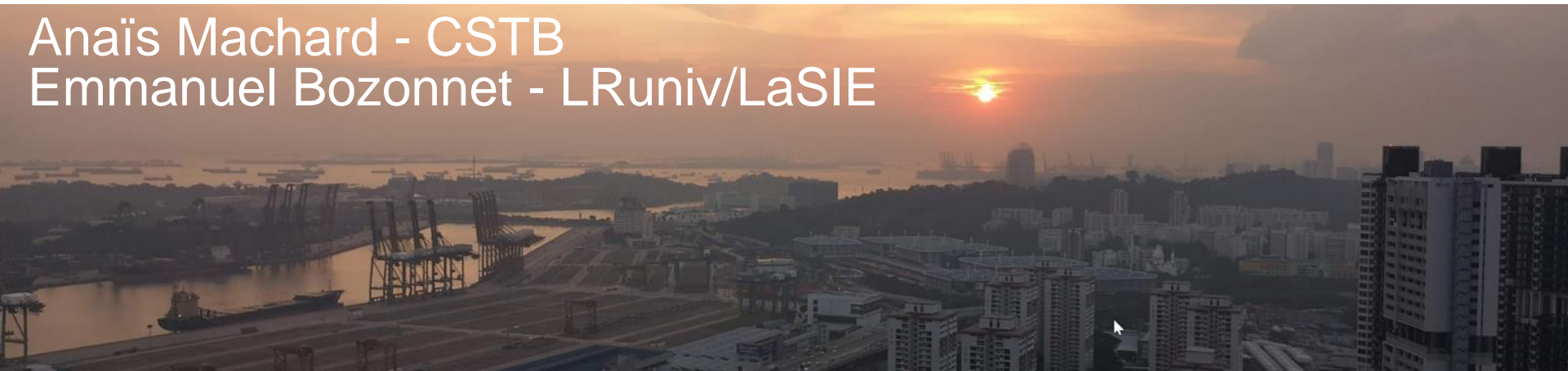


# Séquences Climatiques Pour L'évaluation De La Résilience Urbaine Ou Future Des Stratégies De Rafraîchissement

Anaïs Machard - CSTB  
Emmanuel Bozonnet - LRuniv/LaSIE



# Exposition au climat & adaptations

Impacts aux différentes échelles



**Scale**

Regional

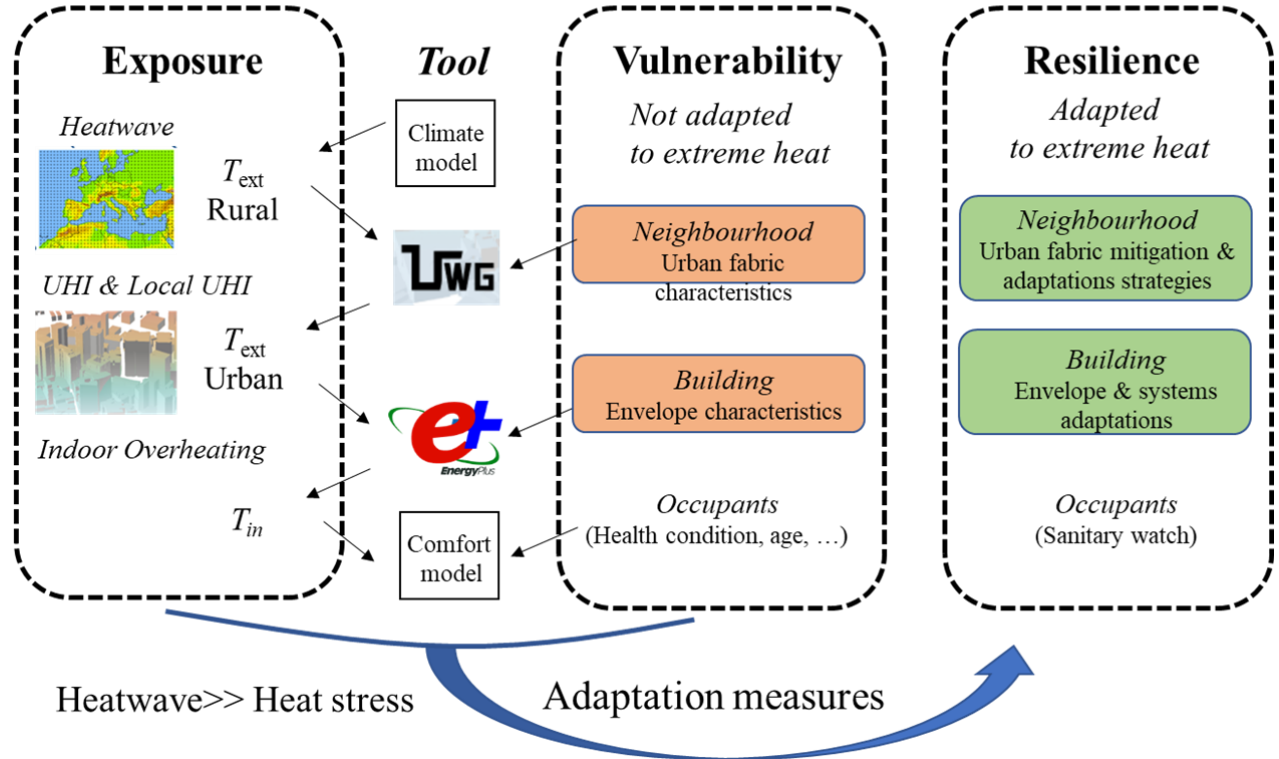


Mesoscale

Local  
microclimate



Building



# Facteurs d'exposition au différentes échelles et solutions



## I. Échelle globale

Canicules futures et construction de fichiers météo type



## II. Échelle quartier

Îlots de chaleur vs. surchauffes locales



## III. Échelle bâtiment

Critères d'évaluation et efficacité de rafraîchissement



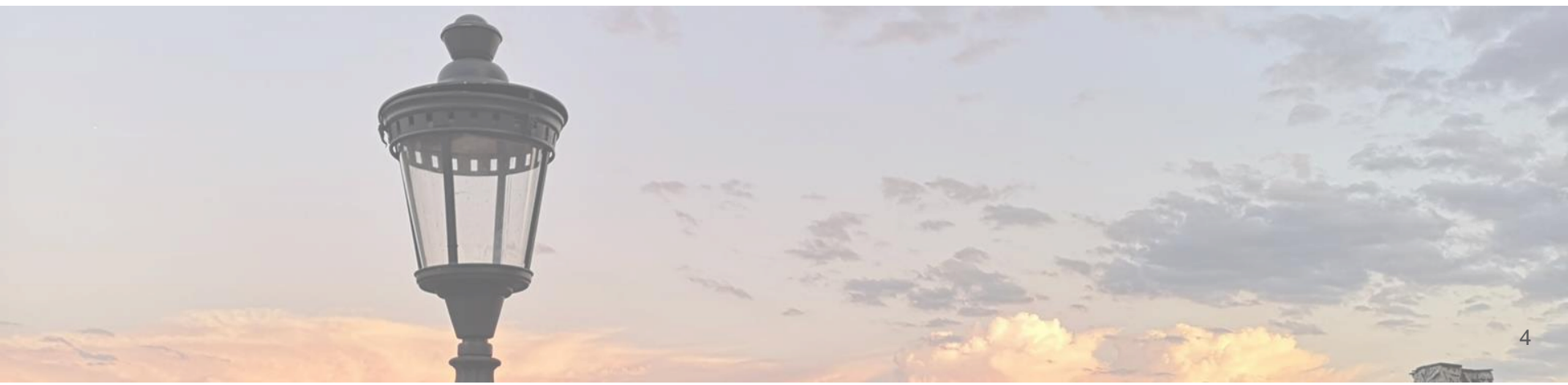
## IV. Adaptation

Des solutions techniques de rafraîchissement aux différentes échelles



# I. Échelle globale

## Canicules futures et construction de fichiers météo type





# Les années types de référence

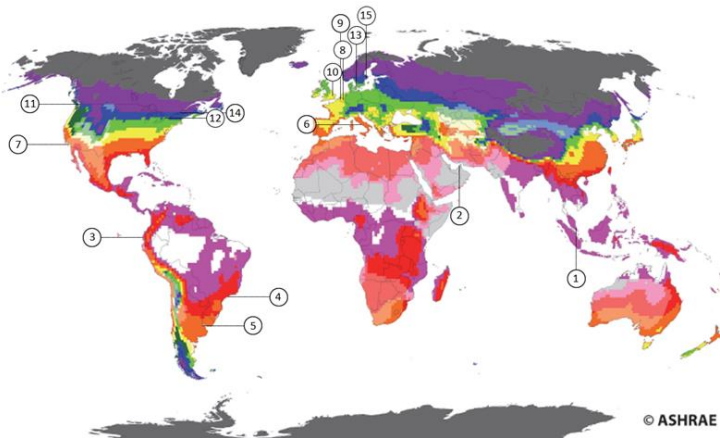
→ **zones climatiques pour le bâtiment ex: ASHRAE**

**Augmentation de la Température moyenne annuelle**

Année type 30 ans de données météo

Pas les canicules actuelles

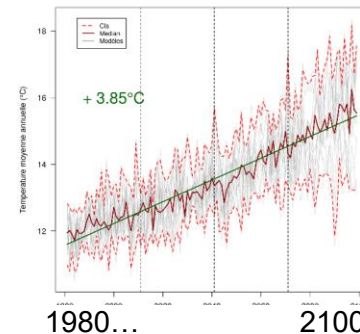
CZ	Description
0A	Extremely Hot Humid
0B	Extremely Hot Dry
1A	Very Hot Humid
1B	Very Hot Dry
2A	Hot Humid
2B	Hot Dry
3A	Warm Humid
3B	Warm Dry
3C	Warm Marine
4A	Mixed Humid
4B	Mixed Dry
4C	Mixed Marine
5A	Cold Humid
5B	Cold Dry
5C	Cool Marine
6A	Cold Humid
6B	Cold Dry



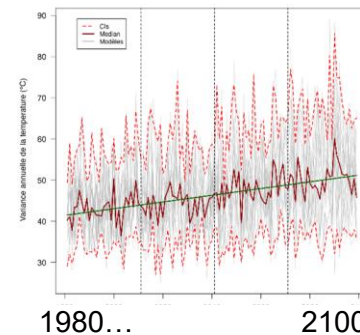
1. Singapore
2. Abu Dhabi
3. Guayaquil
4. Sao Paulo
5. Buenos Aires
6. Rome
7. Los Angeles
8. Brussels
9. Ghent
10. London
11. Vancouver
12. Toronto
13. Copenhagen
14. Montreal
15. Stockholm

© ASHRAE

ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 169-2013, Climatic Data for Building Design. (ASHRAE, 2013)



**Augmentation de la Variance annuelle de la température**



**Réchauffement climatique + augmentation de la variance**



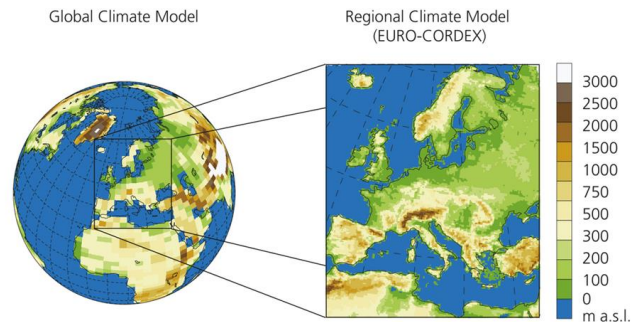
# Source des données climatiques prospectives

- GCM = Modèle de Climat Global (100 km, 1 mois)
  - Résolution non adaptée à la thermique du bâtiment
- ⇒ Descente d'échelle spatiale et temporelle nécessaire

## **Descente d'échelle statistique (type morphing) ou générateur stochastique**

- + Fichiers météo prêts à l'emploi (EPW) : années types (Meteonorm, WeatherShift, ClimateChangeWordWeatherGenerator)
- + Pas de temps horaire
- + Pas besoin de stockage
- Pas représentatif de vagues de chaleur
- Peu d'information sur la prise en compte des incertitudes

→ Utilisé par les concepteurs de bâtiments



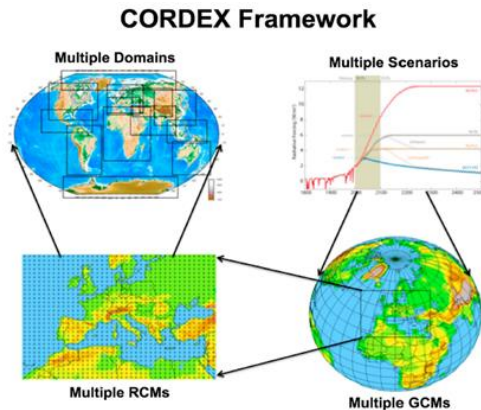
## **Descente d'échelle dynamique (GCM → RCM)**

- Les fichiers météo futurs doivent être assemblés, à partir de données avec des projections sur plusieurs décennies consécutives DRIAS (France), CORDEX (international)
- Pas de temps journalier, 3-horaire ou horaire
  - Données format NETCDF4 à stocker
- + Représentation des vagues de chaleur
- + Plusieurs modèles de climat et de scénarios RCP

→ Utilisé par les climatologues mais peu par les concepteurs



# Méthodologie développée pour l'assemblage des fichiers météo prospectifs avec canicules



1/ Téléchargement et extraction des données  
2/ Interpolation des données → 1H

30 years *non-bias adjusted* hourly climate outputs  
1990-2019  
2040-2069

1bis/ Collecte d'observations horaires pluriannuelles

10 years of hourly observations (2010-2019)

3/ Correction du biais

30 years *bias adjusted* hourly climate outputs  
1990-2019  
2041-2069

4/ Calcul des rayonnements direct & diffus

30 years *bias adjusted* hourly climate outputs  
With all necessary weather variables to re-assemble a weather file for building simulations

5/ Années types (TMY)

*Typical years*  
1990-2019  
2041-2069

6/ Vagues de chaleurs (HW)

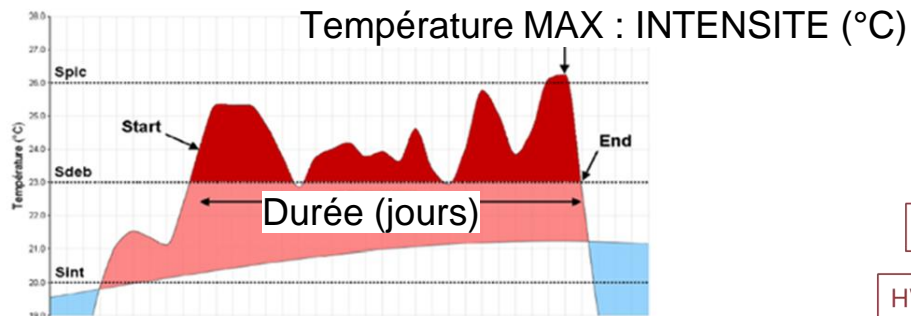
*Heatwaves*  
1990-2019  
2041-2069

7/ Sélection des séquences

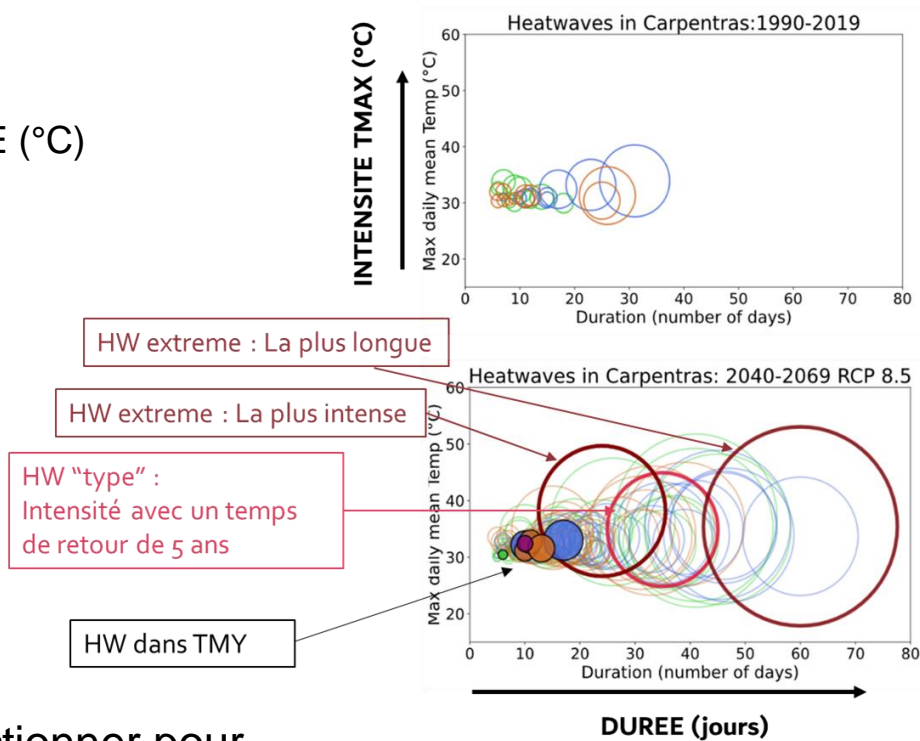
Building thermal simulation



# Sélection de vagues de chaleur futures dans les projections de températures pluriannuelles



G. Ouzeau, J-M. Soubeyroux, M. Schneider, R. Vautard, & S. Planton, Heat waves analysis over France in present and future climate: Application of a new method on the EURO-CORDEX ensemble. *Climate Services* 4, 1–12 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2016.09.002>

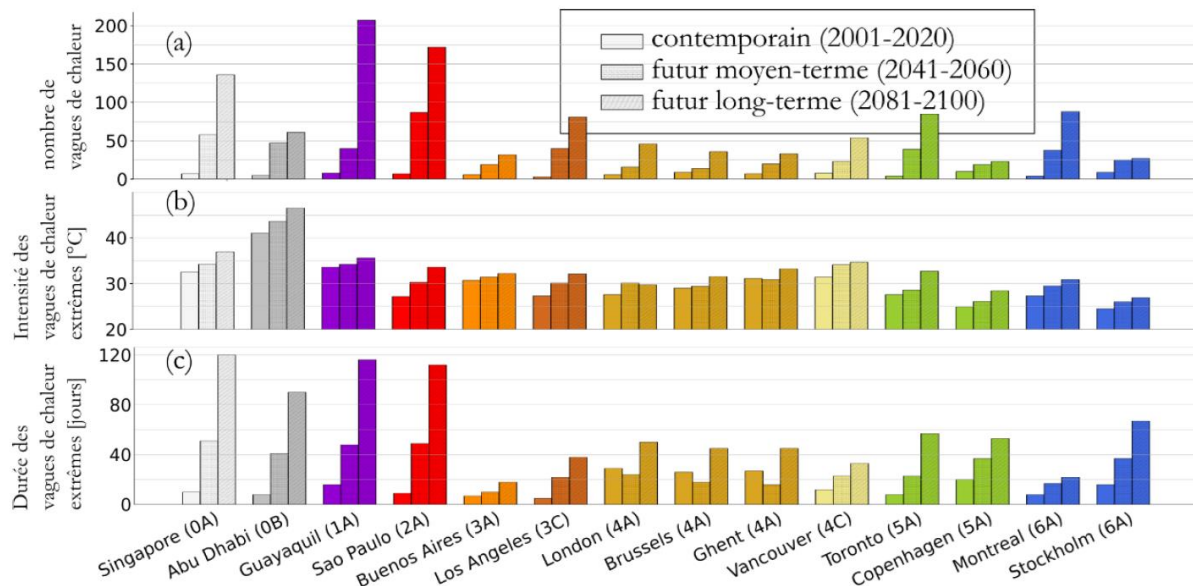
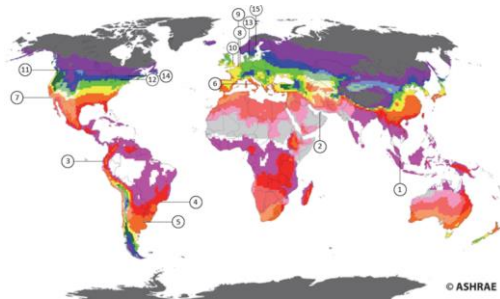


Quelle HW sélectionner pour la conception du bâti ?





# Fichiers météo canicules futures extrêmes pour toutes les zones climatiques (Annexe 80 “Resilient Cooling for Buildings”)



A. Machard, E. Bozonnet, A. Salvati, M. Pourabdollahtookaboni, et A. Gaur. « Fichiers météorologiques de vagues de chaleur futures pour évaluer la résilience thermique des bâtiments au changement climatique ». *Colloque AIC Juillet 2022*

⇒ Fichiers météo disponibles sur la plateforme de l'Annexe80 <https://annex80.iea-ebc.org/weather-data> ainsi que via un papier Data



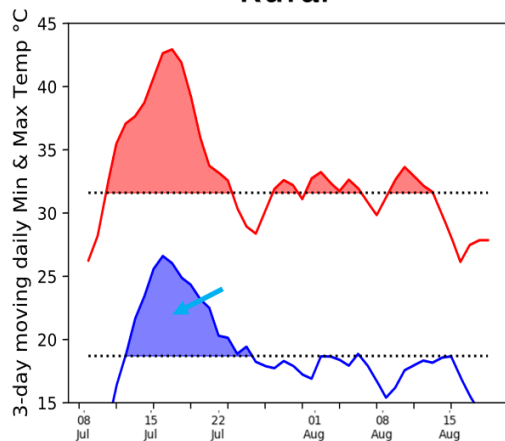
# Canicule future extrême intense avec ICU à Paris

→ Surchauffe échelle quartier

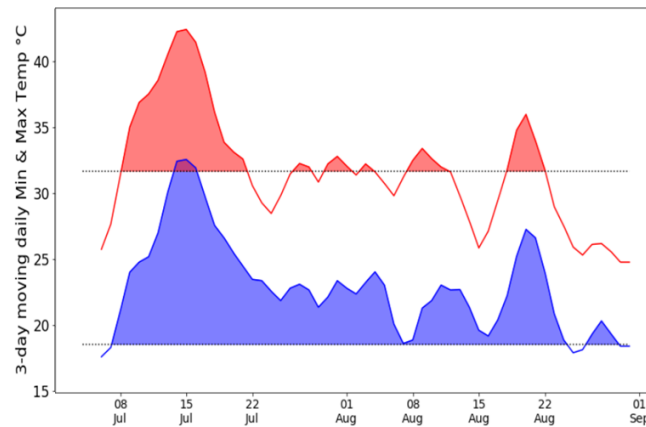
Éco-quartier les Batignolles à Paris



Rural



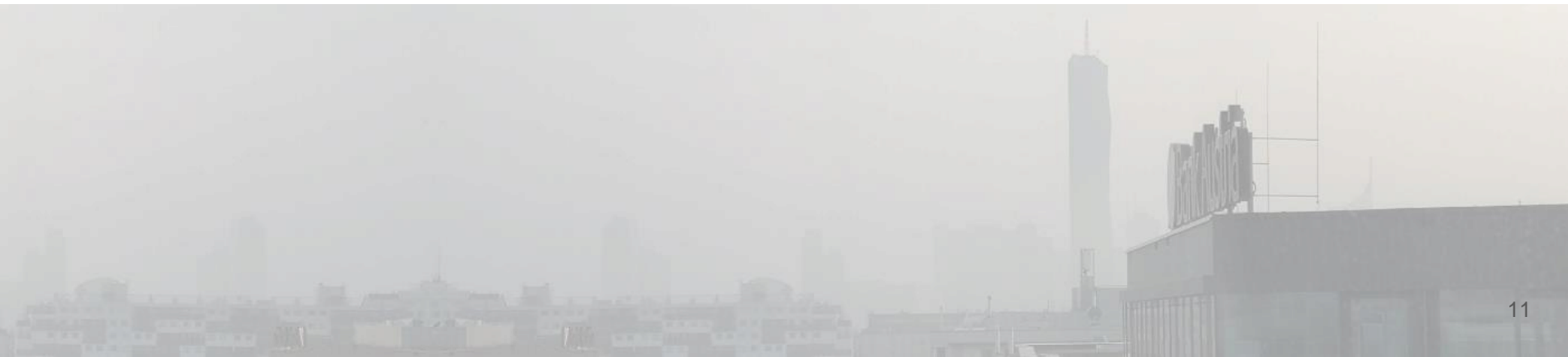
Urban





## II. Échelle quartier

### Îlots de chaleur vs. surchauffes locales



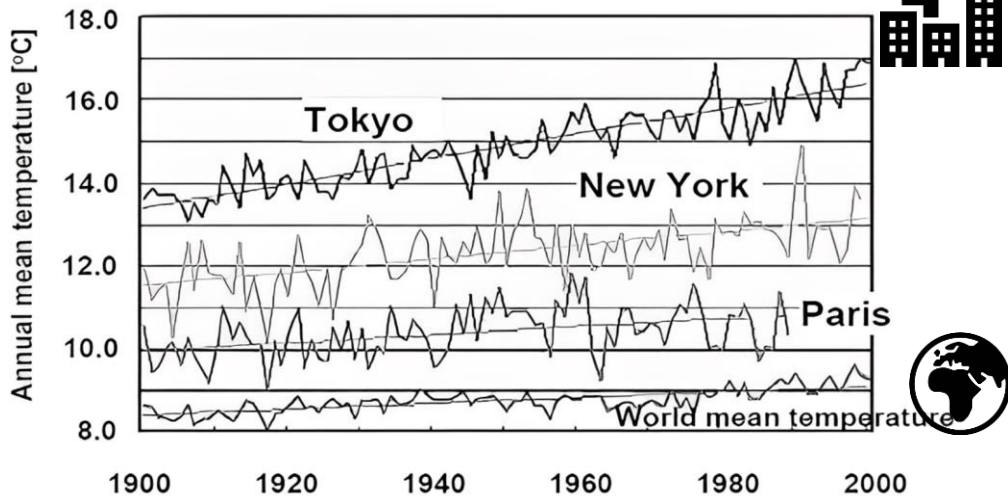


# Îlot de chaleur urbain réchauffement global vs. urbain

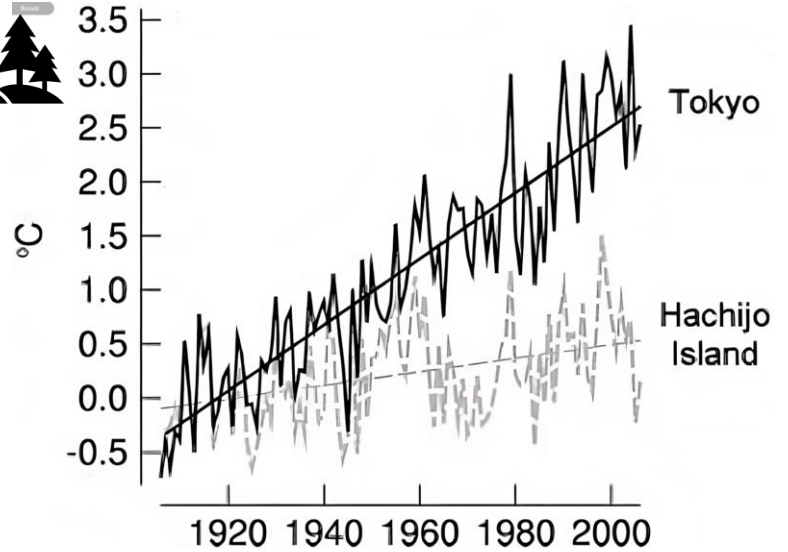
## Réchauffement global

Augmentation des températures urbaines

Tokyo +4°C  
New-York +2,2°C  
Paris +1°C



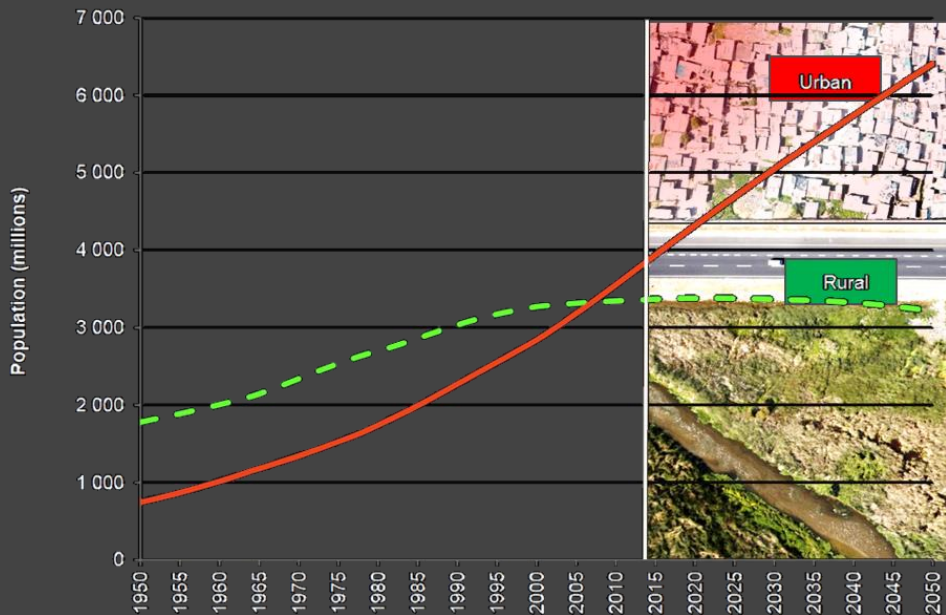
## Évolution urbain vs. rural



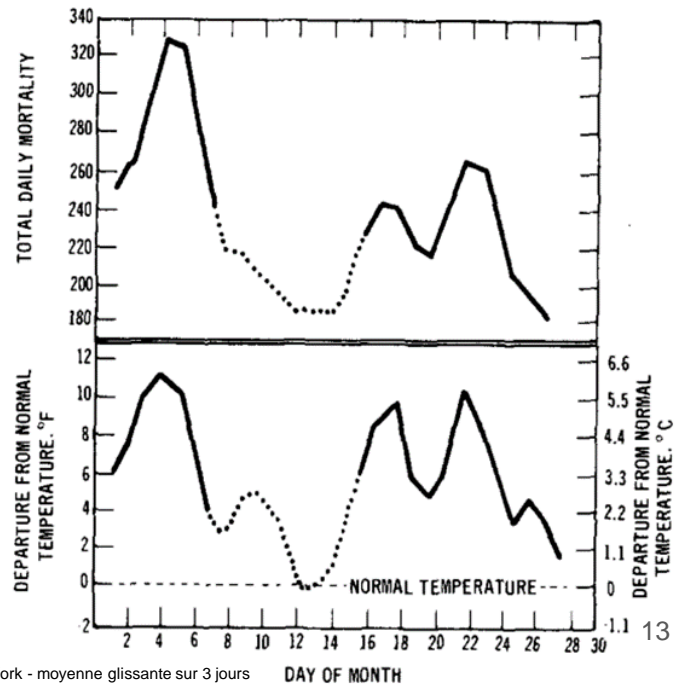


# Îlot de chaleur urbain et “stress thermique”

## Évolution rural vs. urbain



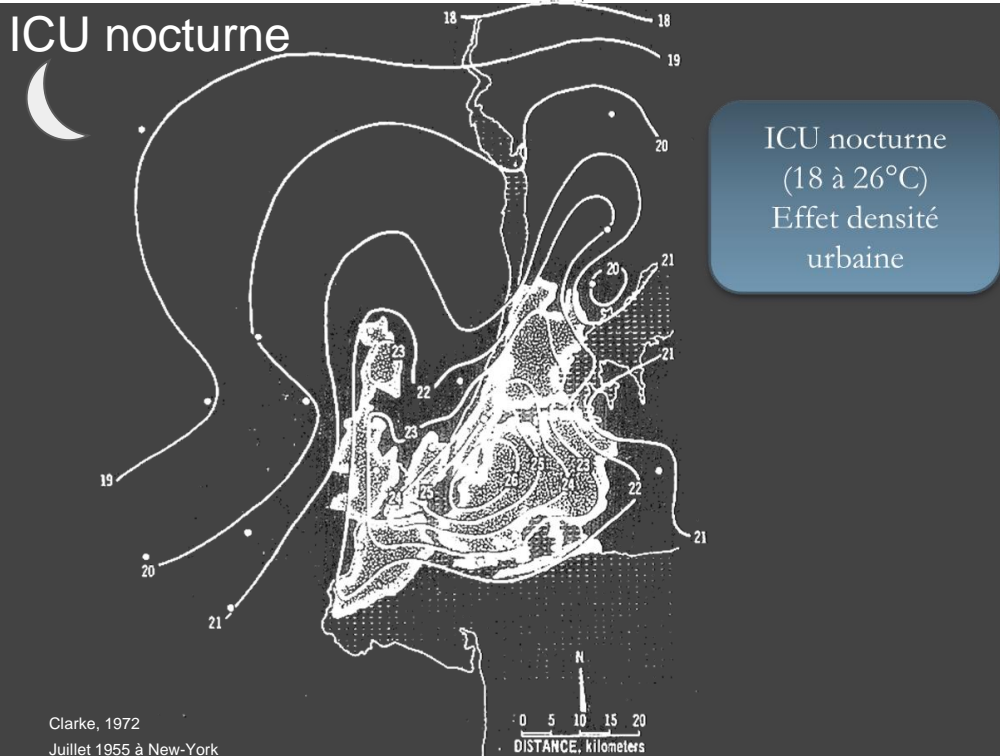
## Population urbaine et effets sanitaires





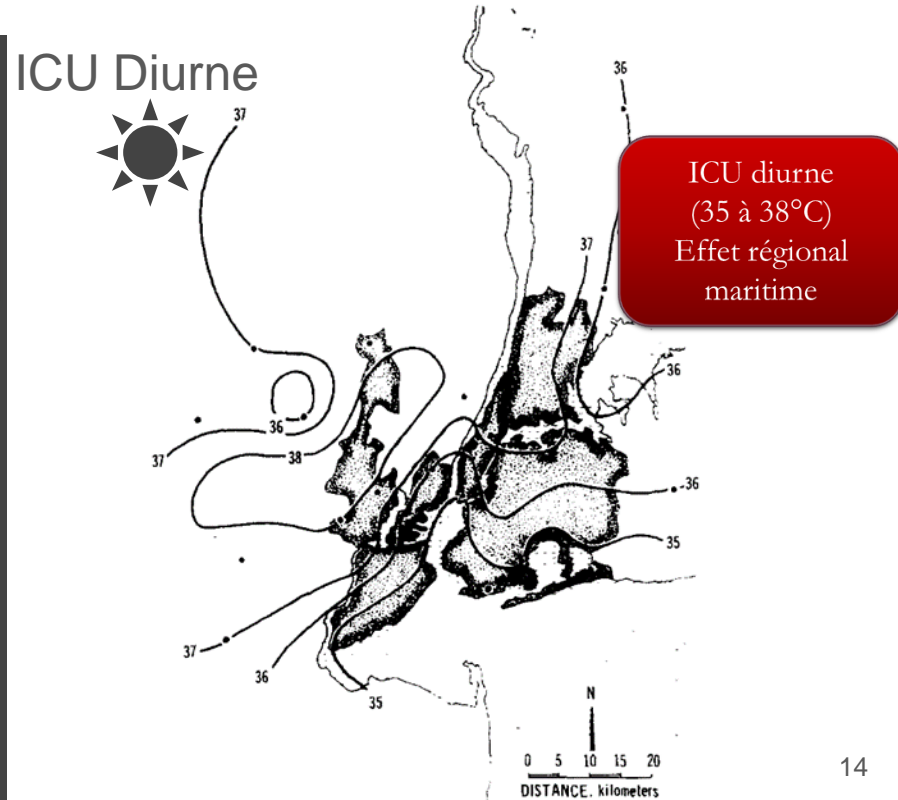
# Îlot de chaleur urbain – échelle de la ville

ICU nocturne



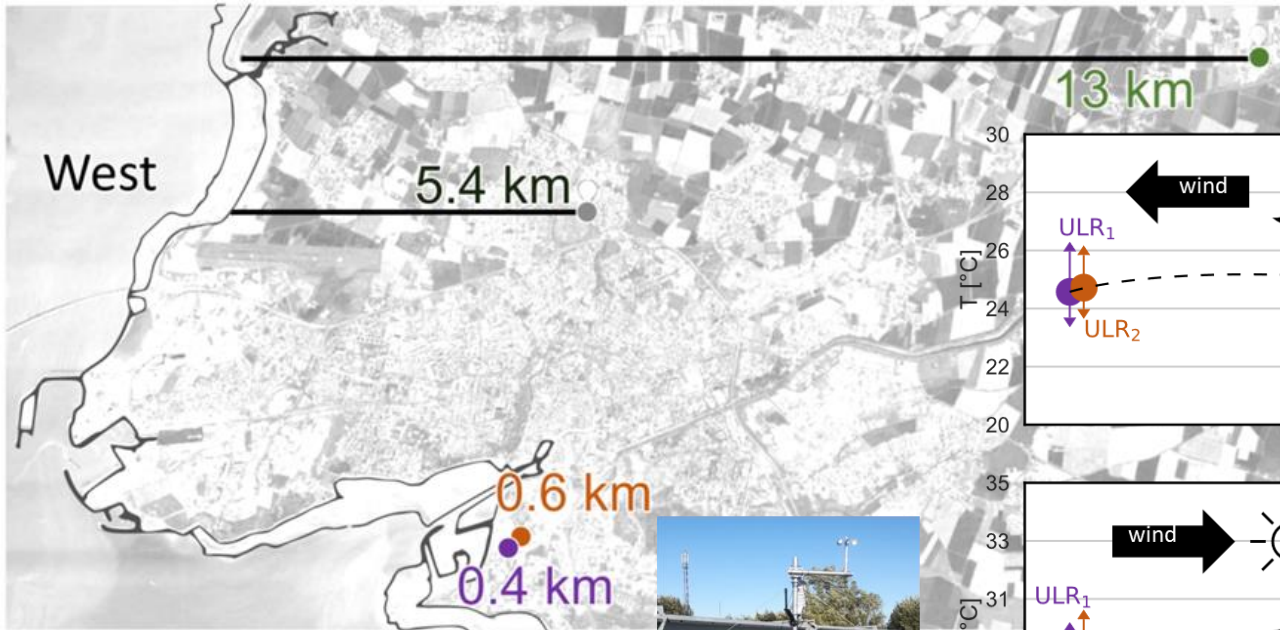
Clarke, 1972  
Juillet 1955 à New-York

ICU Diurne

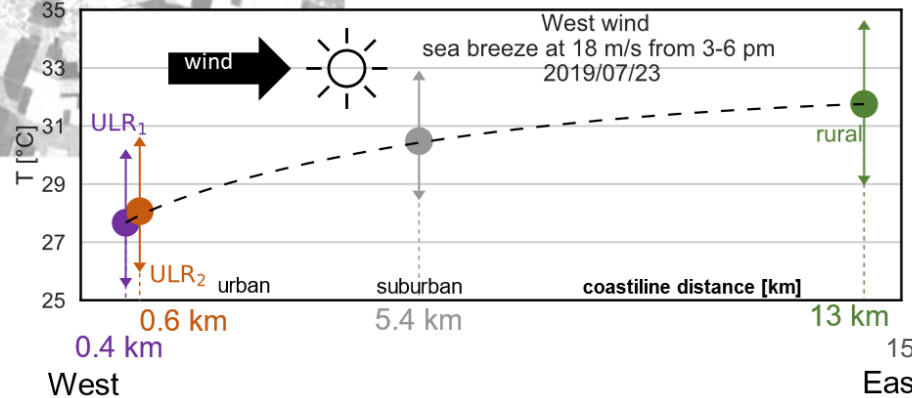
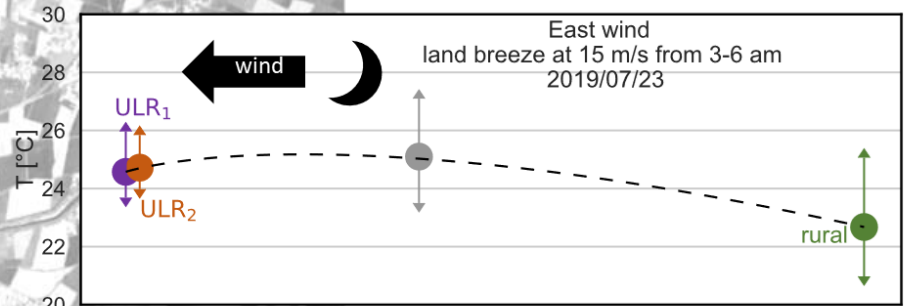




# Îlot de chaleur urbain – effets de côte

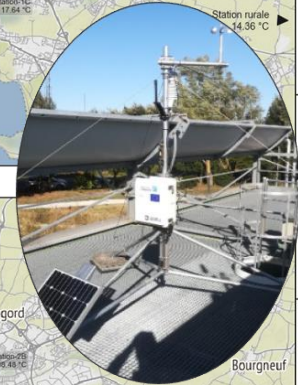
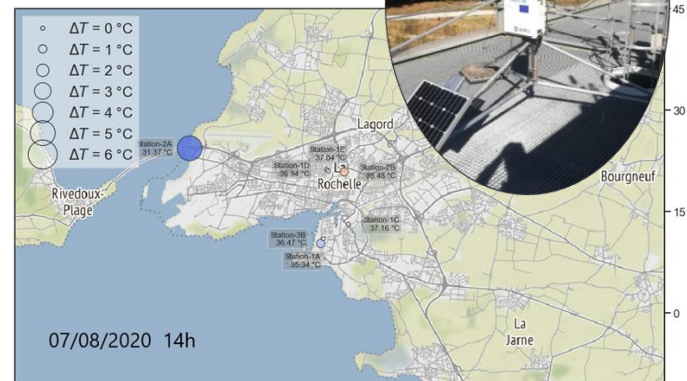
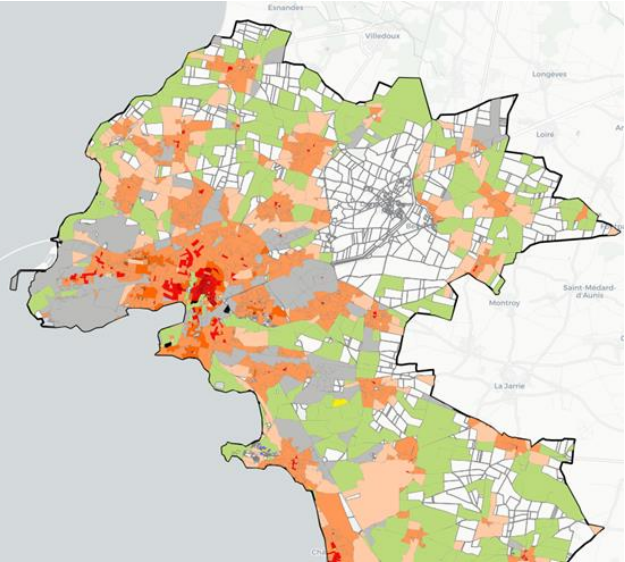
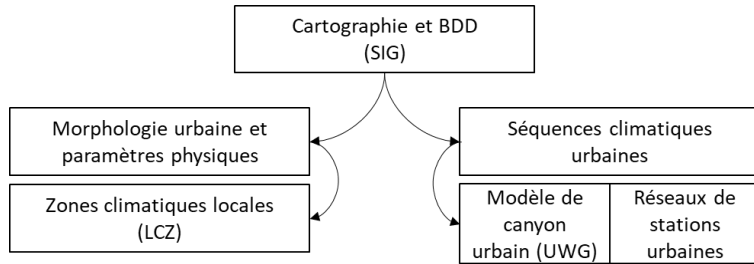


Martinez, S., A. Machard, A. Pellegrino, K. Touili, L. Servant, et E. Bozonnet. « A Practical Approach to the Evaluation of Local Urban Overheating– A Coastal City Case-Study ». *Energy and Buildings* 253 (15 décembre 2021): 111522. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111522>.





# Îlot de chaleur urbain – cartographies







# Îlot de chaleur urbain – indicateurs de stress thermique

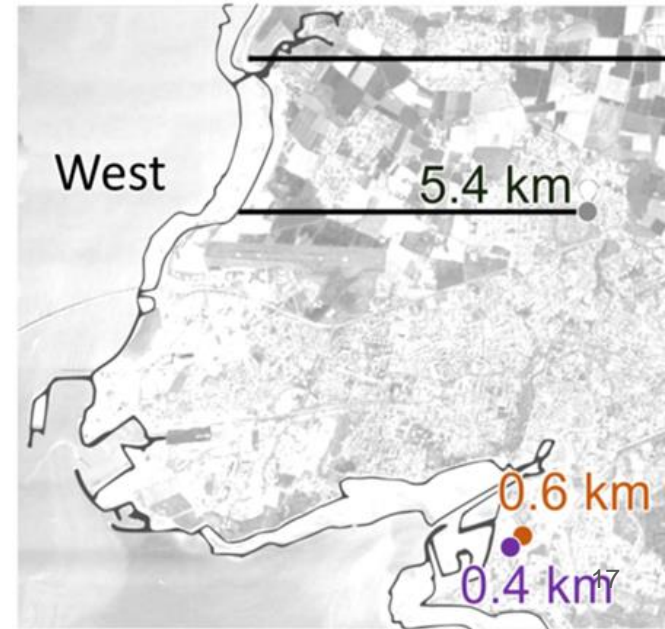
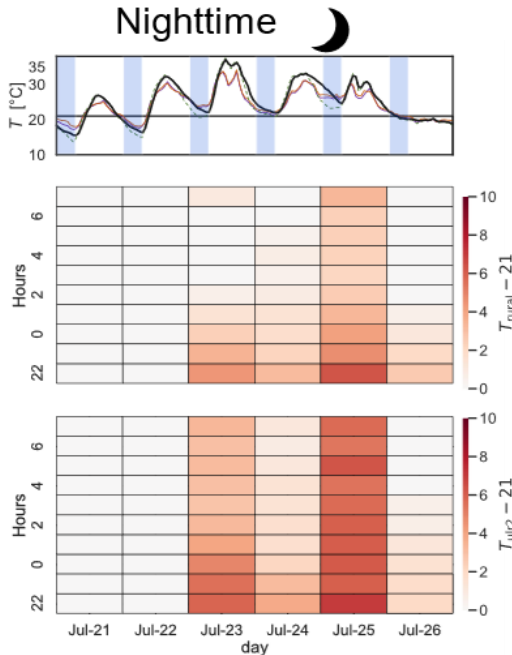
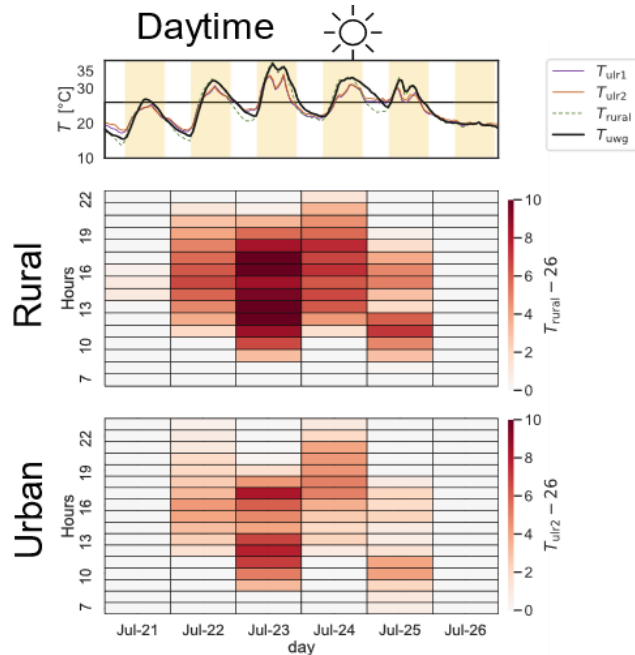
Intensité d'ICU [°Ch]

$$UHI_{exp} = \sum_{t=0}^{n\Delta t} (T_{urb,t} - T_{rur,t})_{T_{urb,t} > T_{rur,t}} \times \Delta t$$

Intégration des surchauffes [°Ch]

$$OH_{exp} = \sum_{t=0}^{n\Delta t} (T_{urb,t} - T_{overheat})_{T_{urb,t} > T_{overheat}} \times \Delta t$$

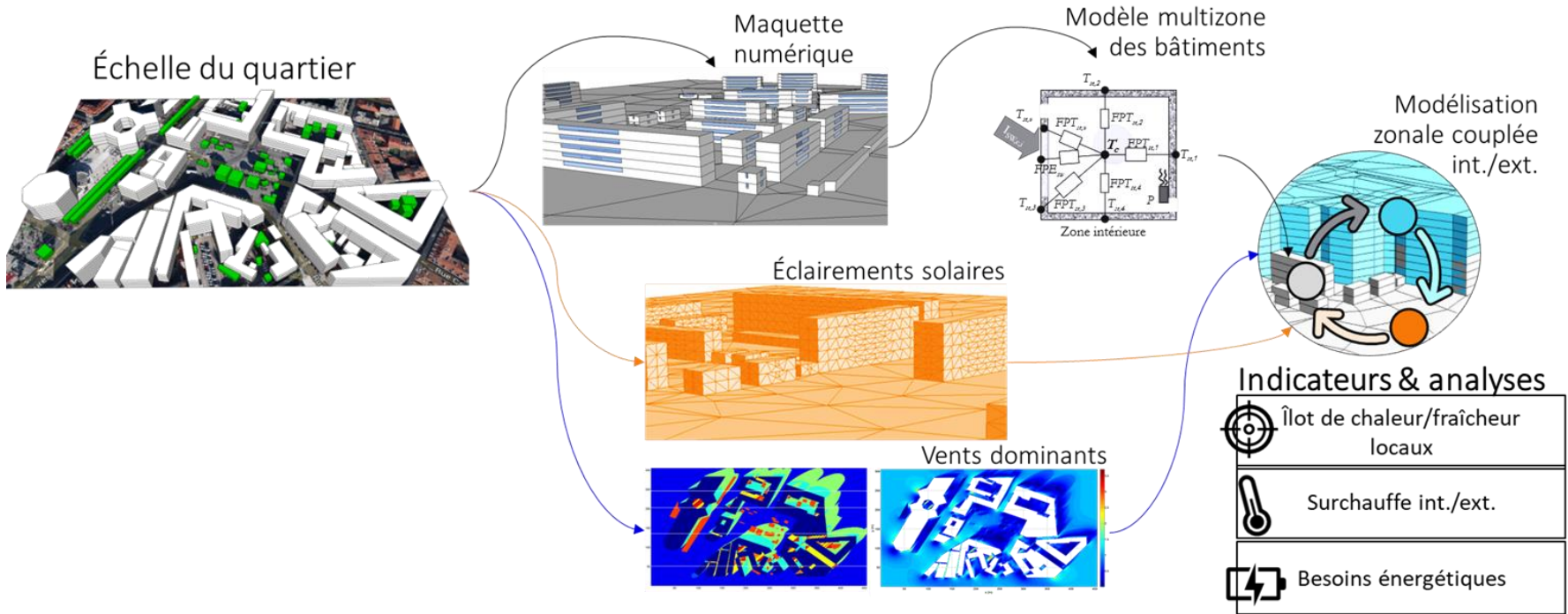
		ULR <sub>1</sub>	ULR <sub>2</sub>	rural
UHI <sub>exp</sub> [°C.h]	Day	20	25	-
	Night	153	213	-
OH <sub>exp</sub> [°C.h]	Day	133	140	249
	Night	107	126	64





# Îlot de chaleur urbain – interactions à échelle bâtiment/rue

Approche de modélisation détaillée – bâtiments multizones





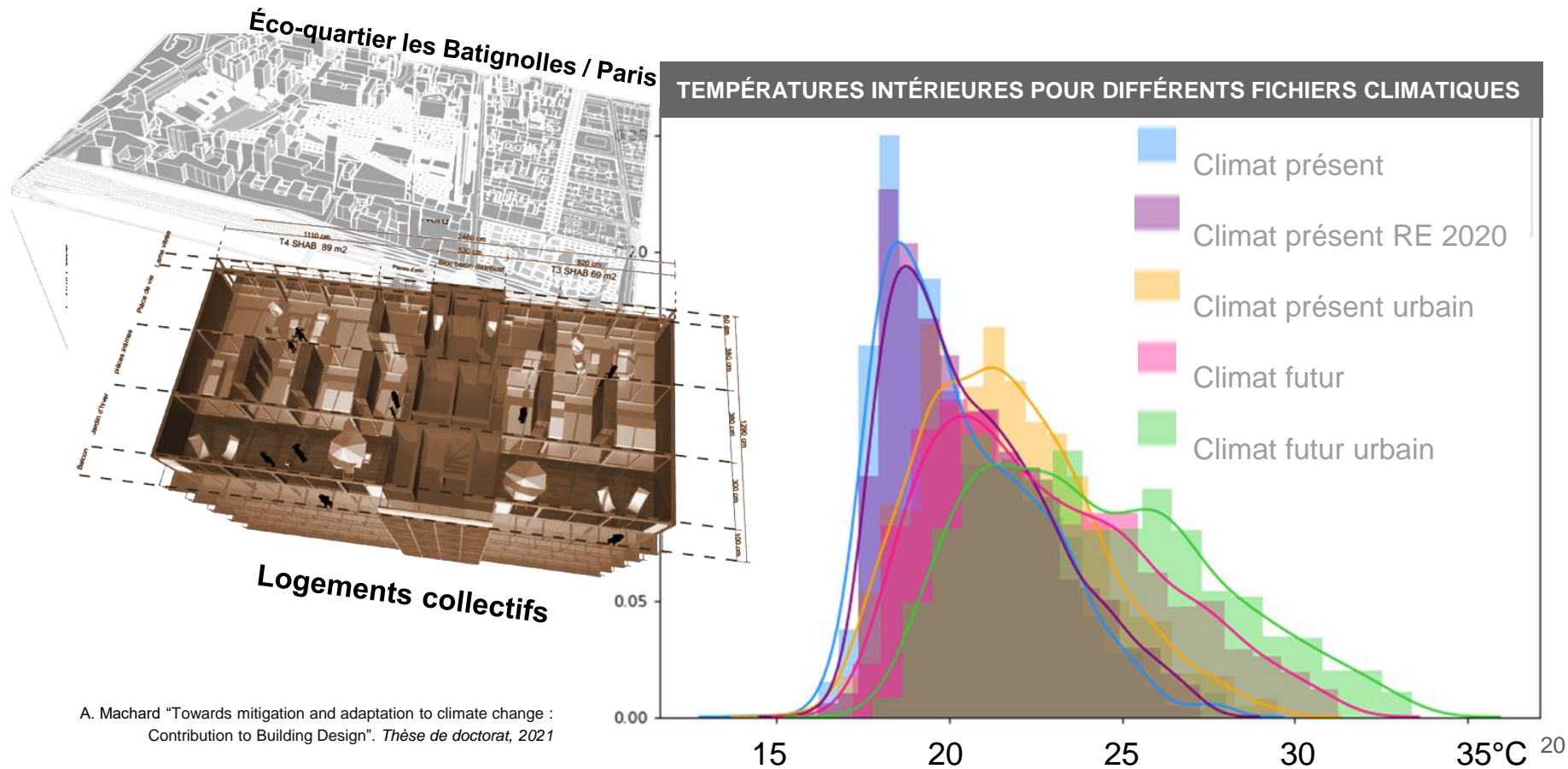
# III. Échelle bâtiment

## Critères d'évaluation & efficacité de rafraîchissement





# Surchauffe du bâtiment pour différentes météo prospectives



# Indicateurs usuels pour l'évaluation des stratégies de rafraîchissement intérieur



## Thermal comfort

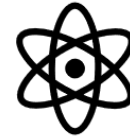
hours of exceedance (of  $T_{op,max}$ ,  $PMV_{max}$ ,  $SET_{max}$ ,  $PHS_{max}$ )  
IOD / AWD

$T_{op}$ ,  $PMV$ ,  $SET$ ,  $PHS$

$T_{air}$ ,  $T_{rad}$ ,  $rH$ ,  $x$ ,  $met$ ,  $clo$ , body dehydration rate, body core temperature

$$IOD = \frac{\sum_{i=1}^{N_{occ}} (T_{op,i} - 26) \Delta t}{\sum_{i=1}^{N_{occ}} \Delta t_i}$$

$$AWD = \frac{\sum_{i=1}^{N_{occ}} (T_{o,i} - T_b) \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{N_{occ}} \Delta t_i}$$



## Building energy & environment

annual cooling load intensity [ $kWh/(m^2GFA.a)$ ]  
annual cooling site energy use intensity [ $kWh/(m^2GFA.a)$ ]  
peak cooling site power demand [ $W/(m^2NFA.a)$ ]  
SCOP, SEER

source/site/net energy use,  
site/net power demand,  
COP/EER,  $CO_2equ$

$T_x$ ,  $m$ ,  $cp$ ,  $\rho$ ,  $p$ , ...



# Comment évaluer la résilience du bâtiment à la surchauffe ?

Approche risque, travaux de l'Annexe 80 « Resilient Cooling for Buildings »

**Choc 1** : Vague de chaleur

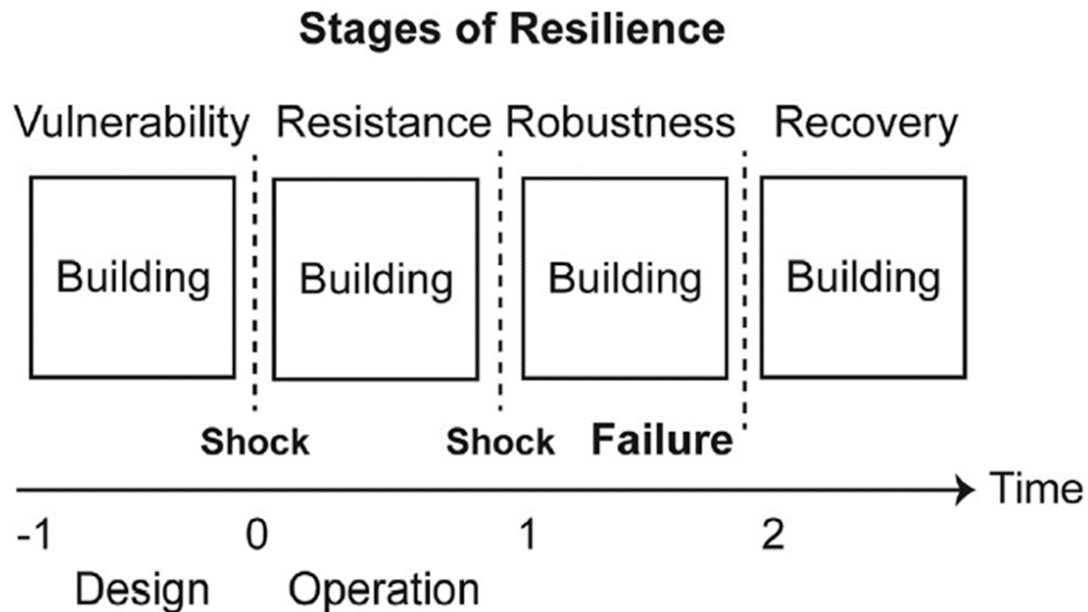
(future extrême, intense ou longue, ou les 2)

**Choc 2** : Coupure de réseau

**Choc 1 + Choc 2** :

Vague de chaleur

+ coupure de réseau

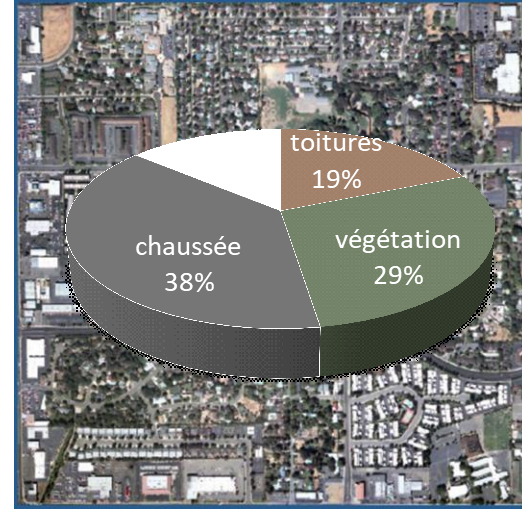


Tester les stratégies de rafraîchissement/climatisation

-> non pas avec des scénarios “moyens”, mais avec des “états limites”



## IV. Des solutions techniques de rafraîchissement



1km<sup>2</sup> Sacramento (Californie)Source LBNL



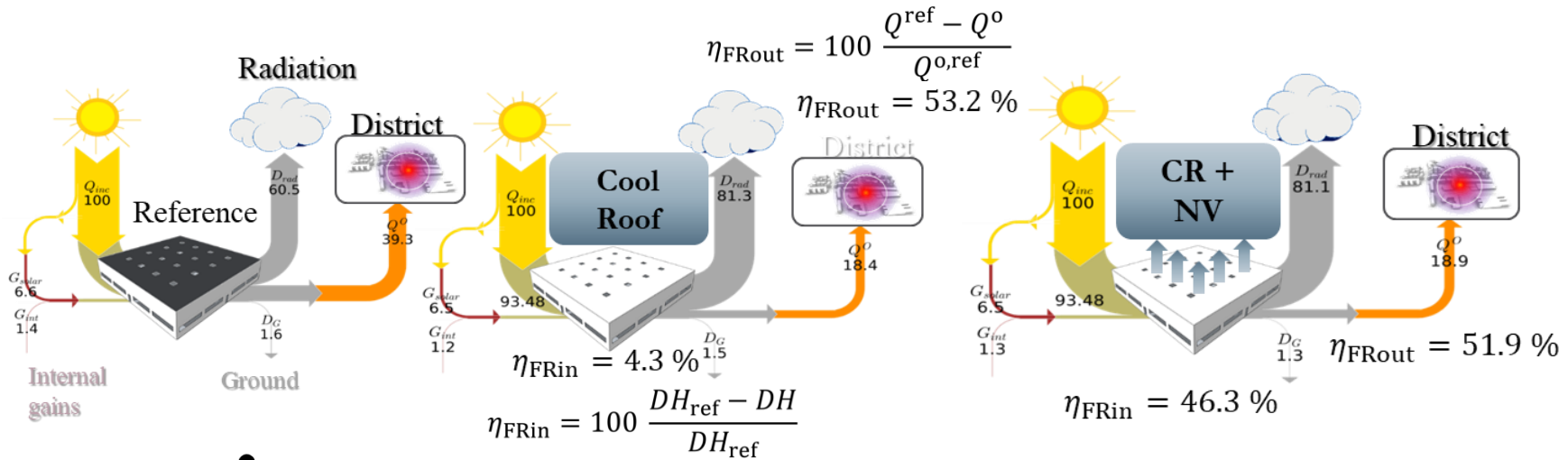


# Cool roofs – rafraîchissement intérieur & extérieur

Efficacités relatives cumulées de rafraîchissement intérieur et extérieur



**Extérieur** - atténuation relative des apports de chaleur à l'environnement urbain



**Intérieur** - atténuation relative de l'inconfort thermique cumulé ( $^{\circ}\text{Ch}$ ) / Bâtiment non climatisé

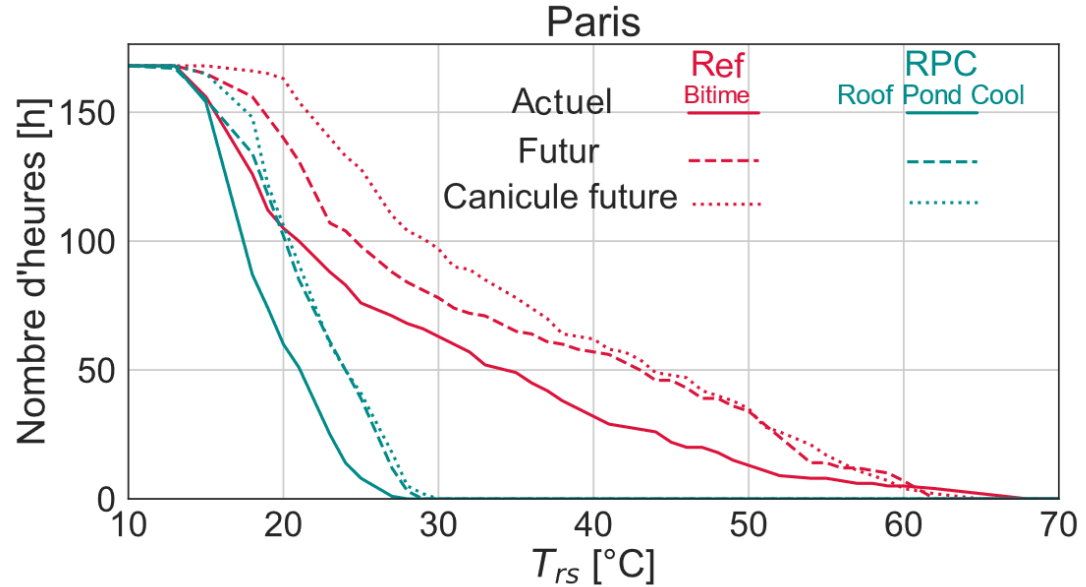
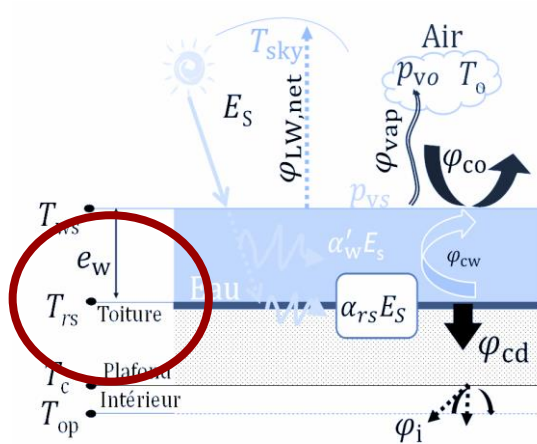






# Bassin de toit

Effet combiné d'un Bassin de toit et d'un "cool roof" – Température de surface



Chtioui, Féryal, Emmanuel Bozonnet, Patrick Salagnac, et Anaïs Machard. « Comparaison de deux techniques de rafraîchissement passif en toiture sous différentes conditions climatiques ». In *29e Congrès Français de Thermique*.

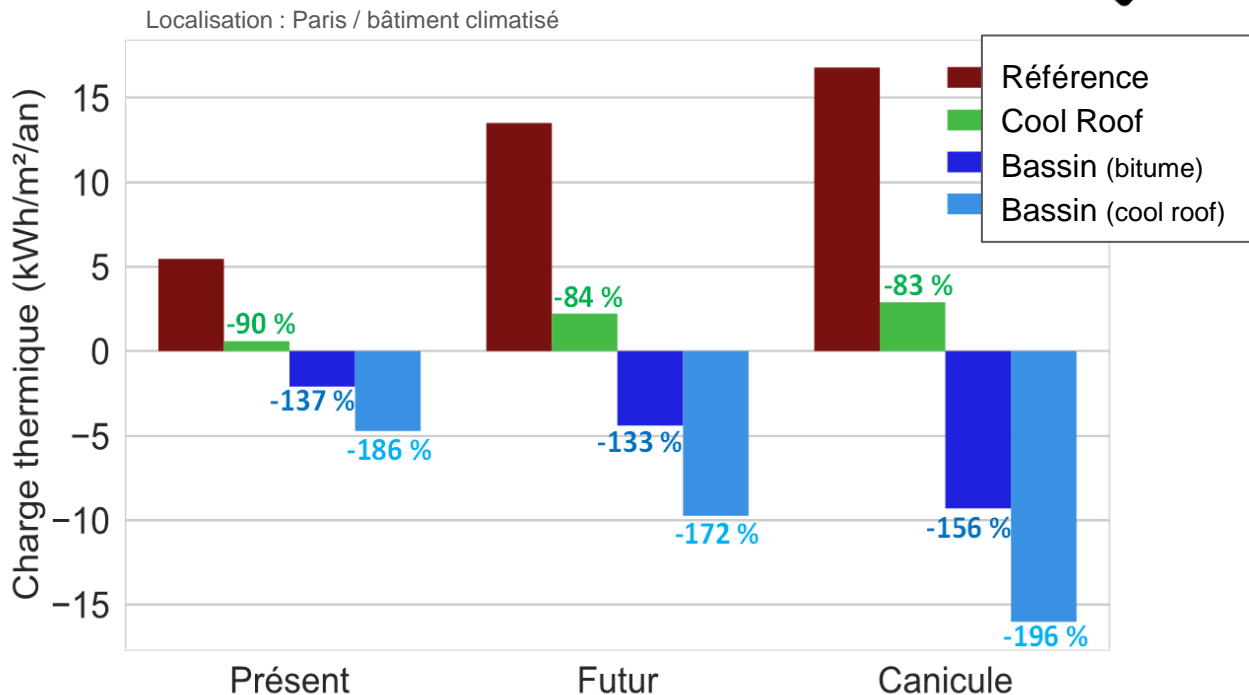
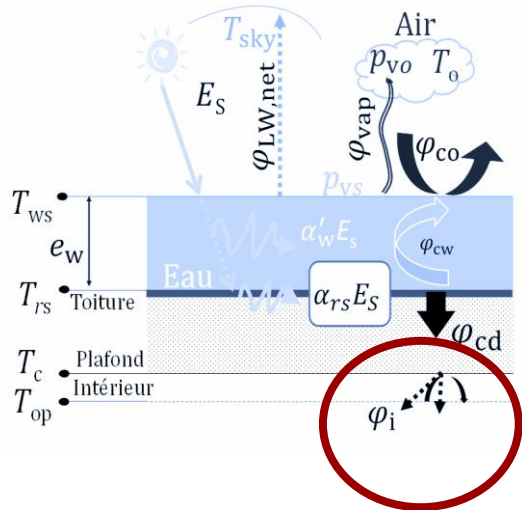
THERMIQUE ET MIX ENERGÉTIQUE. Belfort, France: Société Française de Thermique, 2021.

<https://doi.org/10.25855/SFT2021-010>



# Bassin de toit

Effet combiné d'un Bassin de toit et d'un "cool roof" – besoin de climatisation



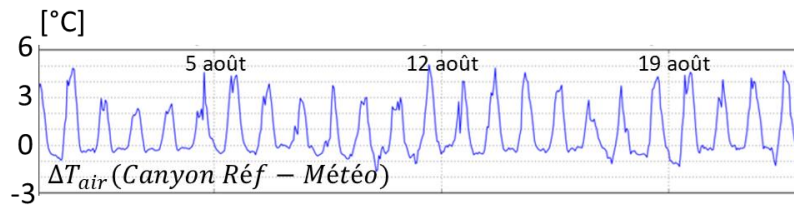


# Végétalisation des surfaces

## Façade végétale - effets de puit de chaleur



Référence - RefC<sub>6</sub>

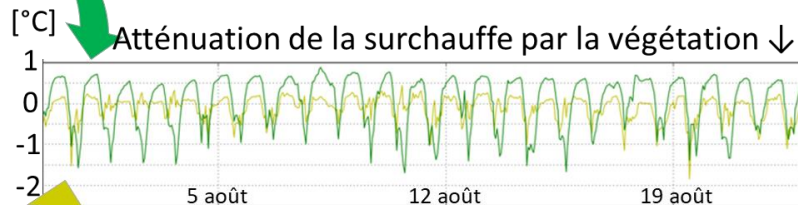


Confinement thermique canyon « minéral » ↑



Façade végétale - GWallC

$\Delta T_{airCanyon}(Façade\ vég - Réf)$

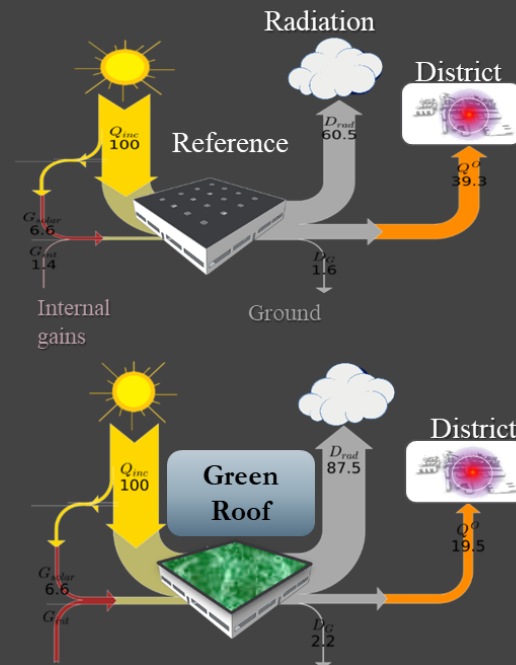


Atténuation de la surchauffe par la végétation ↓



Toitures végétales - GRooFC

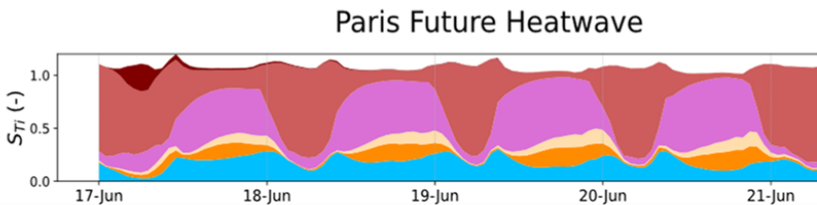
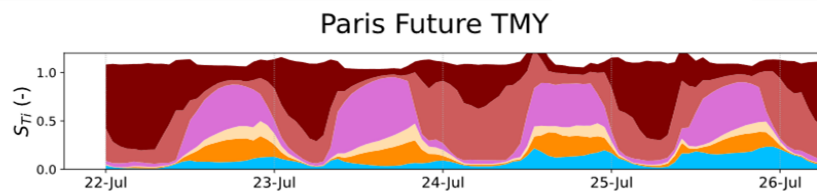
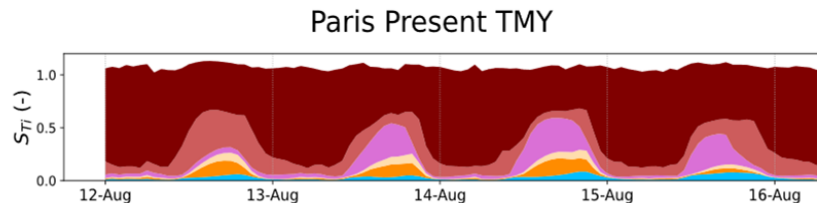
## Bilan bâtiment & ICU





# Paramètres de l'enveloppe influant sur la surchauffe

*Analyse de sensibilité temporelle méthode de Sobol, plage de variation des paramètres*

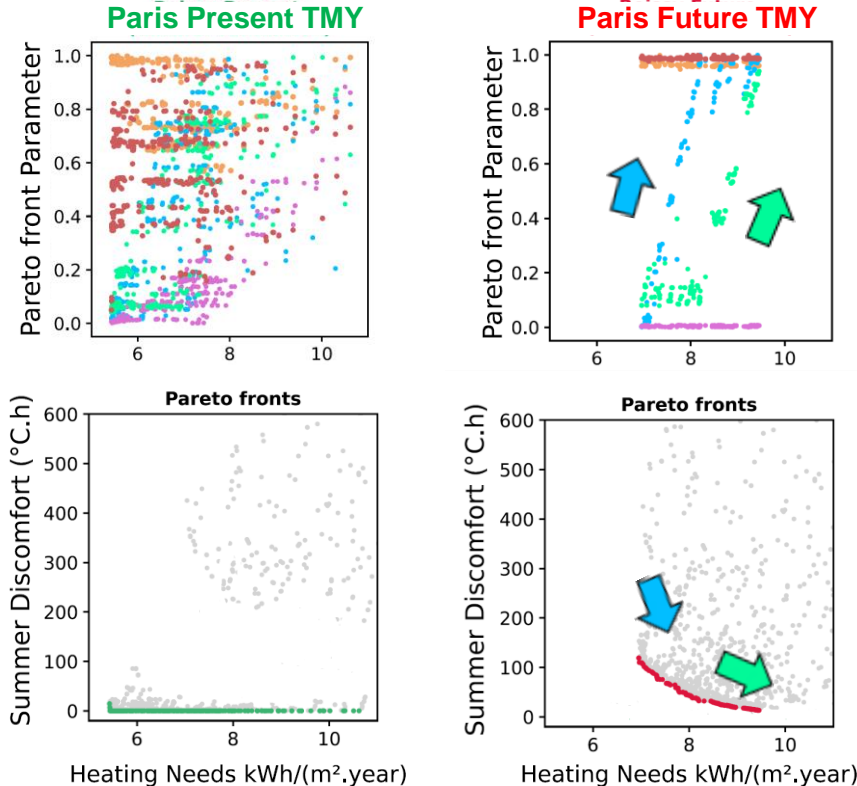


	<b>Albedo &amp; Emissivité (toiture)*</b>	0.1	0.9
	<b>Inertie plafond (kg/m3)**</b>	650	2300
	<b>Inertie plancher (kg/m3)</b>	650	2300
	<b>% vitrage sur facade (-)</b>	15	95
	<b>% d'ouverture de la fenêtre (-)</b>	10	100
	<b>Consigne de Top pour ouvrir la fenêtre (°C)</b>	15	24






\*  $\alpha$  est modifié et  $\varepsilon$  en même temps  
\*\*  $\rho$  est modifié  $C_p$  et  $\lambda$  le sont en même temps  
afin de garder une valeur de  $U$  constante



# Optimisation de l'enveloppe été/hiver



Optimisation de l'enveloppe du bâtiment avec l'algorithme génétique NSGA-II, plage de variation des paramètres

	<b>Albedo &amp; Emissivité (toiture)*</b>	0.1	0.9
	<b>Inertie plafond et plancher (kg/m<sup>3</sup>)**</b>	650	2300
	<b>Longueur casquette (m)</b>	0	1
	<b>% vitrage sur facade (-)</b>	35	95
	<b>% d'ouverture de la fenêtre (-)</b>	10	100

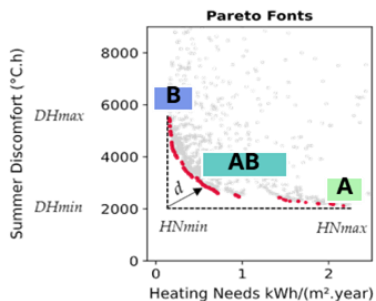
A. Machard "Towards mitigation and adaptation to climate change : Contribution to Building Design". *Thèse de doctorat, 2021*



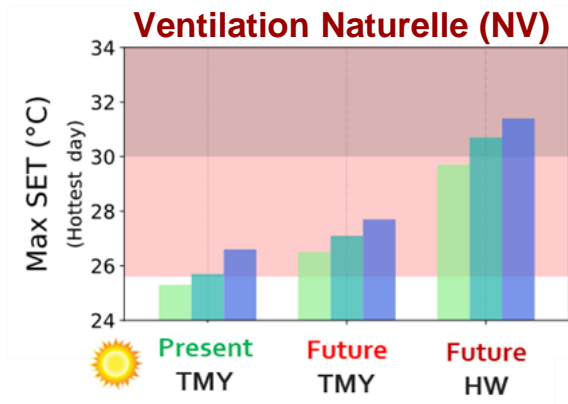
# Analyse du risque sanitaire en canicules futures

SET (Standard Effective Temperature) : intègre Top, RH, vair

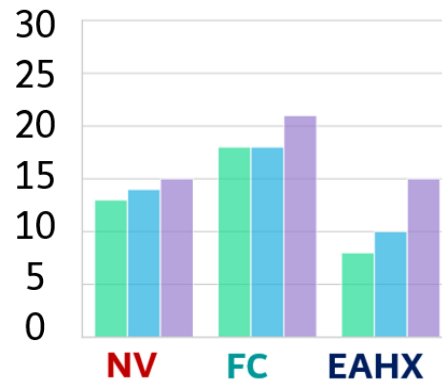
Building design



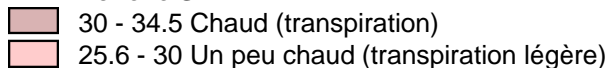
## MAX SET (°C)



## Nombre de jours consécutifs SET > 25.6 °C *Future Heatwave (HW)*



### Echelle SET



# Merci de votre attention



## Perspectives et Discussions

Indicateurs et outils d'aide à la conception des bâtiments et quartiers

- Comment comparer des solutions dans différentes localisations ?
- Si l'ordre des solutions est dépendant du type de séquence climatique :
  - Certaines solutions peuvent être privilégiées dans certaines localisations si les séquences climatiques sont choisies selon des critères différents (ou pas de critère)
  - Exemple : canicule de 2003 pour la RE2020 > manque de critère objectif pour comparer à d'autres régions
- Comment comparer des solutions présentes et futures
  - Bâtiment et usages constants ou évolutions ?