intensive : arbres, végétation haute
  - ◆ TV semi-intensive : fleurs, plantes, etc.
  - ◆ TV extensive (TVE) : sedums, graminées, etc

L'isolation thermique, la rétention d'eau et l'évapotranspiration seront plus importantes avec **une toiture végétalisée intensive**

# Toitures végétalisées

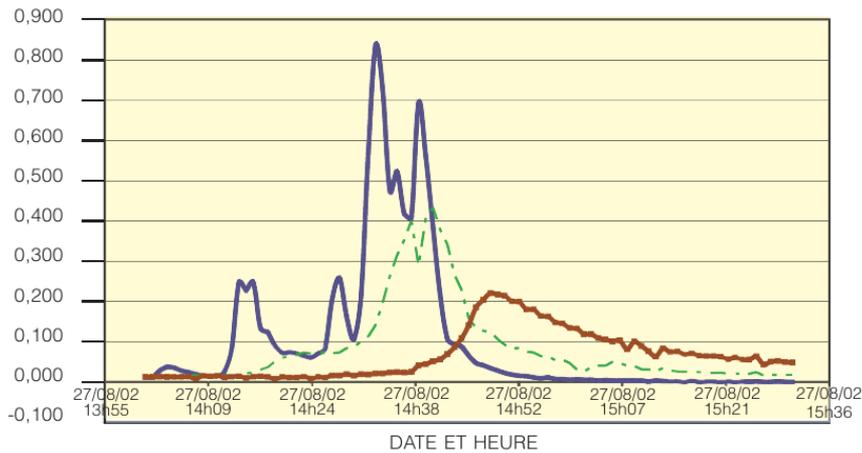
Protection de la couche d'étanchéité  
Diminution de la température de surface



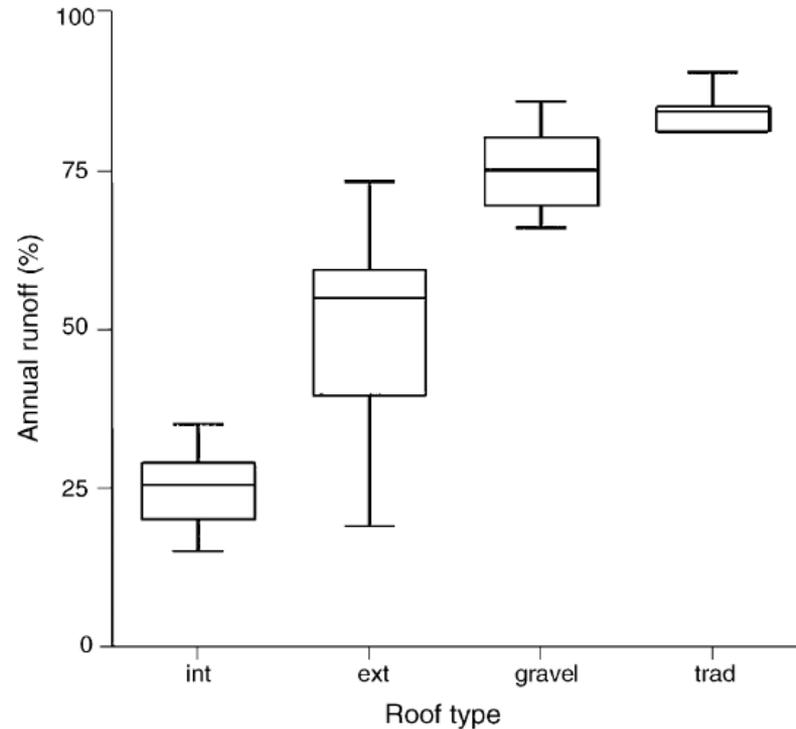
Paul Bamson Architecture : Chicago City Hall (green roof) and Cook County side (conventional roofing).

# Toitures végétalisées

## Rétention des eaux pluviales



Toiture nue substrat = 40mm, substrat = 200m  
 (CSTC, 2006)



(Mentens et al, 2006)

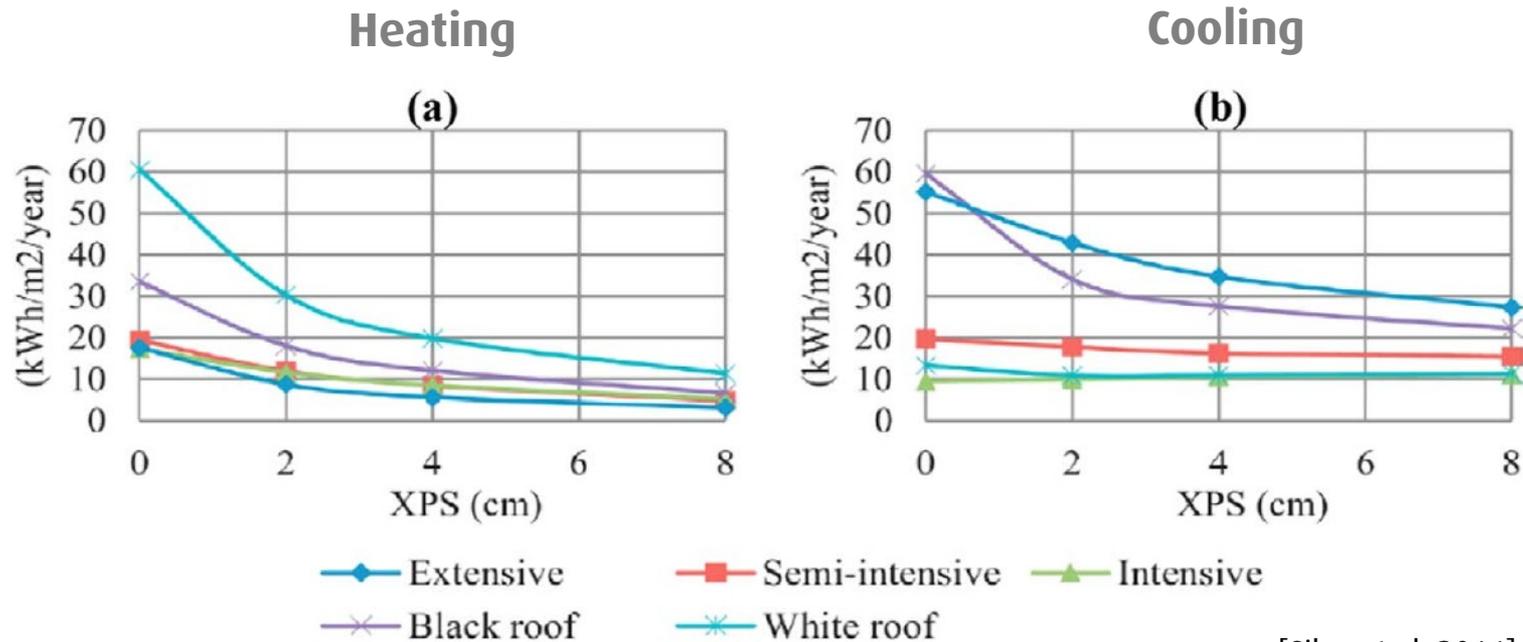
Mentens et al, Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? Landscape and urban planning, 77 (2006), pp217-226

Les cahiers du CSTC, 03/2006 – Cahier n°2

# Toitures végétalisées

## Demande énergétique (hiver – été)

Rafraîchissement du milieu urbain



[Silva et al, 2016]

XPS : Extruded PolyStyrene

silva et al, Green roofs energy performance in Mediterranean climate. Energy Build 2016;116:318-25.

# Toitures végétalisées

## Quelques chiffres

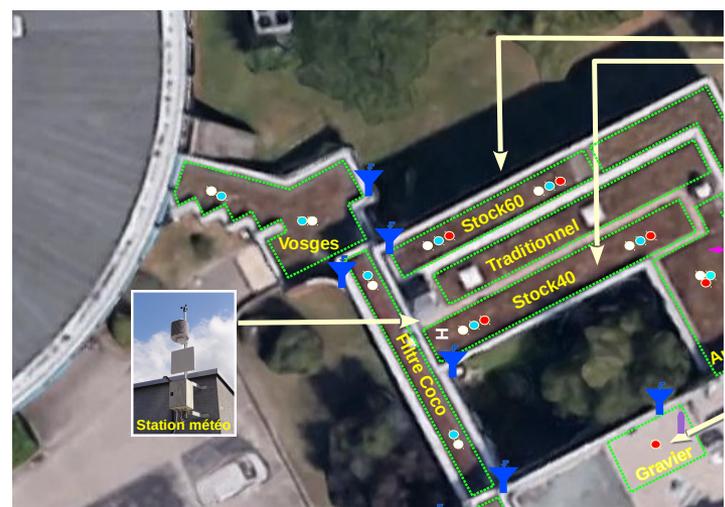
	LA VÉGÉTALISATION EXTENSIVE	LA VÉGÉTALISATION SEMI-INTENSIVE	LA VÉGÉTALISATION INTENSIVE
			
Aspect	Tapis végétal	Prairie avec relief végétal	Jardin
Types de végétalisation	Sedums, mousses, graminées	Sedums, vivaces, graminées	Herbacées, arbustes, arbres
Epaisseur du substrat	8 à 10 cm	10 à 30 cm	30 à 80 cm
Abattement minimal de l'eau de pluie	4 à 8 mm	8 à 22 mm	22 à 38 mm
Charge supplémentaire	30 à 150 kg/m <sup>2</sup>	150 à 350 kg/m <sup>2</sup>	Supérieure à 800 kg/m <sup>2</sup>
Pente maximum	30° (58%)*	30° (58%)*	5%
Irrigation	Peu ou pas d'arrosage	Arrosage conseillé en été	Arrosage régulier indispensable au démarrage
Entretien	Faible (2 fois par an)	Limité (4 fois par an)	Régulier
Avantages	Adaptable à tout type de support		Meilleur impact phonique et thermique Intérêt pour la biodiversité
Accès	Non sauf entretien	Oui	Oui
Coût moyen	De 25 à 100 €/m <sup>2</sup>	De 100 à 200 €/m <sup>2</sup>	De 150 à 300 €/m <sup>2</sup>

Mairie de Paris : HABITÂT DURABLE - Édition n°1 - septembre 2014



Avec l'aimable autorisation de l'agence de l'eau Artois-Picardie

# Comment évaluer l'évapotranspiration ?



◆ Mesures :

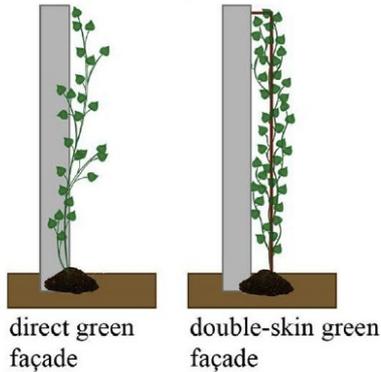
Sites d'étude

- ◆ Nantes (15 m<sup>2</sup>)
- ◆ Trappes (300 m<sup>2</sup>)
- ◆ Nancy (600 m<sup>2</sup>)

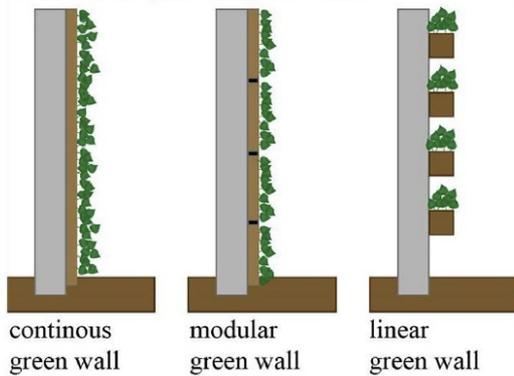
- **Hydriques** : teneur en eau, débit, pluviométrie, potentiel matriciel
- **Climatiques** : vitesse et direction du vent, flux solaire & IR, température de l'air, hydrométrie
- **Thermiques** : températures dans les couches

**30 % de l'énergie solaire reçue par une toiture végétalisée est convertie en rafraîchissement**

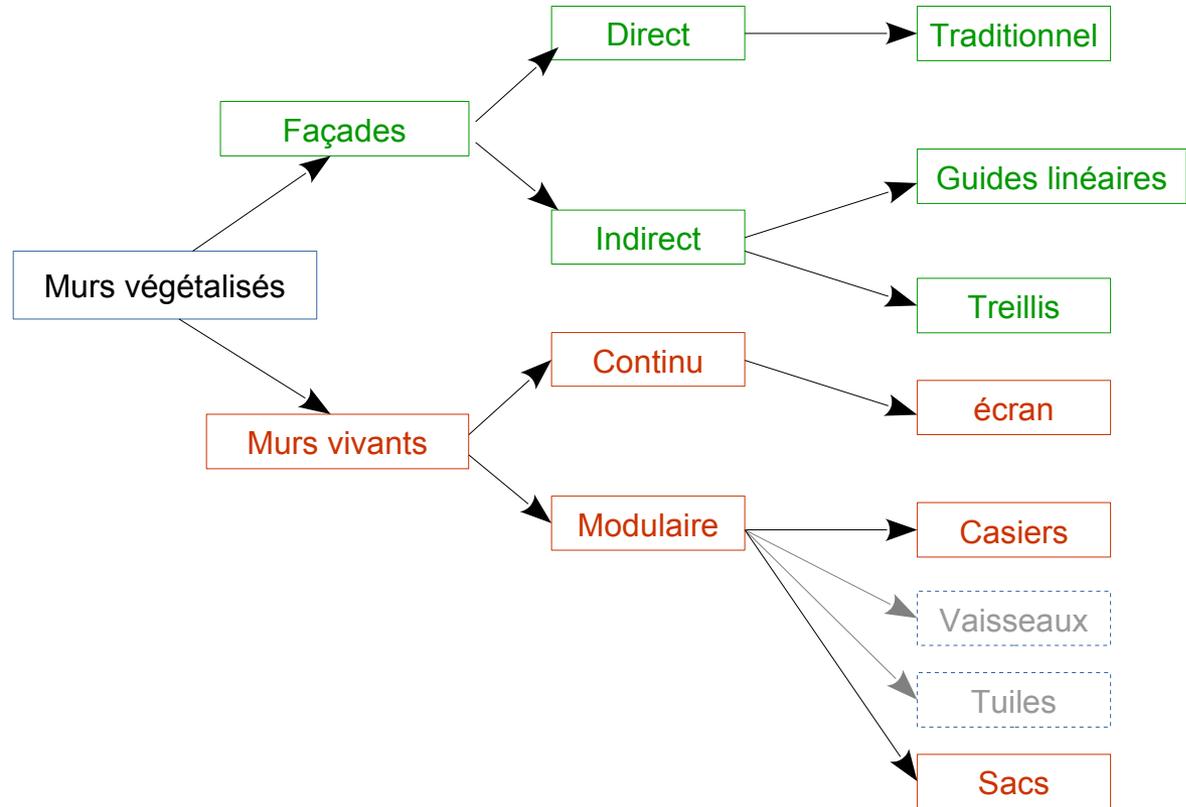
Ground based systems: green façades



Wall-based systems: green walls



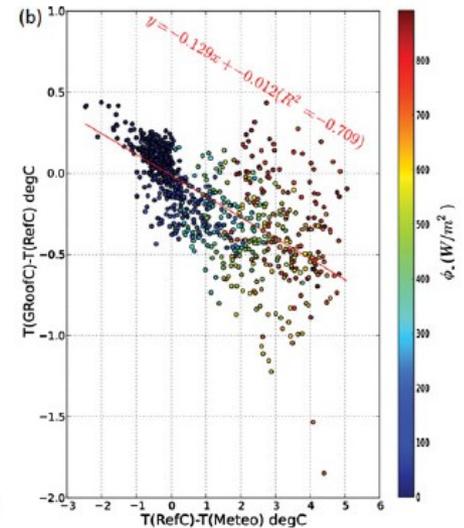
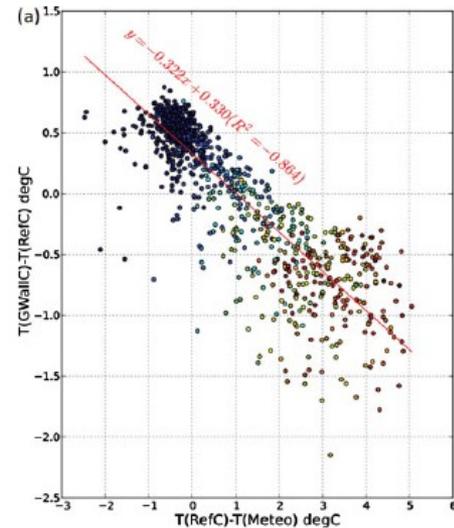
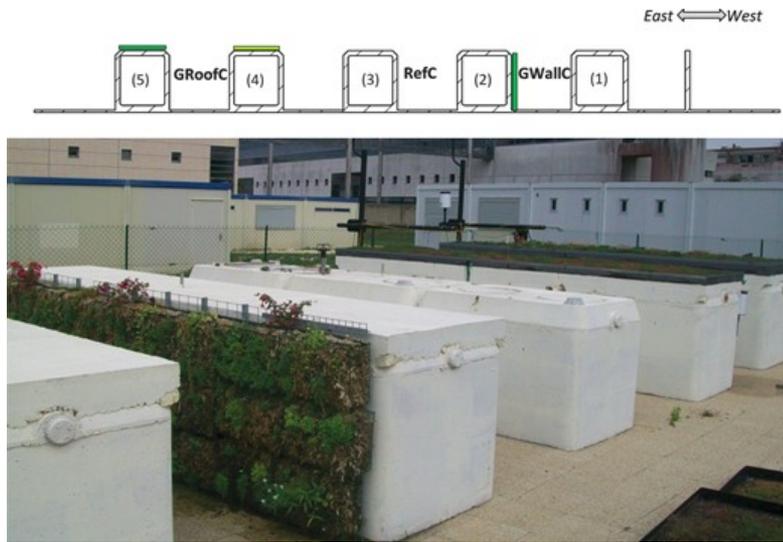
[Medl et al, 2017]



Adapté de [Besir et al, 2018]

Besir et al, 2018, Green roofs and facades : a comprehensive stpdy, Renewable and sustainable energy reviews, 82 (2018), pp915-939

Medl et al, 2017, Vertical greening systems – a review recent technoigiesand research advancement, Building and Environnement, 125 (2107), pp227-239



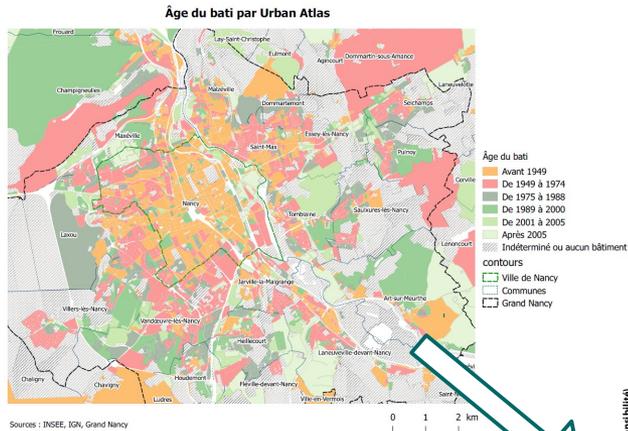
- Un mur végétal abaisse la température (rue) de 1°C pour 3°C de surchauffe
- Une toiture végétalisée abaisse la température de 1°C pour 8 °C de surchauffe.

Djedjig et al, 2015 *Experimental study of the urban microclimate mitigation potential of green roofs and green walls in street canyons*, International Journal of Low-Carbon Technologies, Volume 10, Issue 1, 1 March 2015, Pages 34–44, <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt019>

# Conclusion

- Les îlots de chaleurs urbains sont dus à la configuration urbaine et à l'activité anthropique
- Les aménagements végétaux rafraîchissent mais l'impact est très dépendant de la configuration urbaine
- Encore un manque cruel de connaissances transversales et sur le long terme
- Privilégier une démarche d'aménagement territoriale qui intègre d'autres enjeux et qui fait appel aux services éco-systémiques (GEP, continuité écologique, lutte contre les ICU, etc.)

## Vulnérabilité du bâti



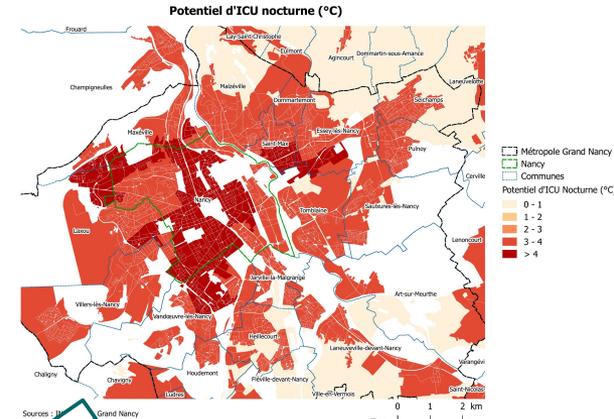
Classes de bâtiments

### Matrice de vulnérabilité

Exposition à l'ICU (ou Alea)  
Critère = Indicateur "potentiel d'ICU nocturne"

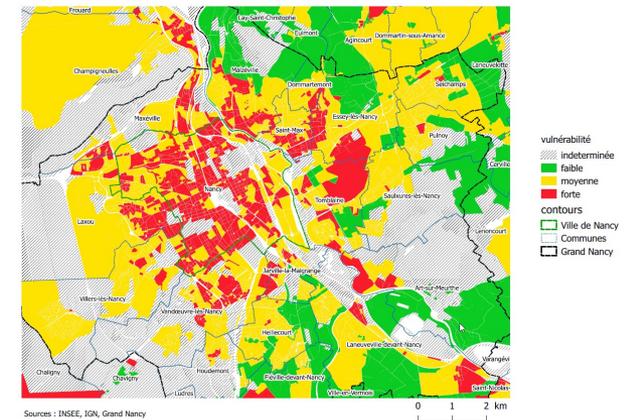
Classes	Seuils	Classes				
		1	2	3	4	5
1	>2000	0 - 1°	1 - 2°	2 - 3°	3 - 4°	>=4°
2	1989-2000					
3	1975-1988					
4	1950-1974					
5	<= 1949					

VULNERABILITE → Faible Moyenne Forte

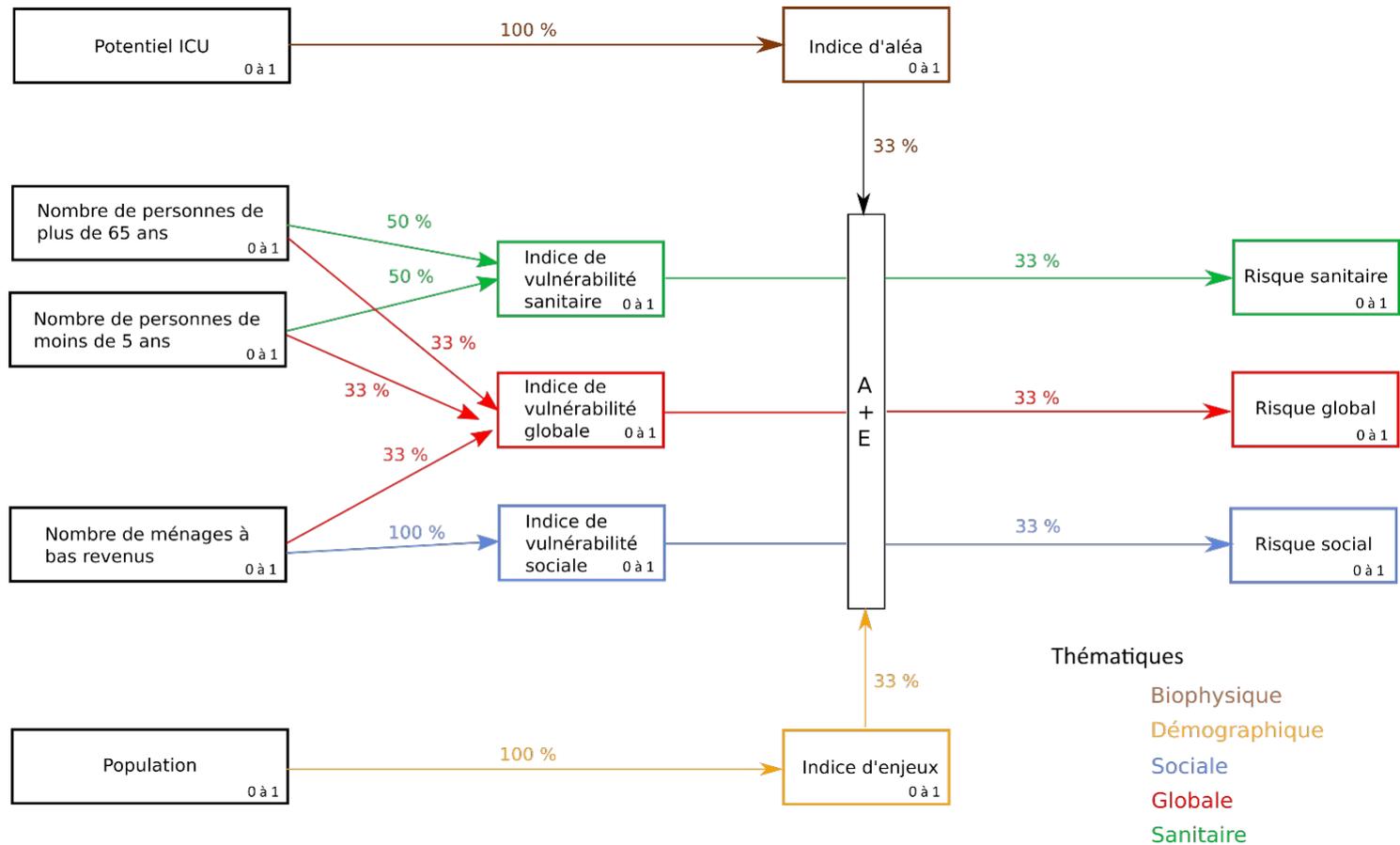


Carte climatique

### Vulnérabilité des bâtiments

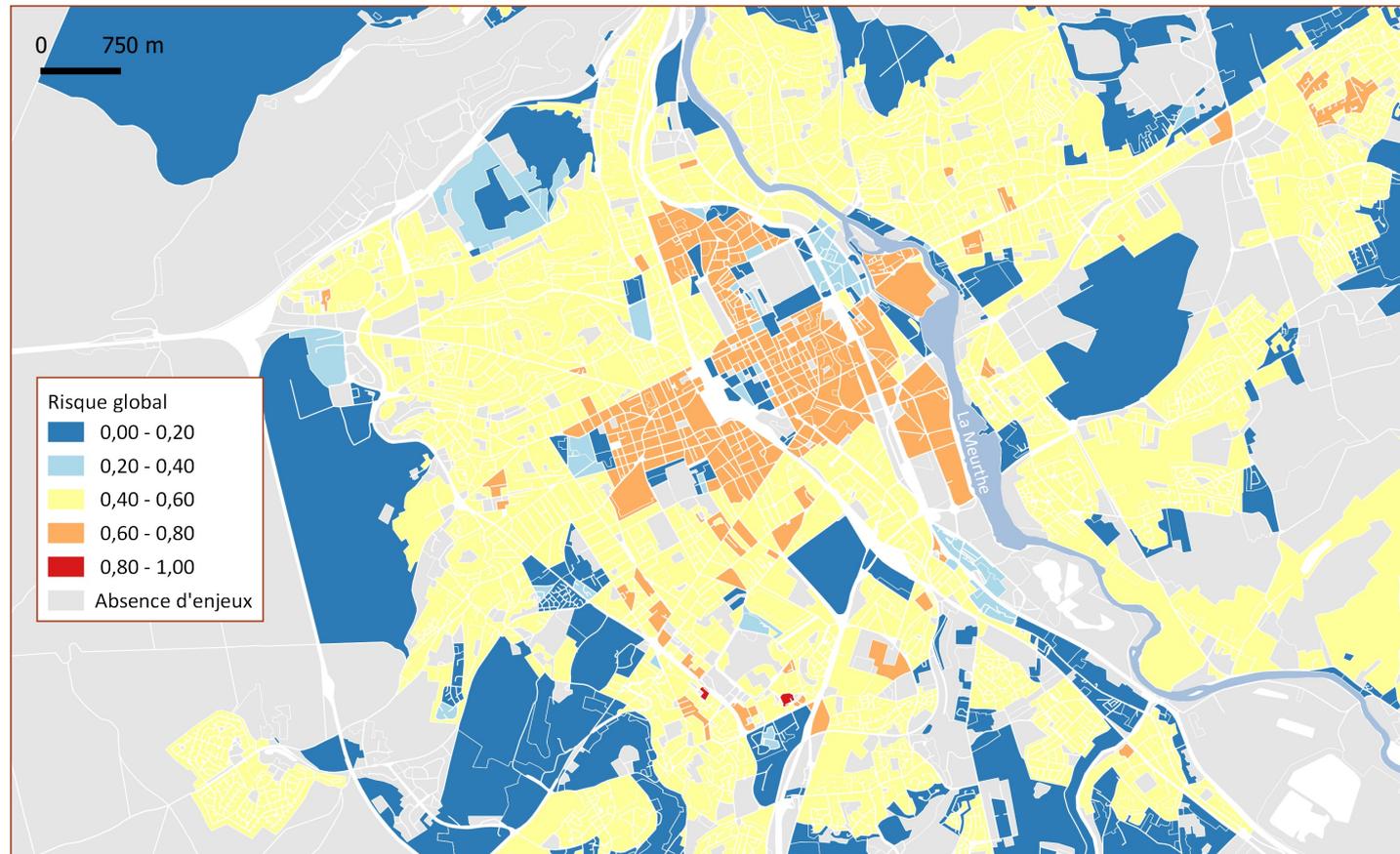


## Vulnérabilité sanitaire et sociale



## Vulnérabilité sanitaire et sociale

Indicateur de risque climatique global pour le Grand Nancy



Source : CEREMA, INSEE, Urban Atlas, Contributeurs OpenStreetMap

# Merci pour votre attention

**Rémy Claverie**

Laboratoire de Nancy

TEAM / ERTD | Nature en Ville et Adaptation au Changement Climatique  
+33(0)6 37 47 33 44 | [remy.claverie@cerema.fr](mailto:remy.claverie@cerema.fr)



[www.cerema.fr](http://www.cerema.fr)

Siège social : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92803 69674 Bron Cedex / Tél : +33 (0)4 72 14 30 30