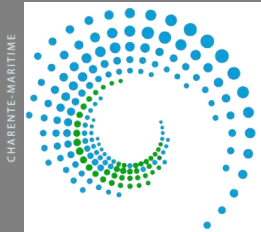




# ADAPTER LES QUARTIERS AUX CLIMATS FUTURS - RISQUES SANITAIRES ET ENJEUX ÉNERGÉTIQUES

6 décembre 2023 – 17h  
Bibliothèque scientifique du Muséum  
17000 La Rochelle

Jérôme Le Dréau – Emmanuel Bozonnet  
LRuniv/LaSIE/RUPEELab



# ADAPTER LES QUARTIERS AUX CLIMATS FUTURS - RISQUES SANITAIRES ET ENJEUX ÉNERGÉTIQUES

I. Enjeux environnementaux, sociétaux & contexte énergétique global



II. Le milieu urbain  
Îlots de chaleur et enjeux sanitaires

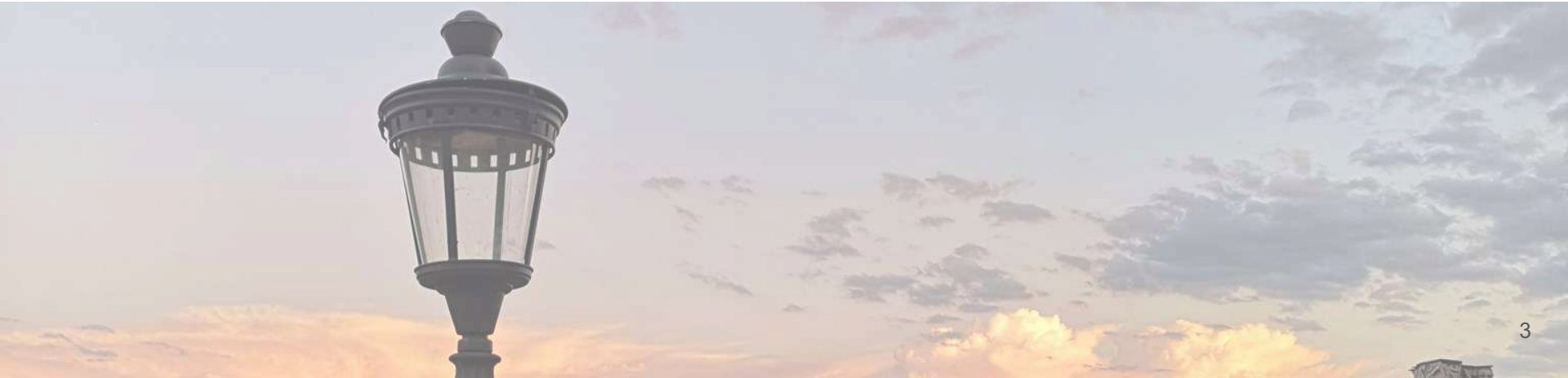


III. Adaptation des quartiers  
III.a Îlots de fraîcheur  
III.b Gestion collective de l'énergie



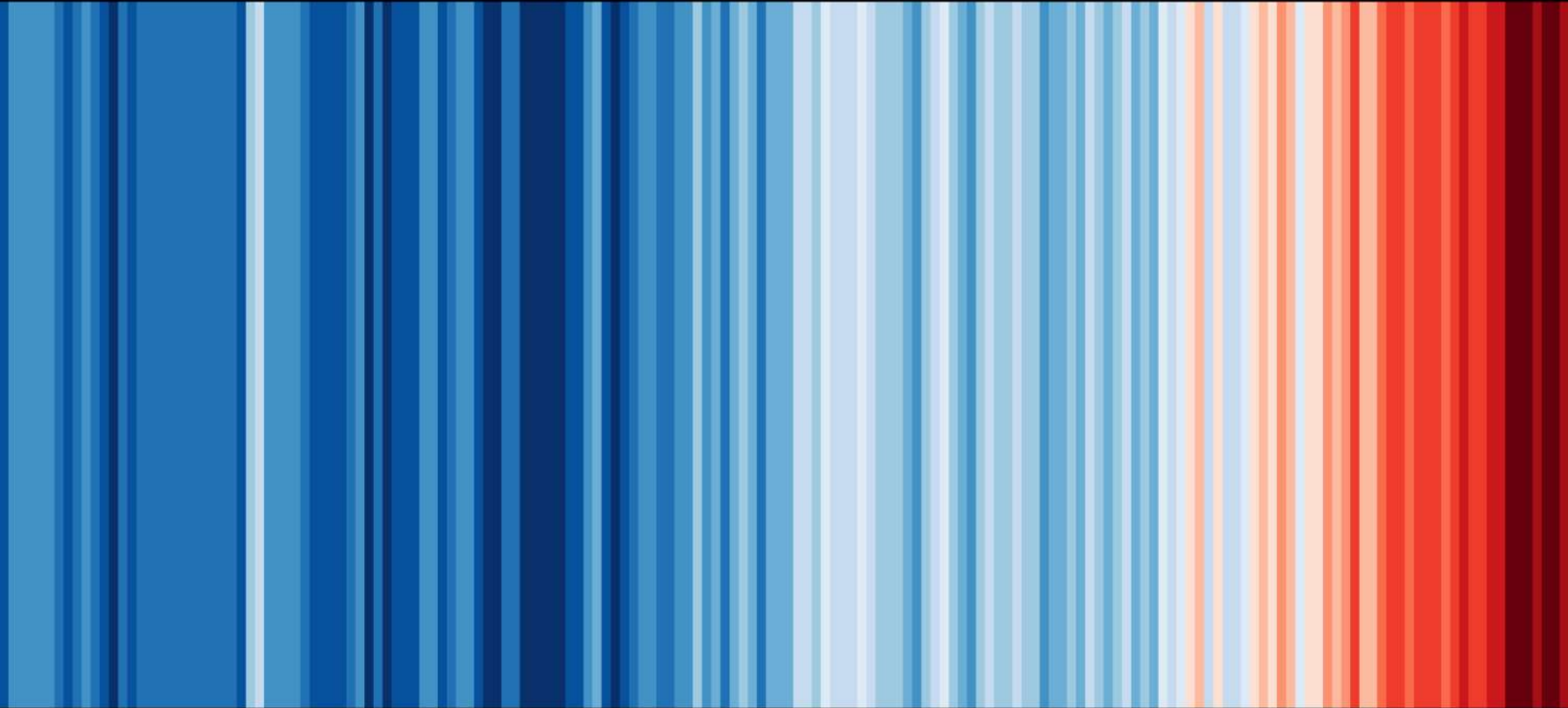


# I. Enjeux environnementaux, sociétaux & contexte énergétique global



# Changement relatif de température globale (1850-2021)

<https://showyourstripes.info/>



1860

1890

1920

1950

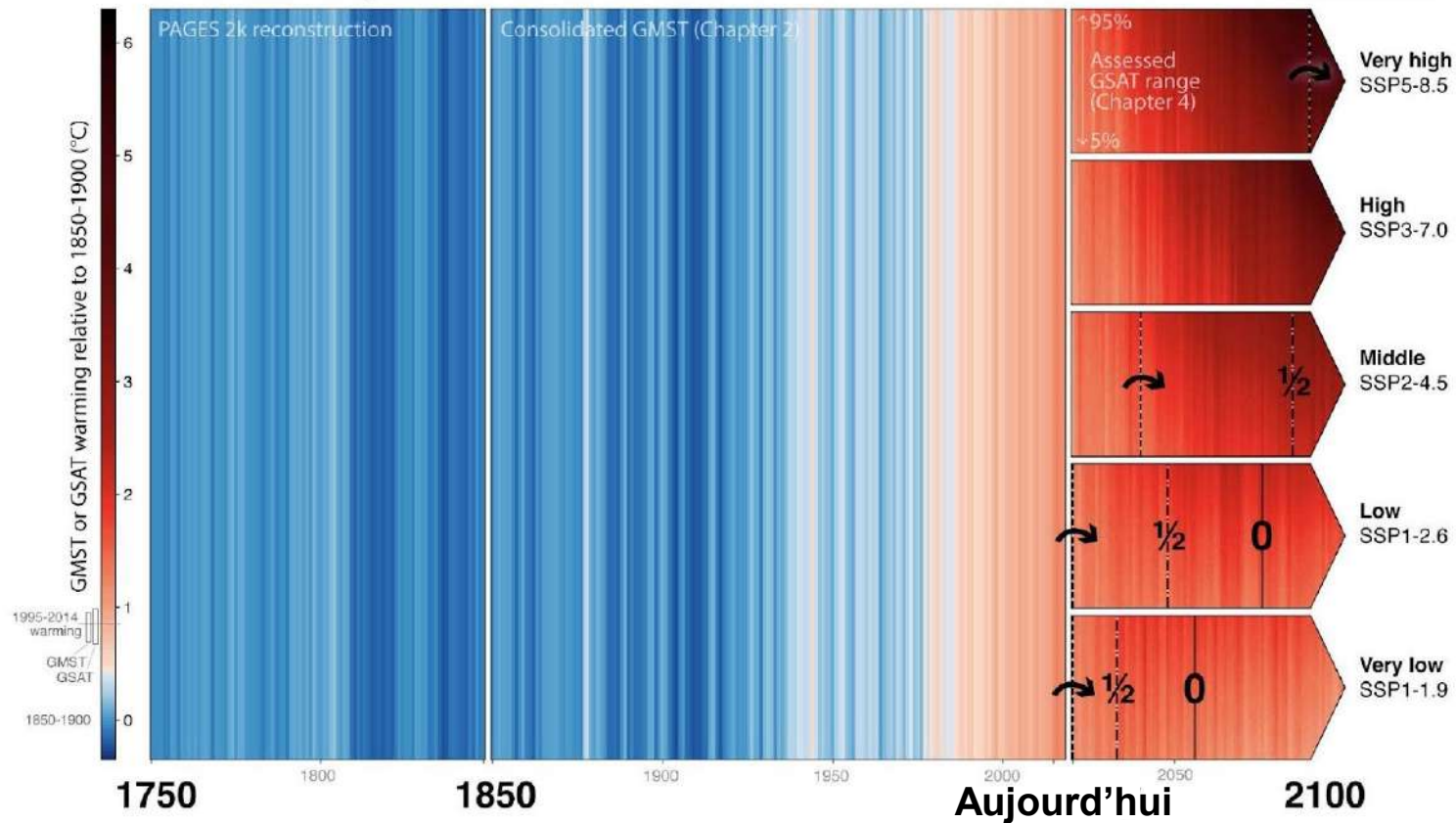
1980

2010



# Où va-t-on ?

CO<sub>2</sub> Emissions:  
↷ Peaking  
½ Halving  
0 Net-zero





# 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)

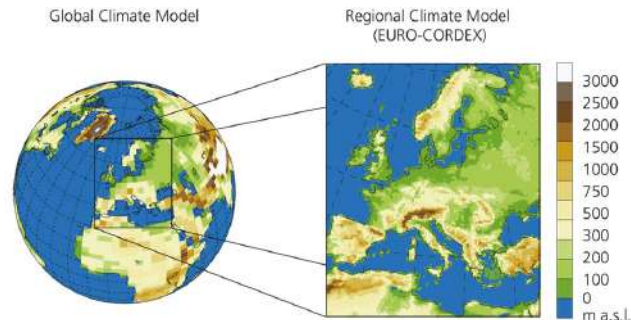
+ Pas de temps horaire

+ 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

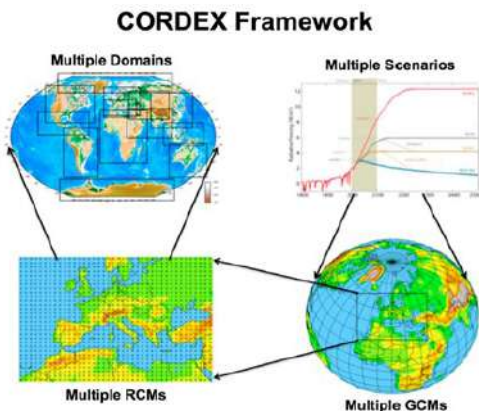
+ Représentation des vagues de chaleur

+ Plusieurs modèles de climat et de scénarios RCP

→ Utilisé par les climatologues mais peu par les concepteurs



# Méthodologie développée pour l'assemblage des fichiers météos 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)

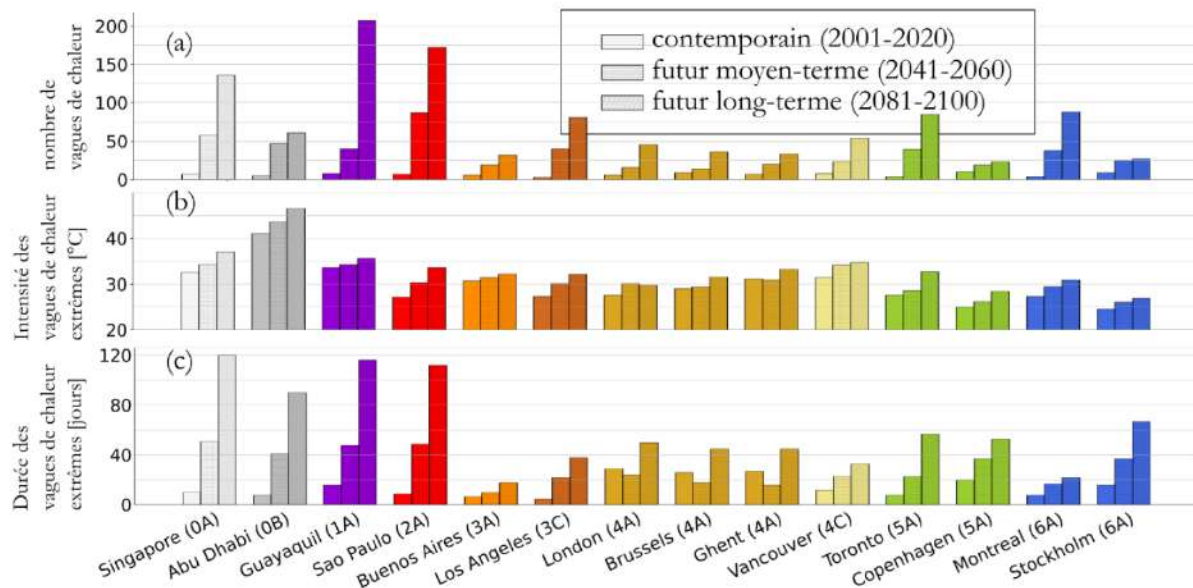
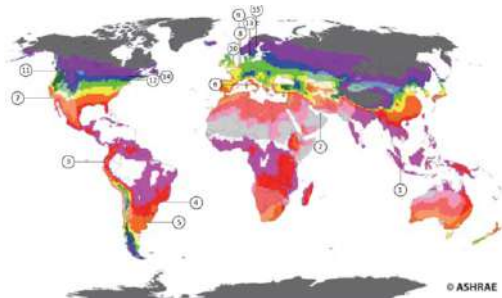
Heatwaves  
1990-2019  
2041-2069

7/ Sélection des séquences

Building thermal simulation 



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



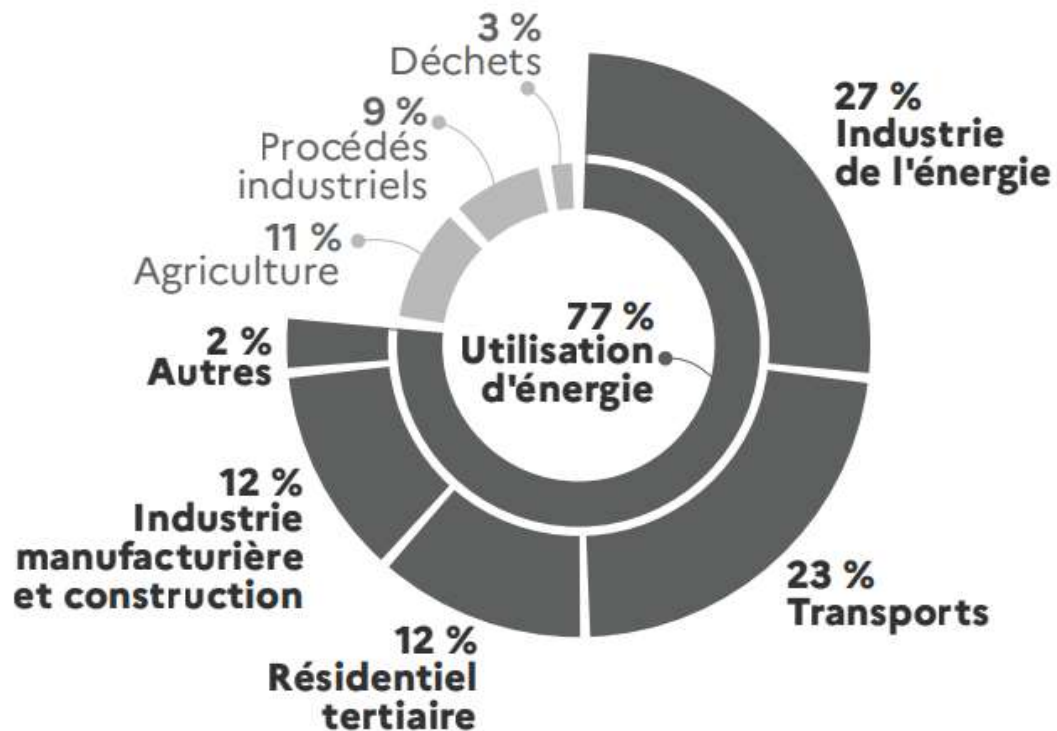
A. Machard, E. Bozonnet, A. Salvati, M. Pourabdollahtookaboni, et A. Gaur. « Fichiers météorologiques de vagues de chaleur futures pour évaluer la résilience thermique des bâtiments au changement climatique ». *Colloque AIC Juillet 2022*

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



## Emissions de GES & énergie

77 % des émissions  
sont liées à l'énergie





# Emissions de GES & bâtiments :

15-20 % des émissions GES

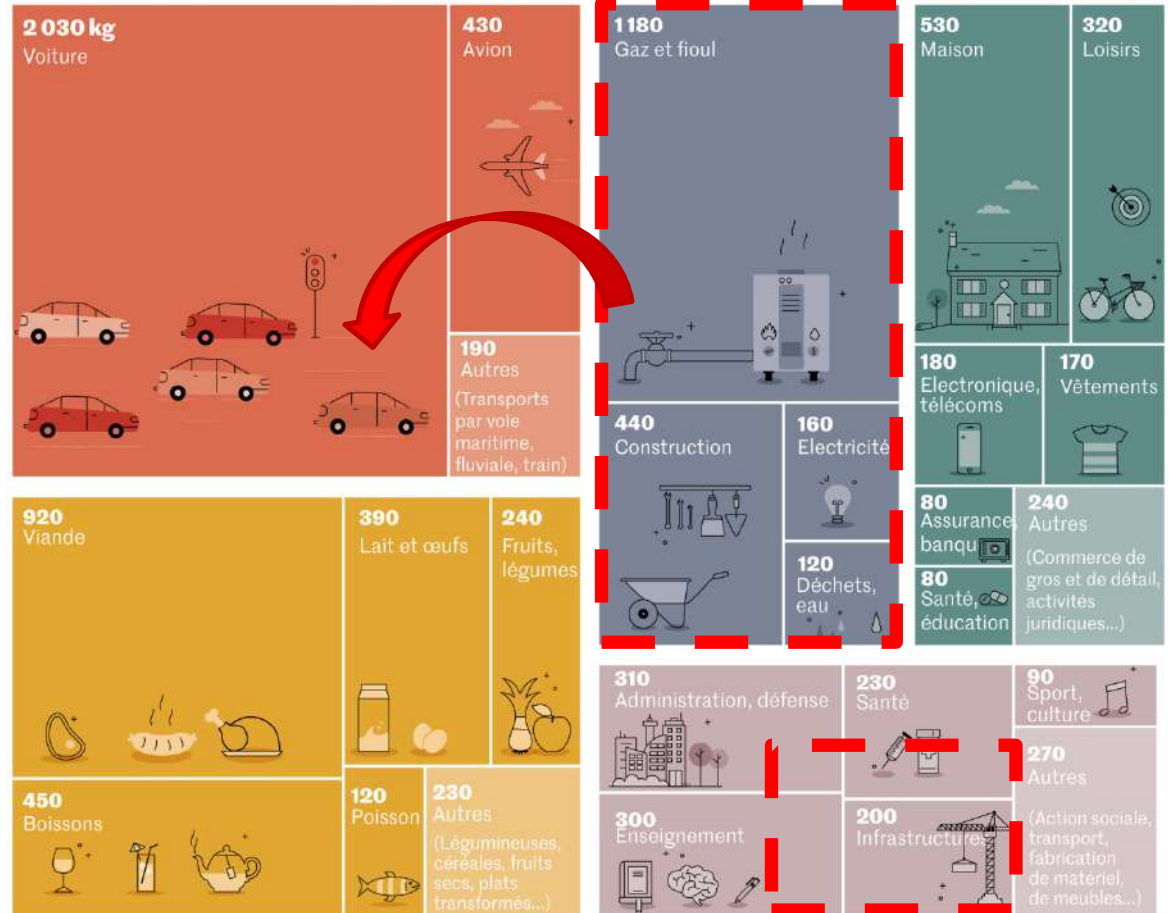
**Transport**  
2 650 kilos

**Alimentation**  
2 350 kilos

**Habitat**  
1 900 kilos

**Consommation**  
1 600 kilos

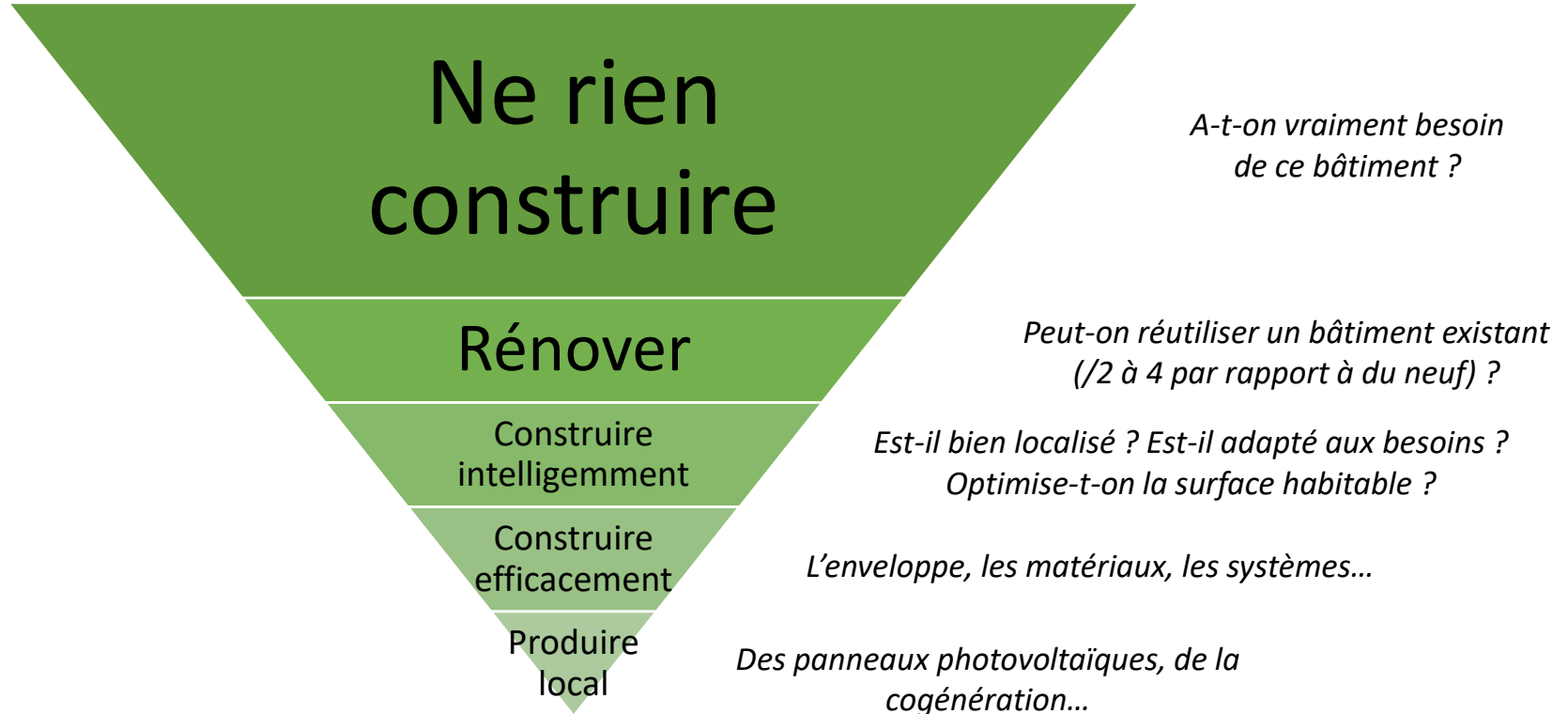
**Dépenses publiques**  
1 400 kilos



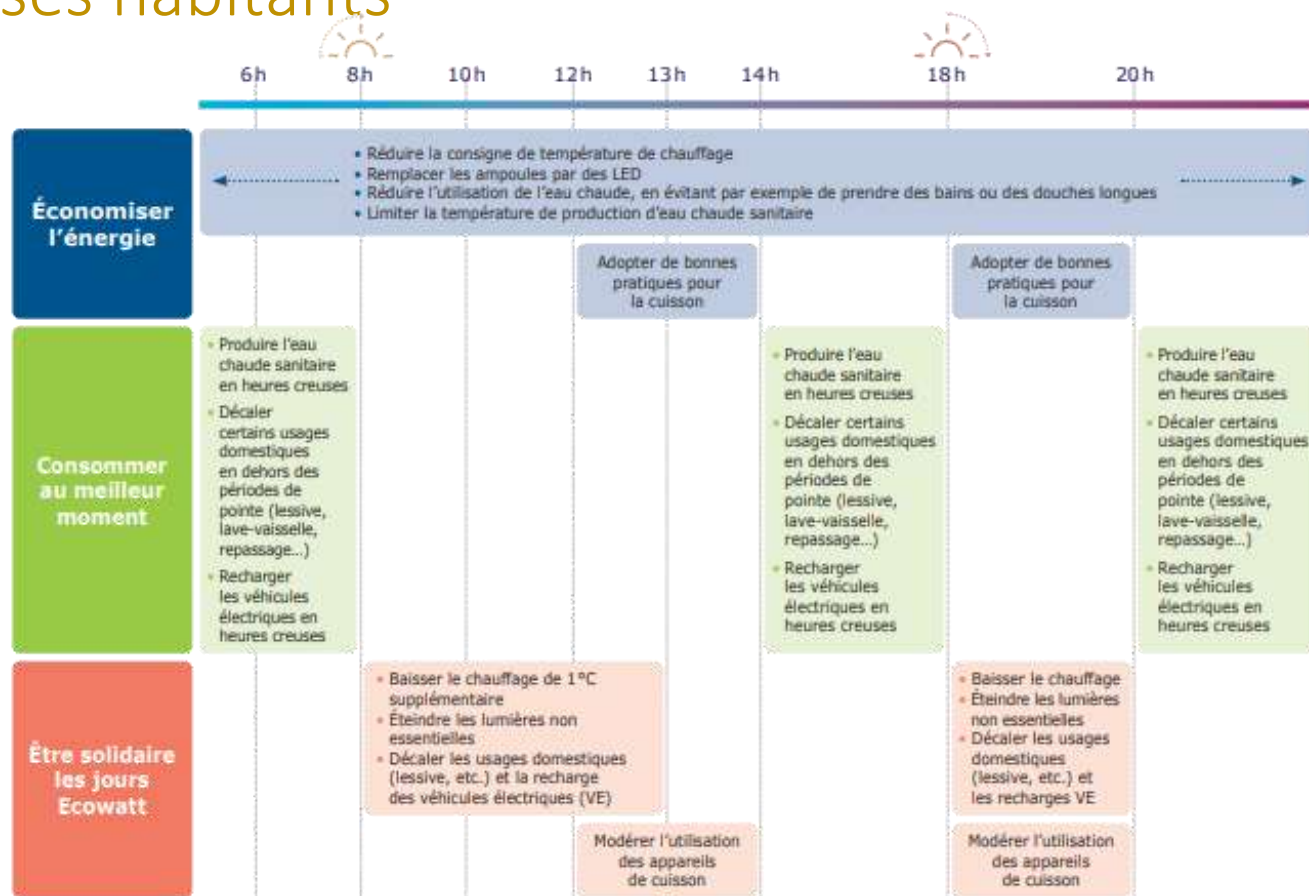
Source: Le Monde, Marianne Pasquier (2022)



# Les bâtiments : hiérarchiser les actions !



# ... et ses habitants





# Les quartiers, les nouveaux centres de la transition ?

Comment les quartiers peuvent-ils se préparer, s'adapter, se transformer, pour mieux faire face aux perturbations ponctuelles et aux évolutions de long terme comme le changement climatique ?



L'objectif de cette présentation est de mettre l'accent sur :

- les différentes échelles de temps en jeu (dynamique de température, de production électrique),
- la dimension humaine (adaptabilité, auto-organisation).

Source : ODD ONU



## II. Le milieu urbain

### Îlots de chaleur et enjeux sanitaires



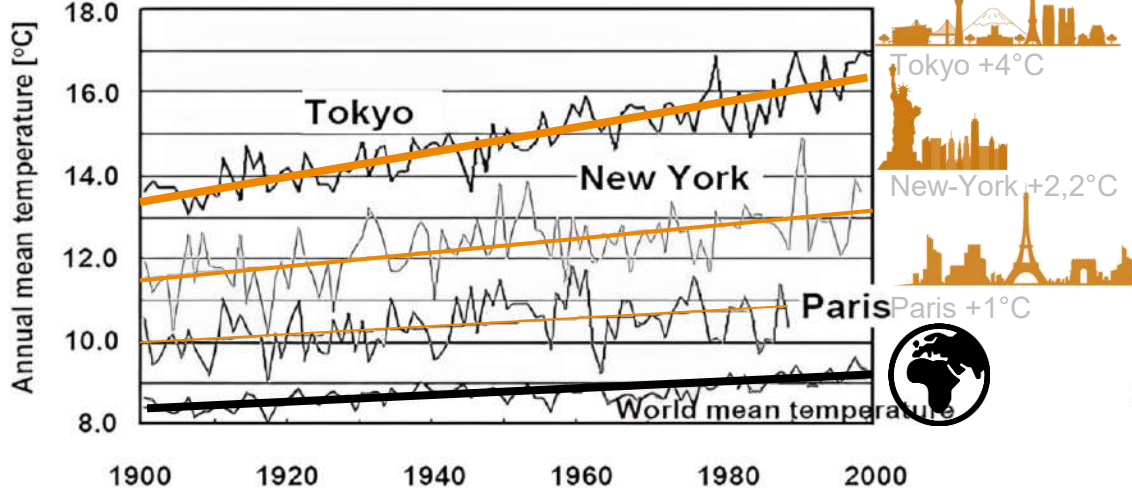


# Îlot de chaleur urbain réchauffement global vs. urbain

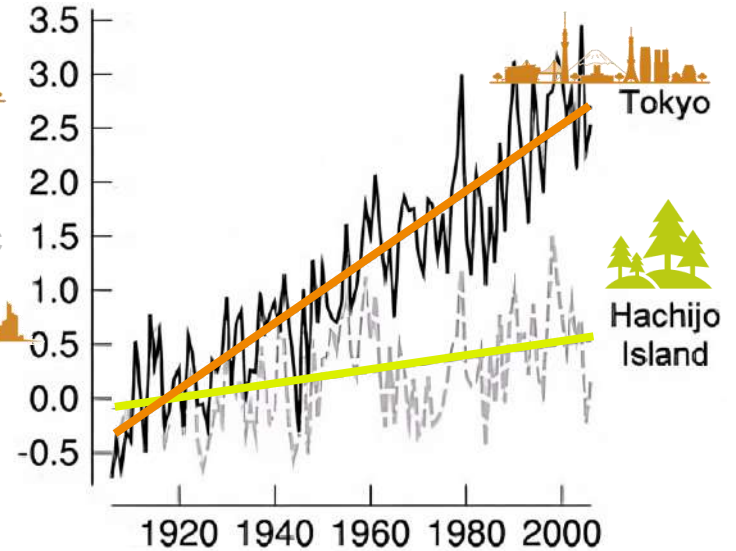
Réchauffement global

Augmentation des températures urbaines

Évolution **urbain** vs. **global**



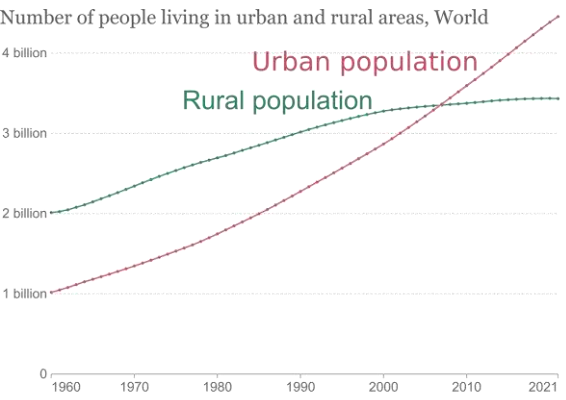
Évolution **urbain** vs. **rural**



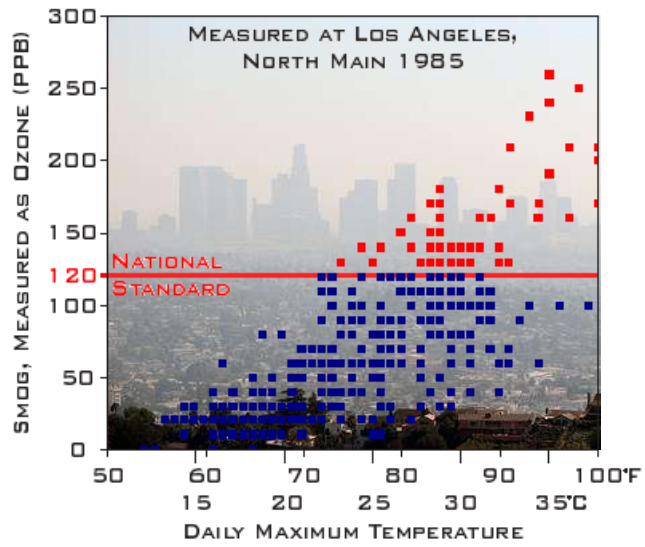


# Îlot de chaleur urbain, stress thermique

## Population urbaine

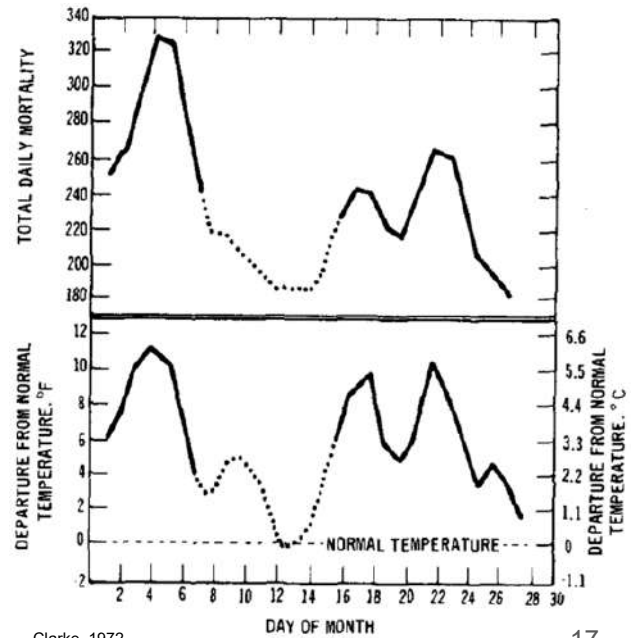


Photochemical smog  
 sunlight + NOx + VOCs → O3 + particulates



# effets sanitaires

## Population urbaine et effets sanitaires

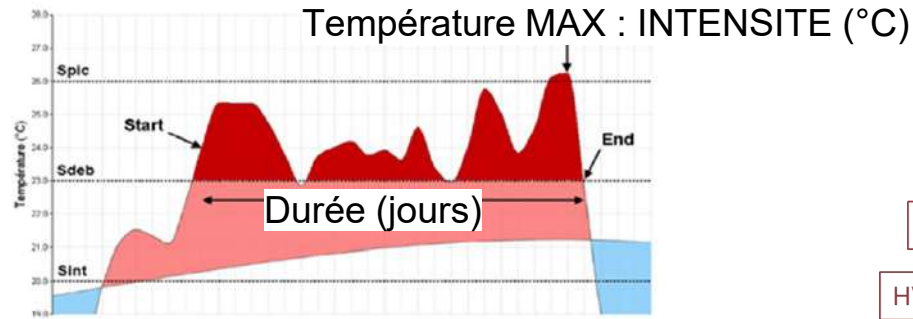


Clarke, 1972  
 Juillet 1955 à New-York - moyenne glissante sur 3 jours

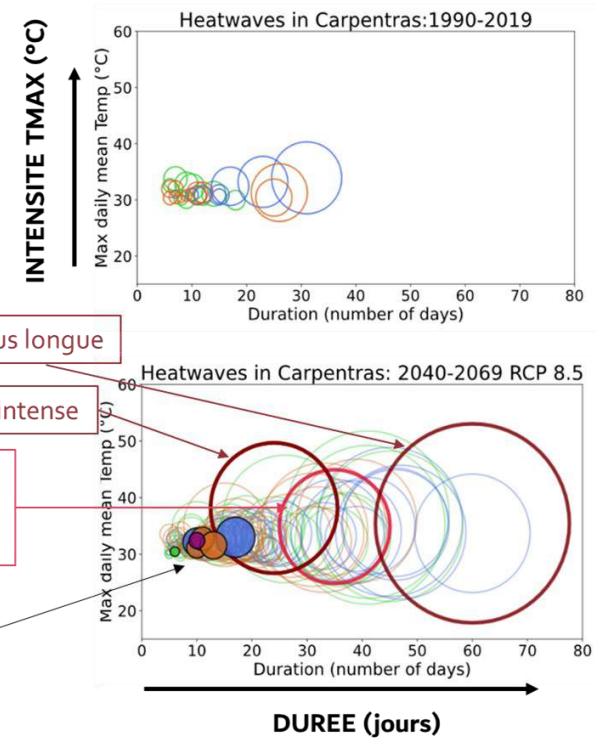


# Vagues de chaleur définitions météo

## effets sanitaires



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>

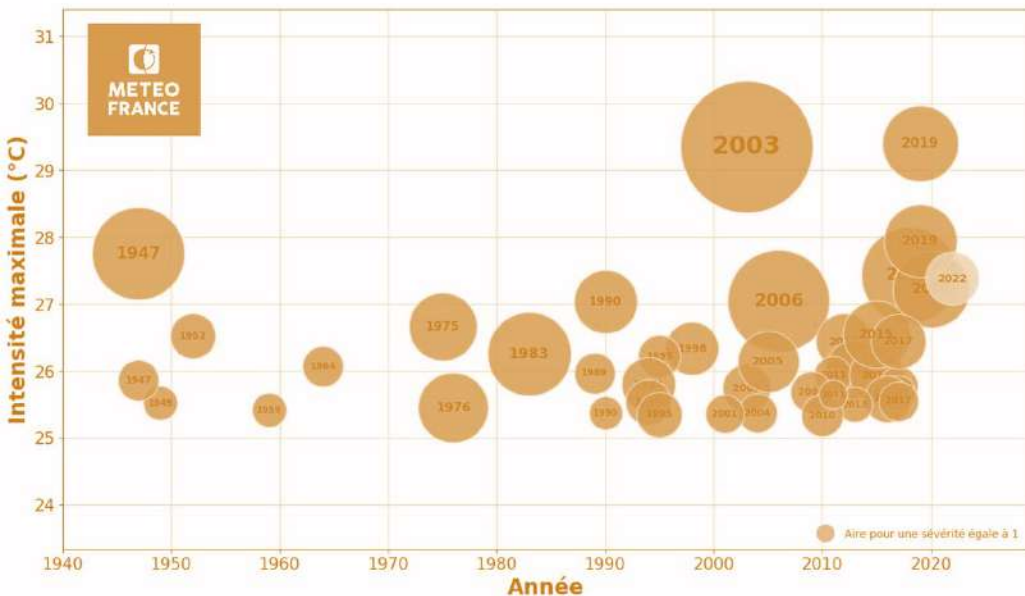


Quelle vague de chaleur sélectionner pour la conception du bâti ?

# Les vagues de chaleur

## 1947-2022

### Vagues de chaleur observées en France 1947 à 2022 : 44 épisodes identifiés



### Canicules, incendies : état d'urgence climatique

- L'Europe fait face à une nouvelle semaine de records de chaleur sur fond de lieux de fêtes
- Confrontés à leur deuxième canicule estivale, les Français prennent conscience que l'exception climatique devient la règle
- La climatologue Valérie Masson-Ostmann, du CNRS, met en garde contre la tentation de nos dirigeants face à un climat qui mute au galop
- Interrogés par FRANCE 24, quatre Français sur cinq se disent convaincus de l'importance d'agir vite



**PARIS**  
Comment Paris se prépare à vivre des vagues de chaleur à 50°C

**MAISEILLE**  
Dans les Bouches-du-Rhône, les pompiers anticipent une « saison en enfer »

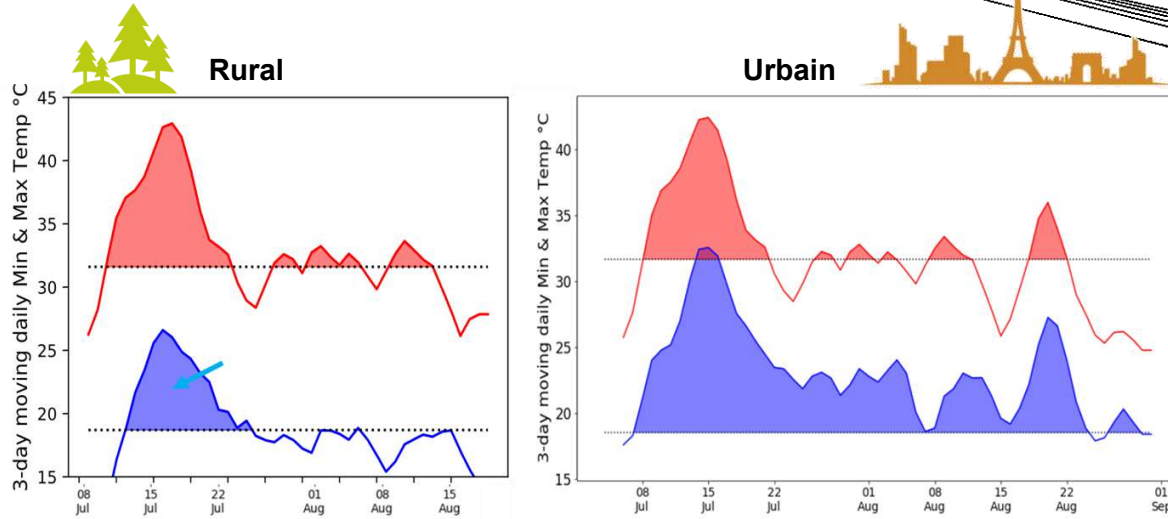
**TOULOUSE**  
Entre canicule, Covid-19 et fêtes estivales, pas de répit nocturne au centre du SAMU



# Canicule future extrême intense avec ICU à Paris → Surchauffe échelle quartier

*effets sanitaires*

Éco-quartier les Batignolles à Paris

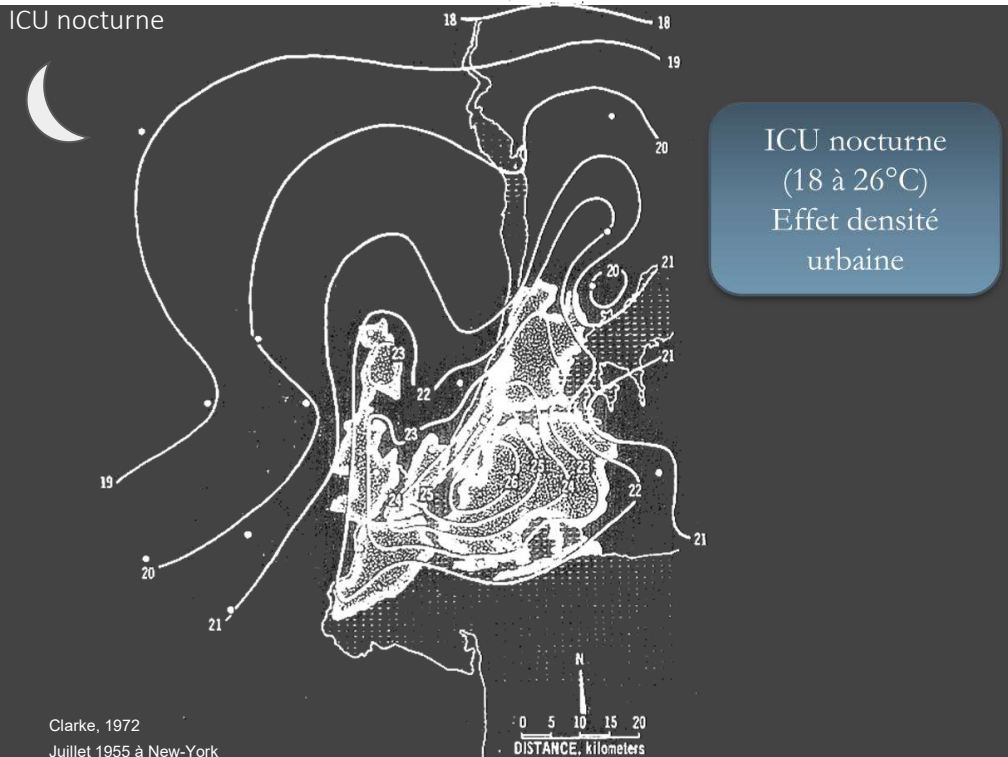




# Îlot de chaleur urbain – échelle de la ville

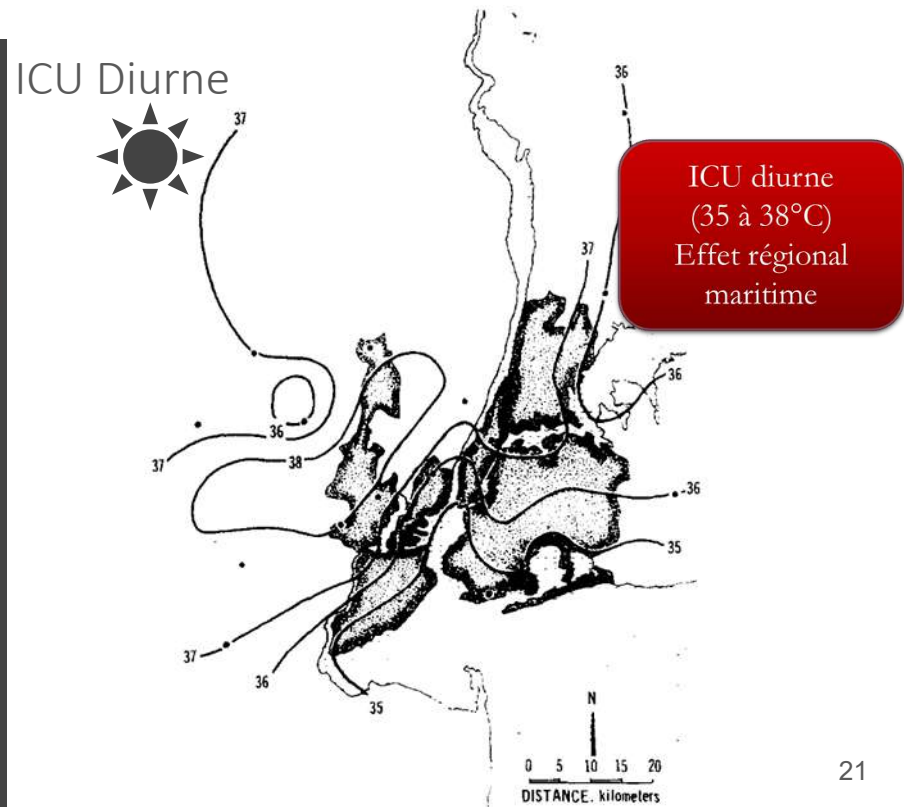


ICU nocturne



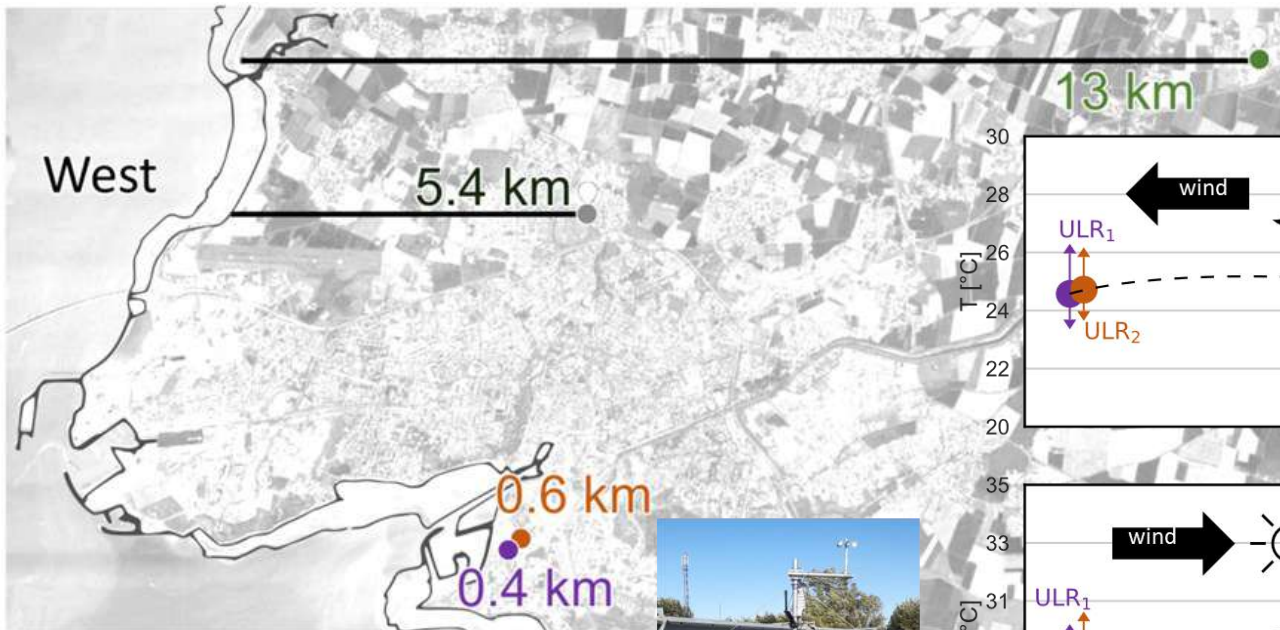
Clarke, 1972  
Juillet 1955 à New-York

ICU Diurne



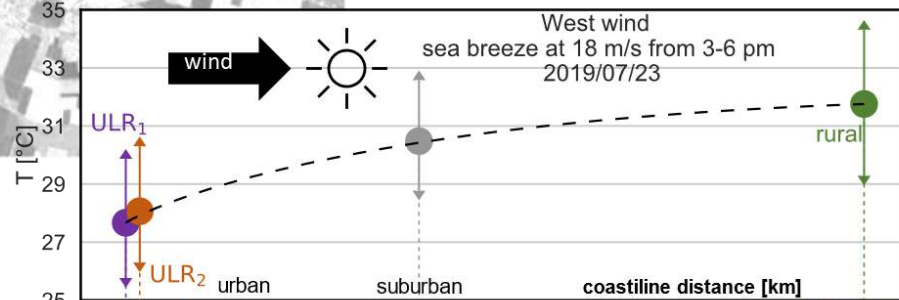
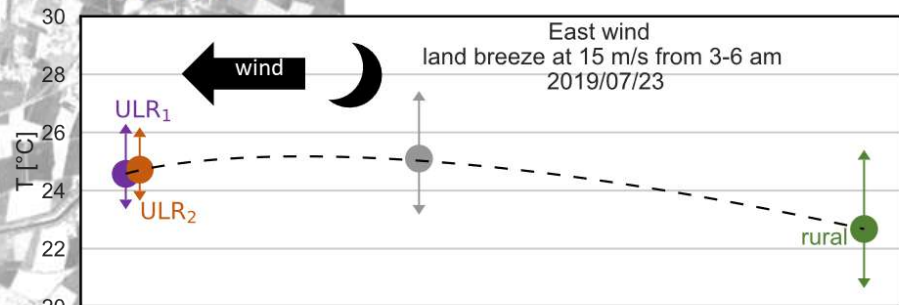


# Îlot de chaleur urbain – effets de côte



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.

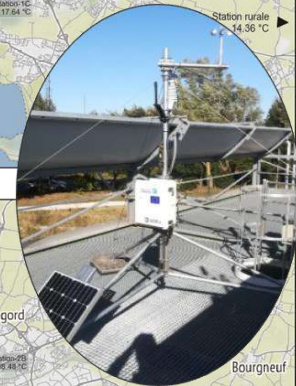
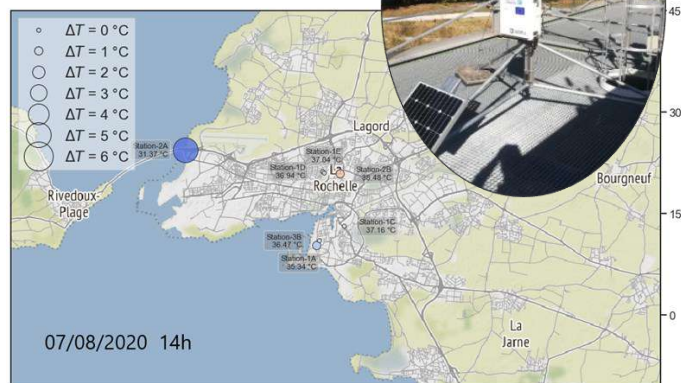
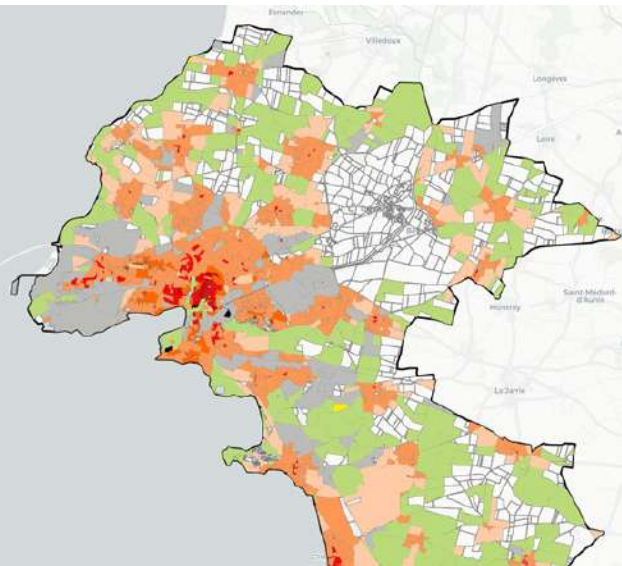
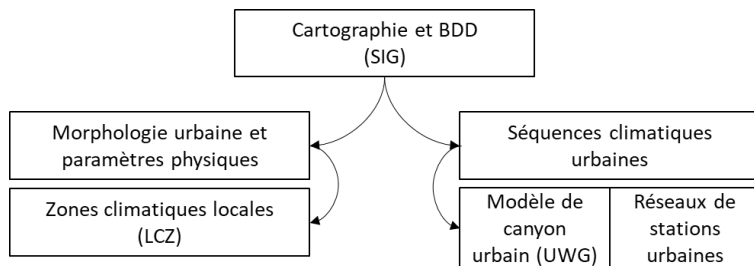
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111522>.

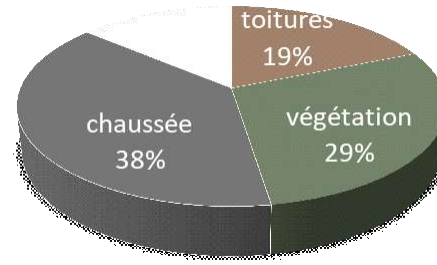


0.6 km 5.4 km 13 km  
0.4 km  
West East



# Cartographies urbaines – zones climatiques locales

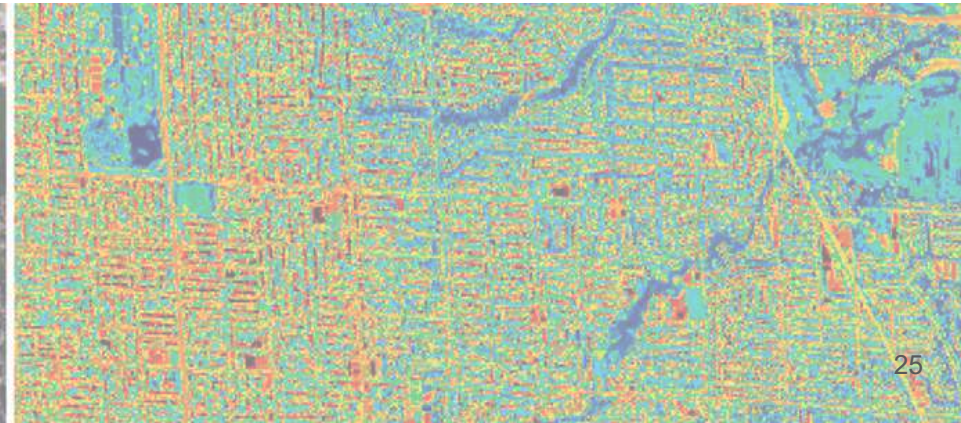




1km<sup>2</sup> Sacramento (Californie)Source LBNL

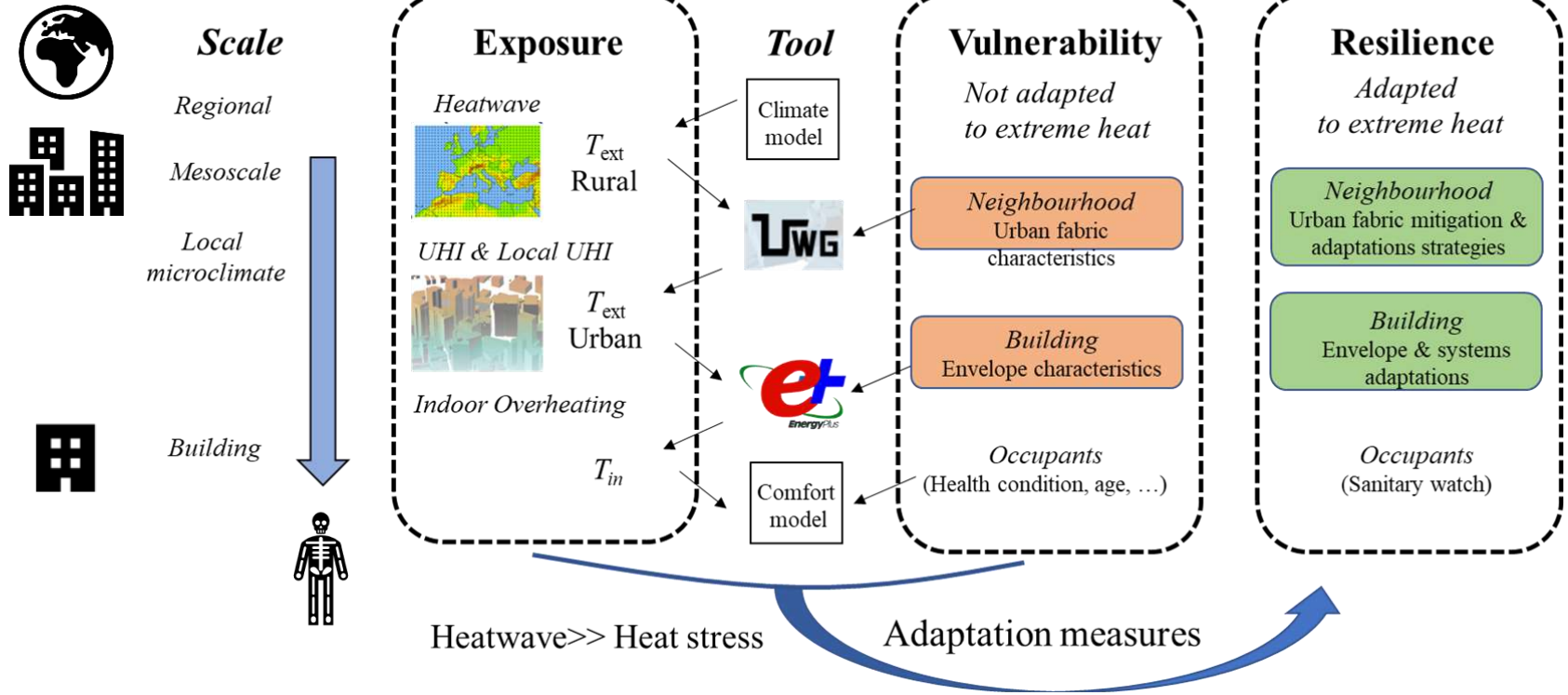
# III. Adaptation des quartiers

## III.a Îlots de fraîcheur

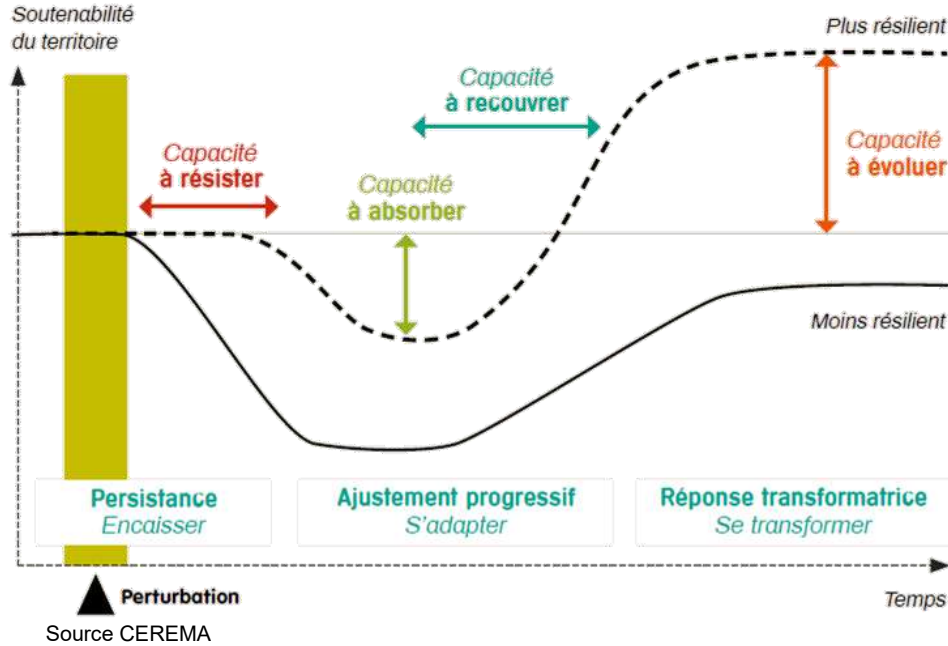


# Exposition au climat & adaptations

Impacts aux différentes échelles



# Résilience des bâtiments et des quartier

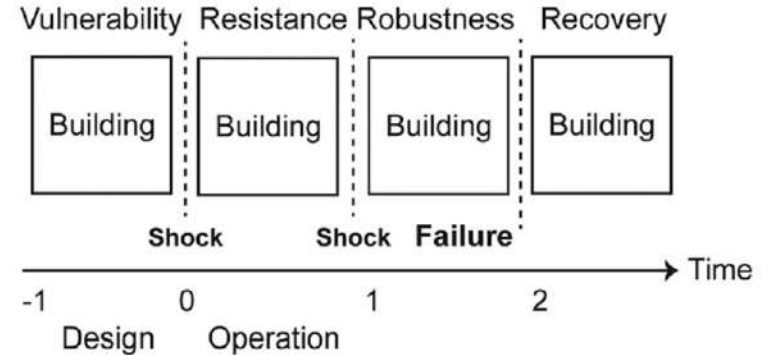


**Choc 1 :**  
Vague de chaleur

**Choc 2 :**  
Coupure de réseau

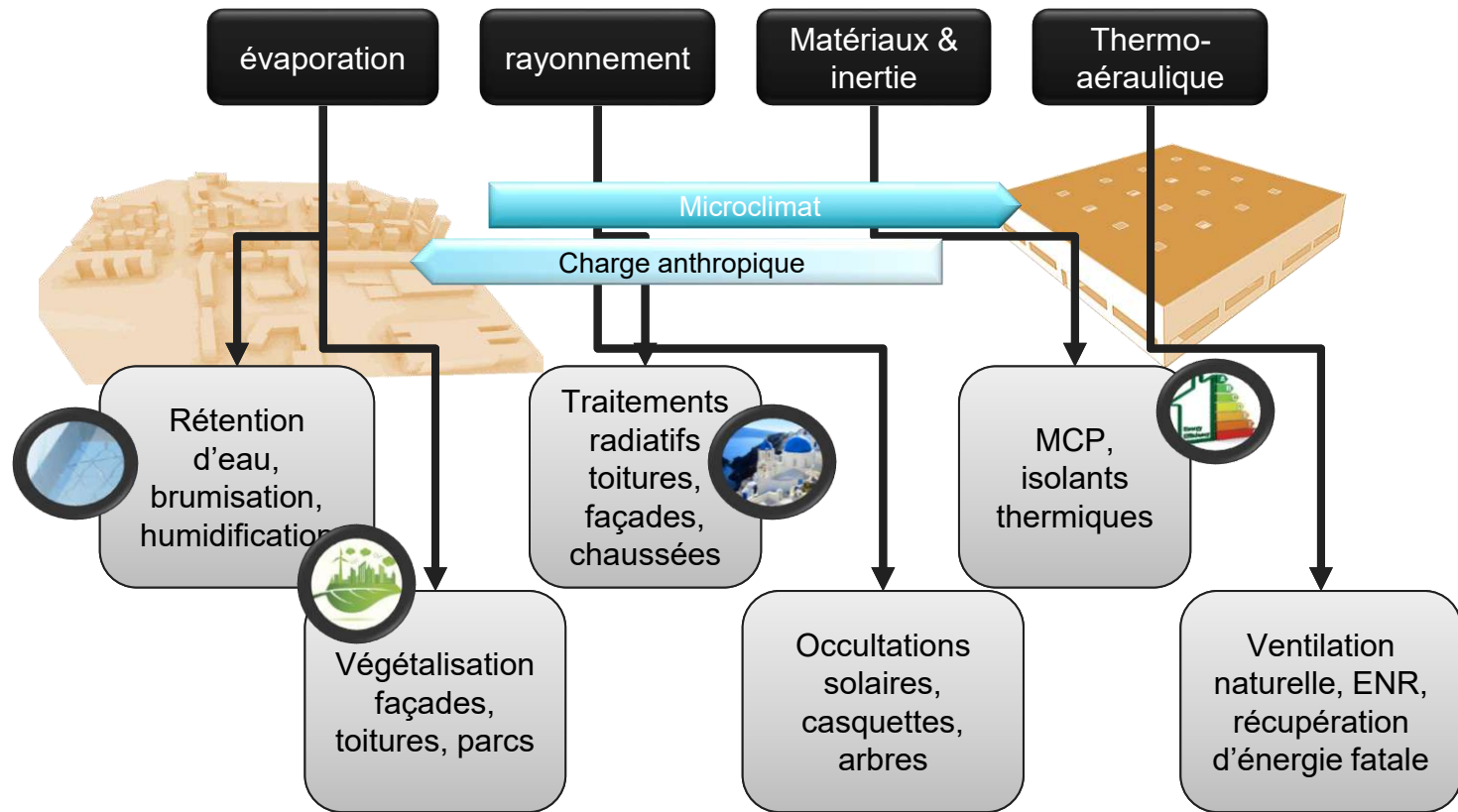
**Choc 1 + Choc 2 :**  
Vague de chaleur  
+ coupure de réseau

## Stages of Resilience



Tester les stratégies de rafraîchissement/climatisation  
-> non pas avec des scénarios "moyens", mais avec des "états limites"

# Solutions de traitement des ICU et du bâti



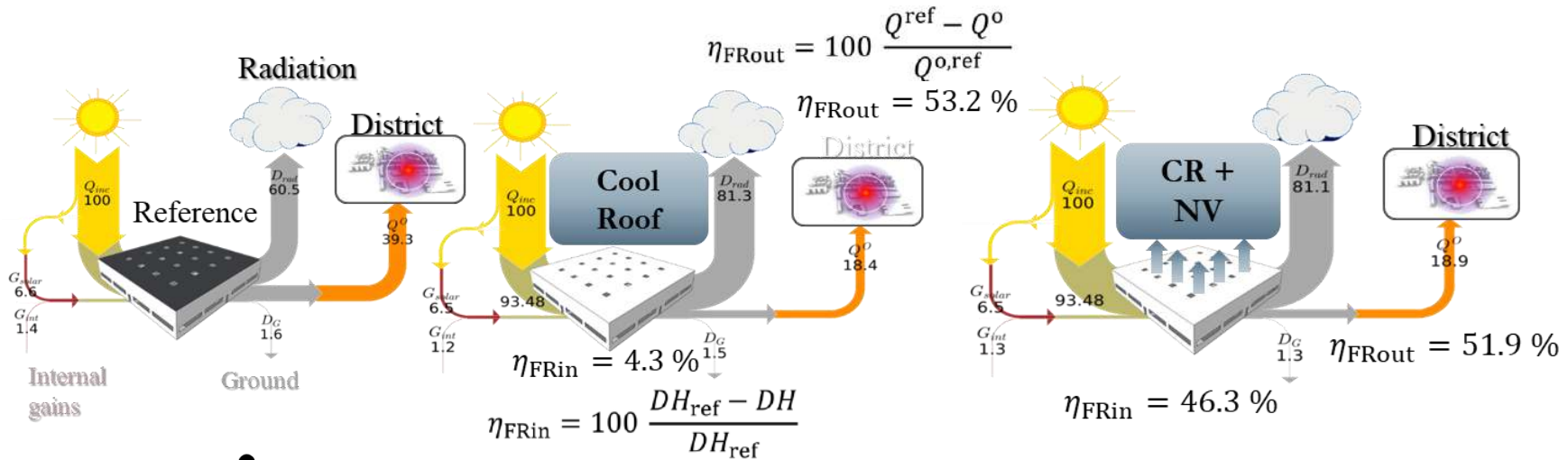


# Cool roofs – rafraîchissement intérieur & extérieur

Efficacités relatives cumulées de rafraîchissement intérieur et extérieur

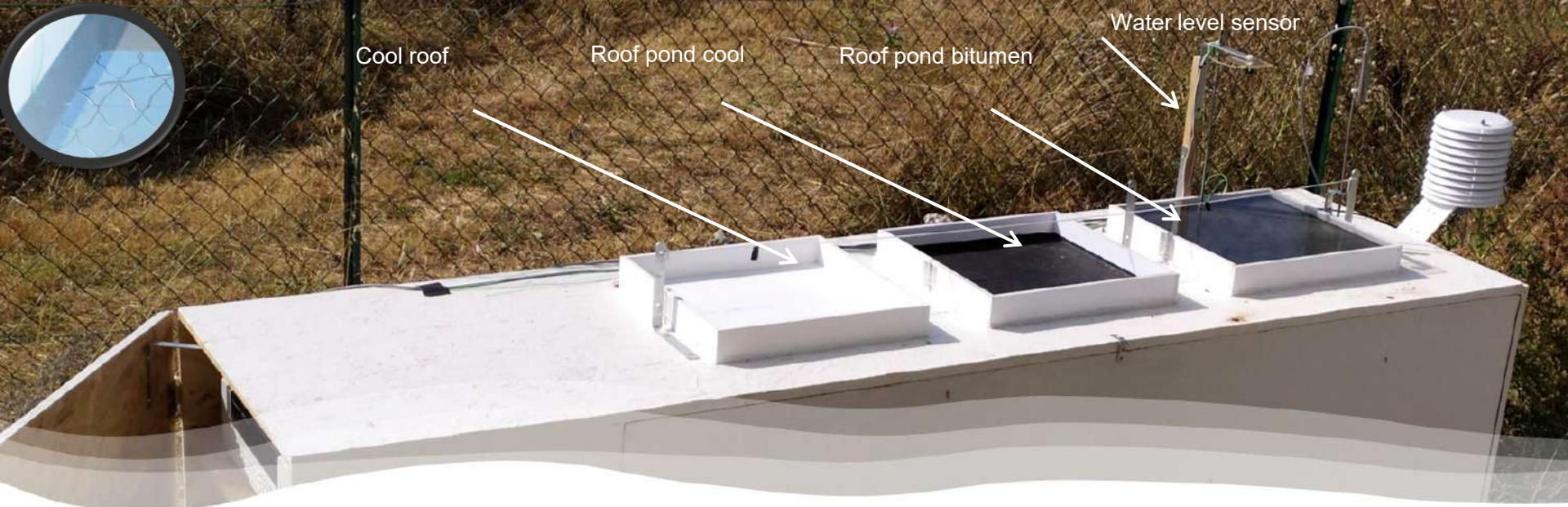


**Extérieur** - atténuation relative des apports de chaleur à l'environnement urbain



**Intérieur** - atténuation relative de l'inconfort thermique cumulé (°Ch) / Bâtiment non climatisé





Cool roof

Roof pond cool

Roof pond bitumen

Water level sensor

# Bassin de toiture – effet de l'eau

# Bassin de toiture – effet de l'eau



Reference

albedo

Evaporative techniques

« Cool Roof »

Roof pond black

Roof pond cool

Porous material

Gravels

$$\alpha_{rs} = 0,8$$

$$\varepsilon_{rs} = 0,94$$

$$\alpha_{rs} = 0,07$$

$$\varepsilon_{rs} = 0,92$$

$$\alpha_{rs} = 0,8$$

$$e_w = 5 \text{ cm}$$

$$\alpha_{rs} = 0,07$$

$$e_w = 5 \text{ cm}$$

$$e_{MP} = 3 \text{ cm}$$

$$\alpha_{rs} = 0,91$$

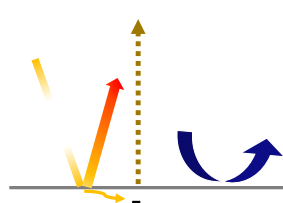
$$e_{Gr} = 3 \text{ cm}$$

$$\varepsilon_{rs} = 0,95$$



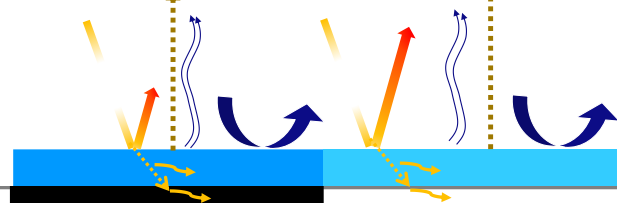
$$\varphi_{CD,Réf}$$

Réf



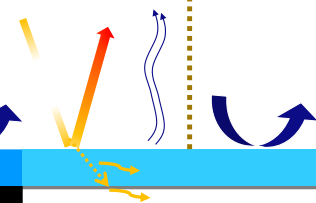
$$\varphi_{CD,CR}$$

CR



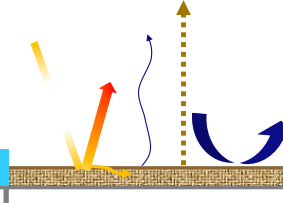
$$\varphi_{CD,RPB}$$

RPB



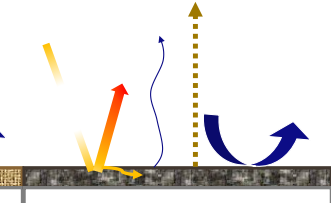
$$\varphi_{CD,RPC}$$

RPC



$$\varphi_{CD,MP}$$

MP



$$\varphi_{CD,Gr}$$

Gr



# Bassin de toiture – effet de l'eau



La Rochelle

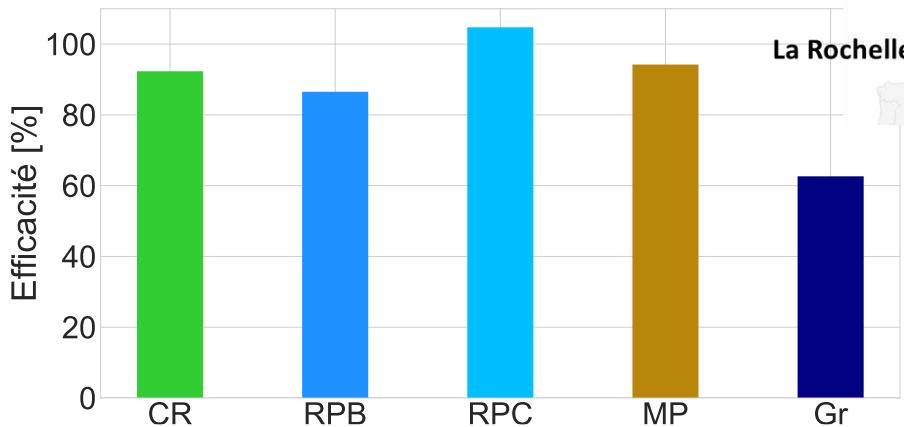
## Réduction du flux thermique du toit

Gains énergétiques de climatisation

$$\text{Efficacité} = 1 - \frac{\int_t \varphi_i}{\int_t \varphi_{i,\text{Réf}}}$$

entre 62 et 105 %

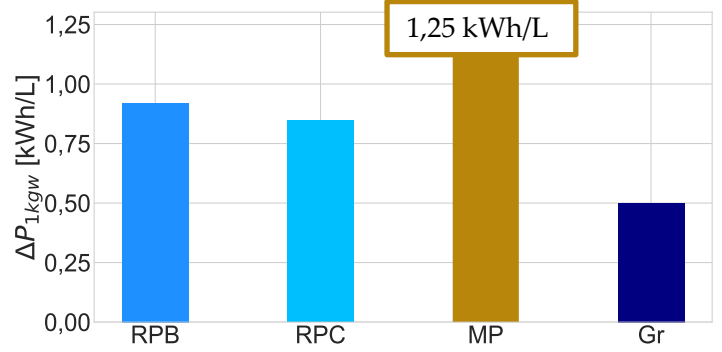
RPC le plus efficace (> 100 %)



## Efficacité relative à la conso d'eau

$$\Delta P_{1\text{kgw}} = \frac{\Delta B}{C_w}$$

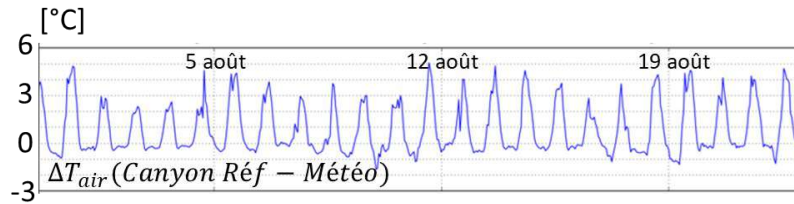
MP matériaux poreux le plus efficace





# Végétalisation des surfaces

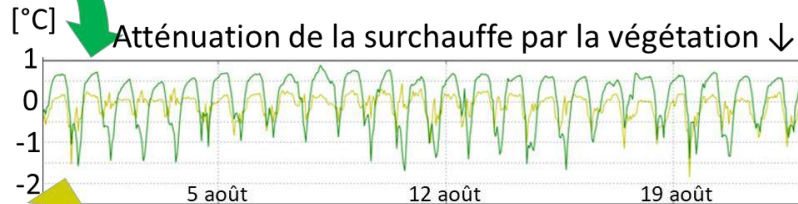
Façade végétale - effets de puit de chaleur



Confinement thermique canyon « minéral » ↑

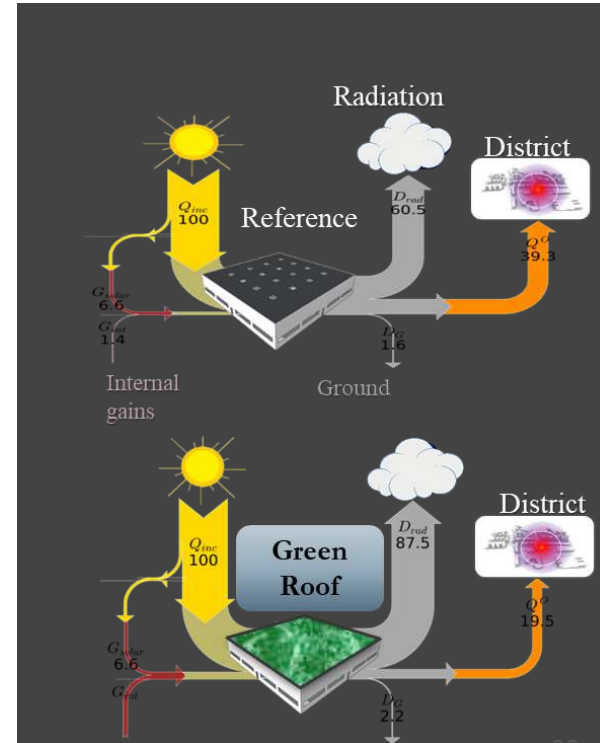


$\Delta T_{airCanyon}(Façade\ vég - Réf)$



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

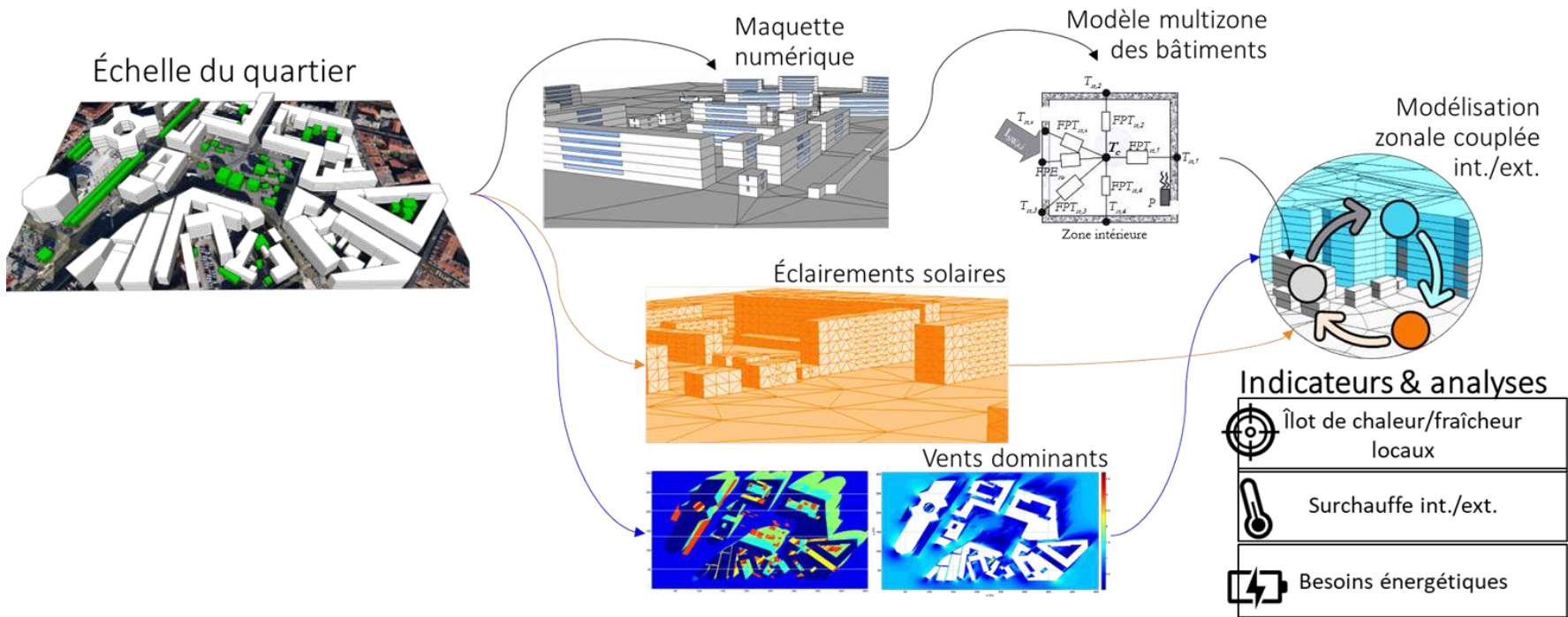
Bilan bâtiment & ICU





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

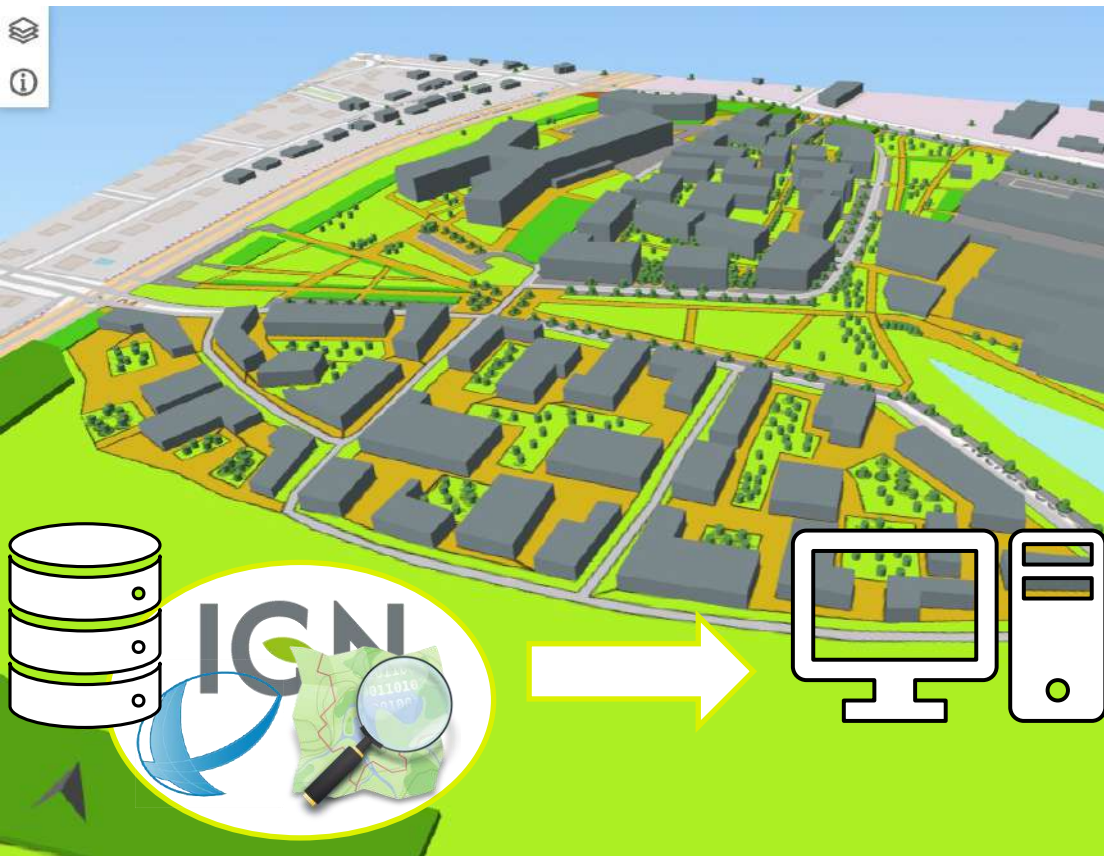
Approche de modélisation détaillée – bâtiments multizones



# Étude quartier – maquette numérique

Quartier Atlantech (Lagord) - 2050

Étude d'ombrage



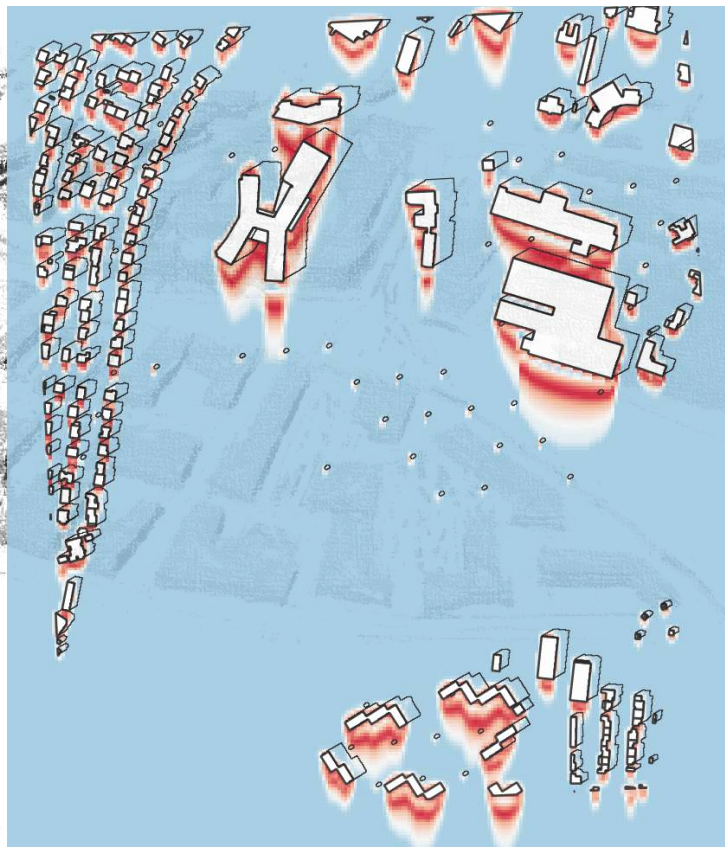
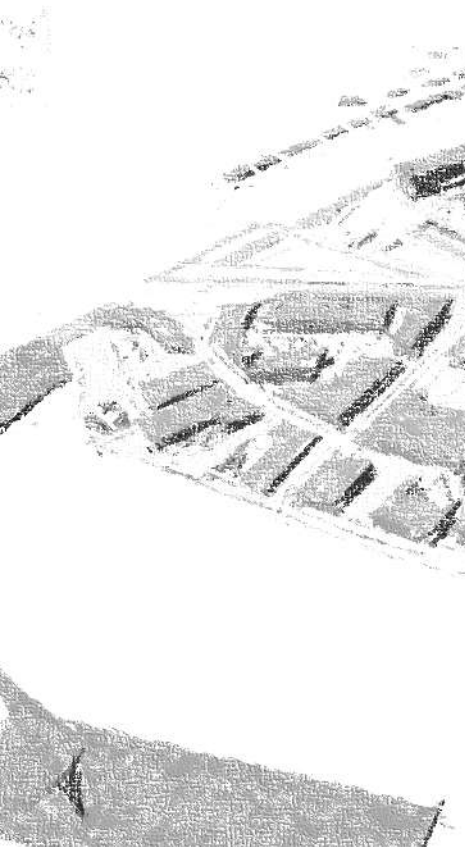


# Étude quartier – simulation physique

Quartier Atlantech (Lagord) - 2050

Vitesse du vent

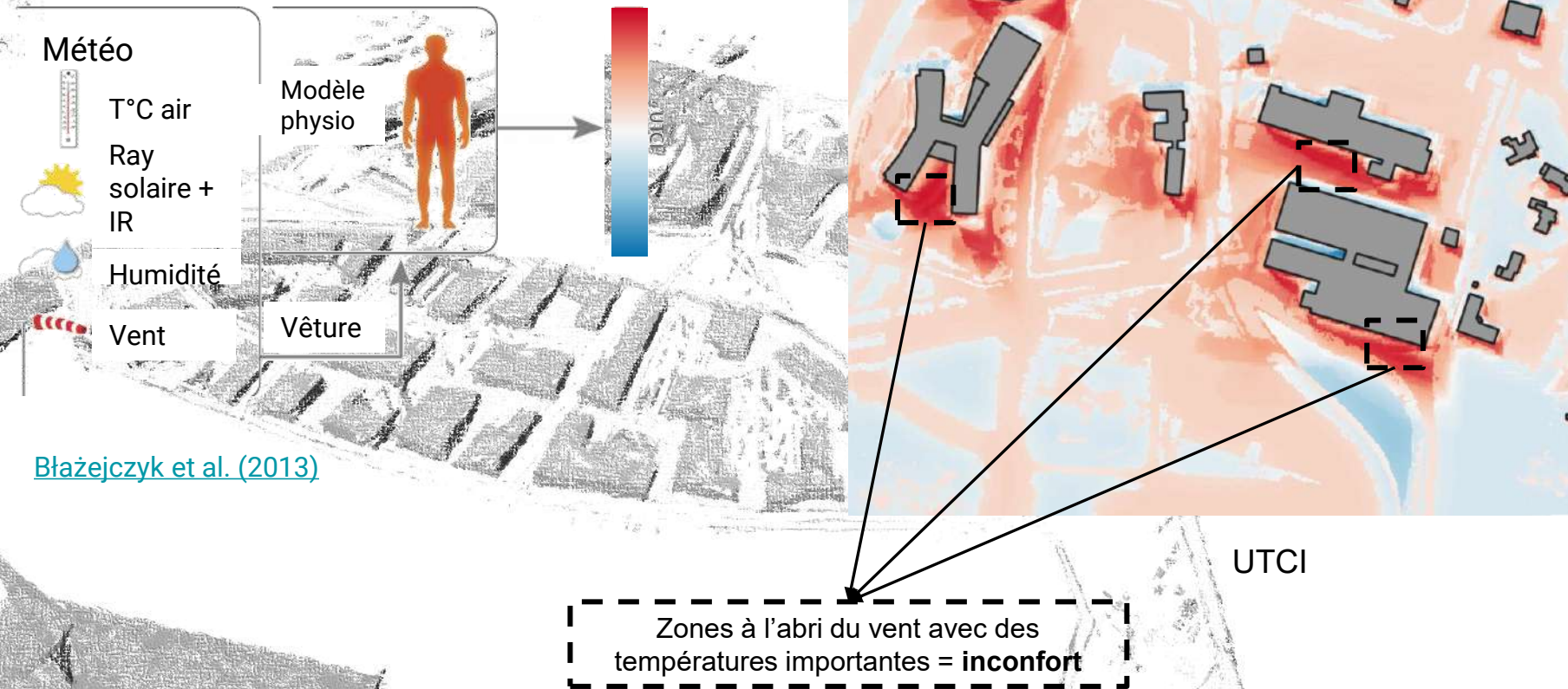
Températures de surface





# Étude quartier – étude du stress thermique vs. ombrages

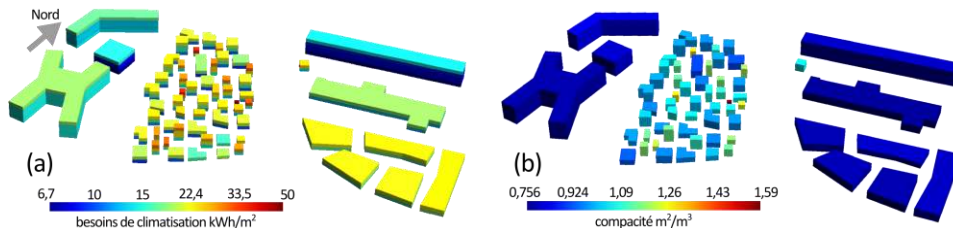
Quartier Atlantech (Lagord)



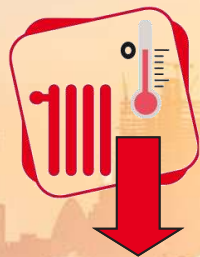


# Apports anthropiques – ICU – et besoins énergétique

Lagord



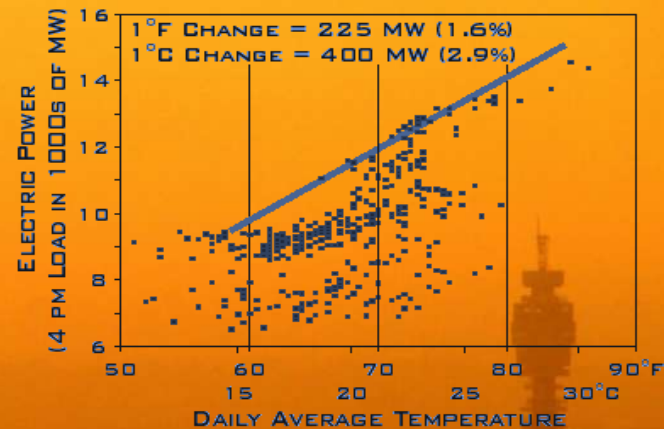
Londres



- 22 %  
de chauffage



+25 %  
de climatisation



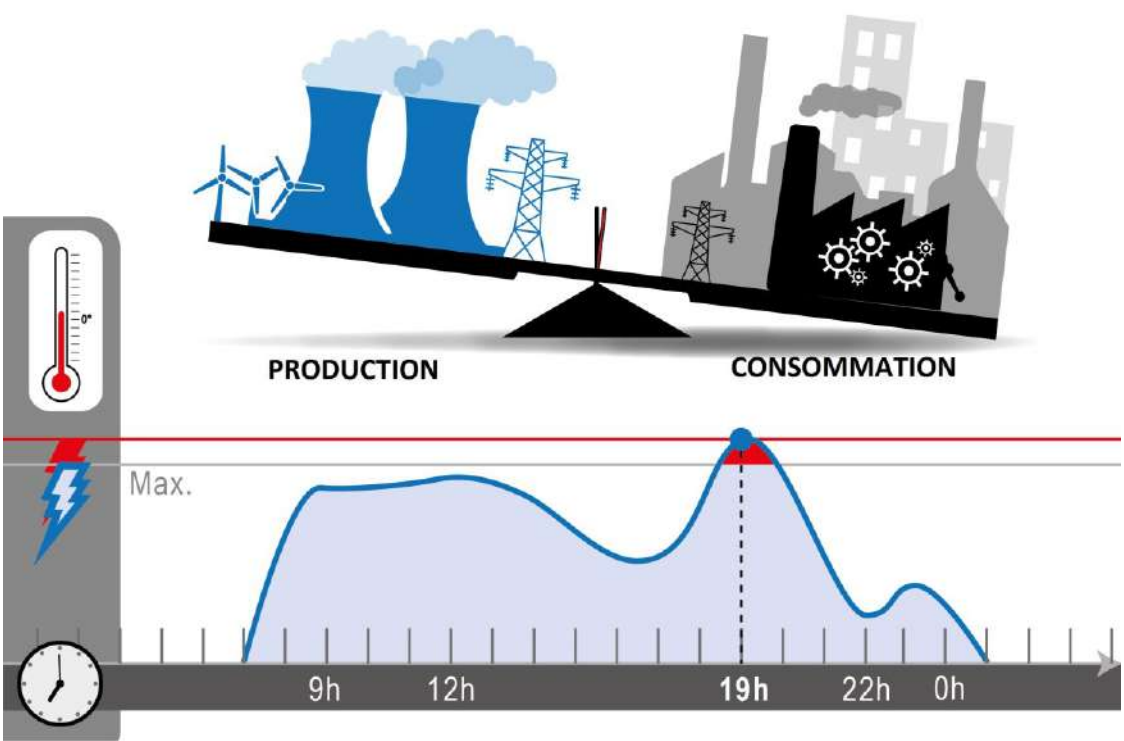


# III. Adaptation des quartiers

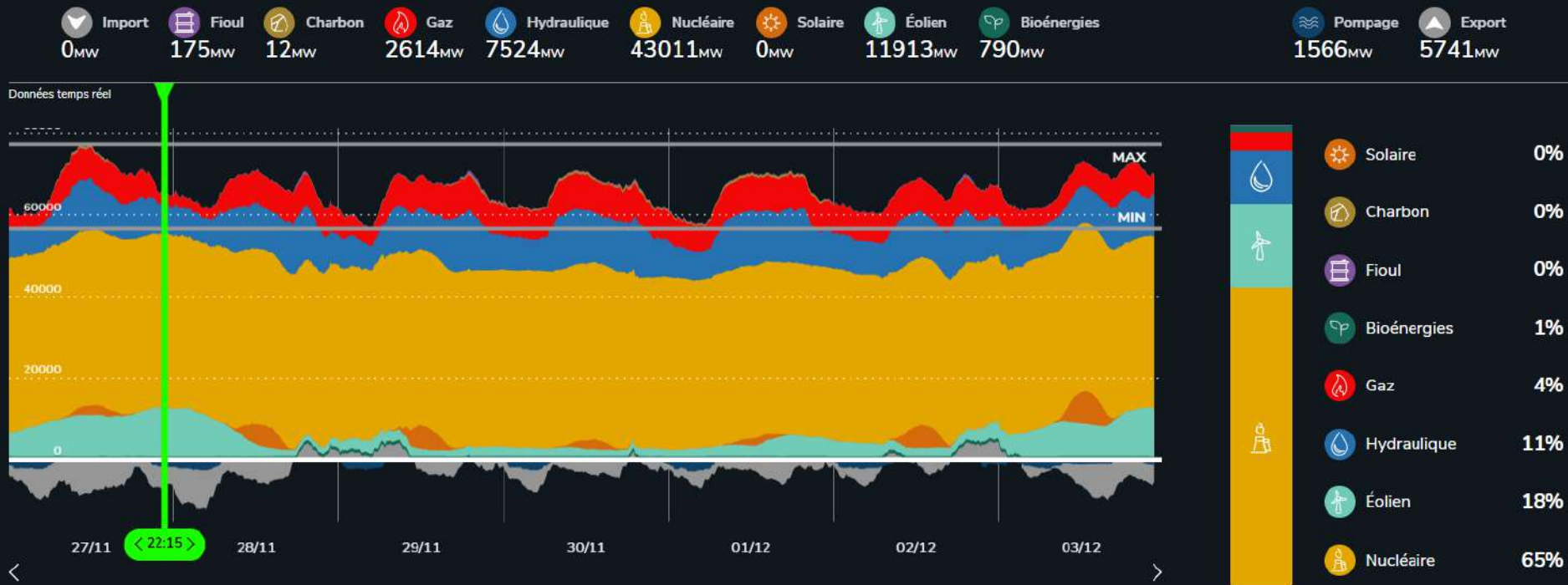
## III.b Gestion collective de l'énergie



# La production d'électricité en France en 2023



# La production d'électricité en France en 2023



# La production d'électricité en France en 2023






Source : Base de données Carbone, Ademe

# Focus sur la technologie photovoltaïque

## Photovoltaïque et émissions de GES :

Le rôle des filières de production (hypothèse de panneaux polycristallins)

- Chine : 35 g<sub>CO2eq</sub>/kWh  (85% du marché en Europe)
- EU : 26 g<sub>CO2eq</sub>/kWh 
- France : 20 g<sub>CO2eq</sub>/kWh 

+ Plus de variantes :

<https://viewer.webservice-energy.org/incr-acv/app/incr-acv/app>

+ Un jeu sérieux : Solaropolis



# Focus sur la technologie photovoltaïque

## Photovoltaïque et émissions de GES :

Quelles sont les émissions évitées par la production photovoltaïque ?

### Méthode attributionnelle moyenne :

« Lorsqu'un panneau PV produit, il remplace les moyens de production **proportionnellement** à leurs niveaux de production actuels »

⇒ poids carbone de l'électricité du réseau en 2019 (pendant production PV)  $\approx$  **40-50 g<sub>CO2</sub>/kWh**

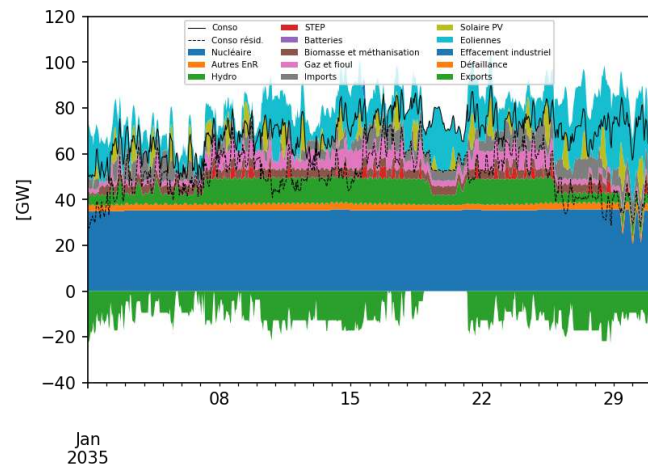
### Méthode conséquentielle court-terme :

« Lorsqu'un panneau PV produit, la production vient en remplacement des moyens **marginiaux** ».

Substitution de moyens de production carboné EU :

- 75% en 2019 selon RTE
- 89% en 2030 selon Artelys

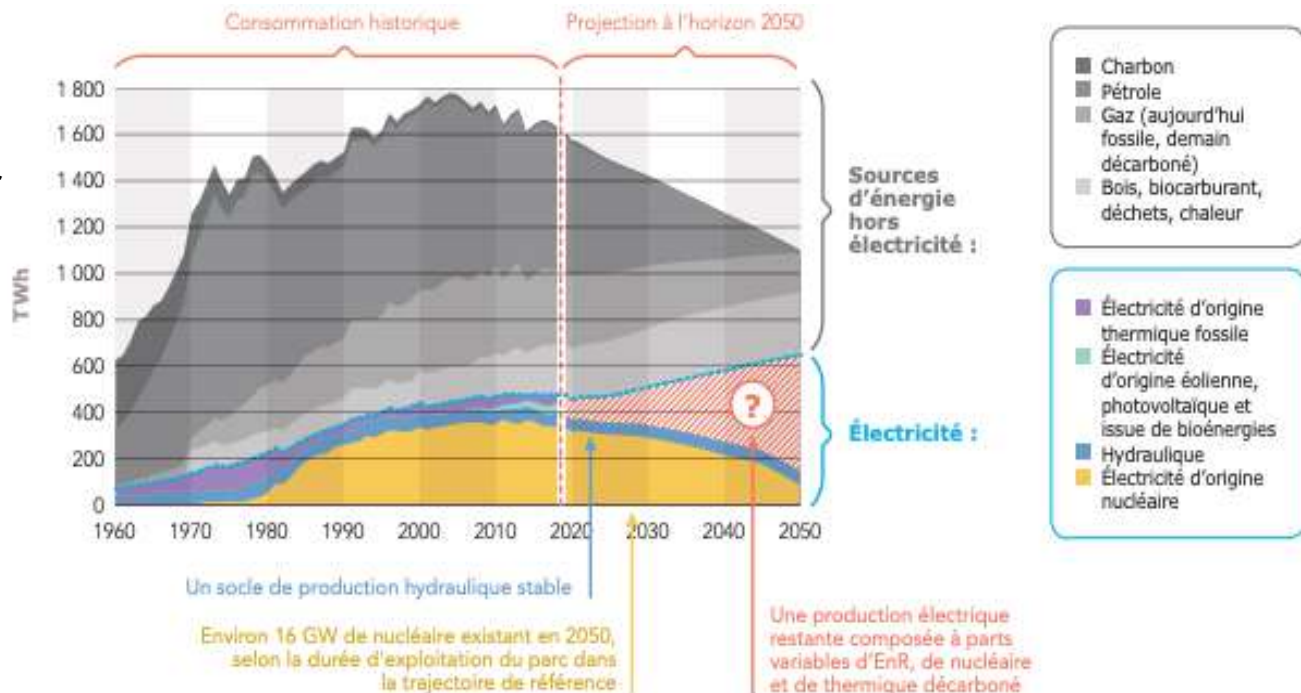
⇒ poids carbone autour de **200-400 g<sub>CO2</sub>/kWh**



# La production d'électricité en France demain ?

Problématique :

Comment se préparer à la fois à la fin de vie du parc nucléaire et l'électrification nécessaire à la décarbonation de nos mix énergétiques ?

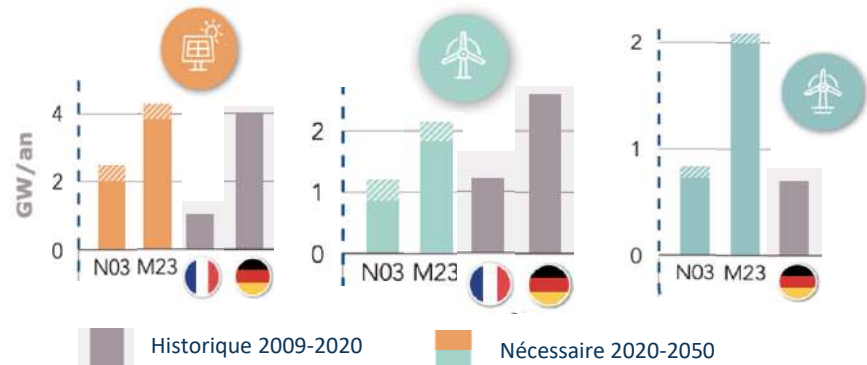


# La production d'électricité en France **demain ?**

6 scénarios étudiés par RTE, de 50% nucléaire [N03] à 100% ENRi [M23] :

- entre 70 à 125 GW de photovoltaïque (17 GW en 2023)
- vers des systèmes énergétiques décentralisés

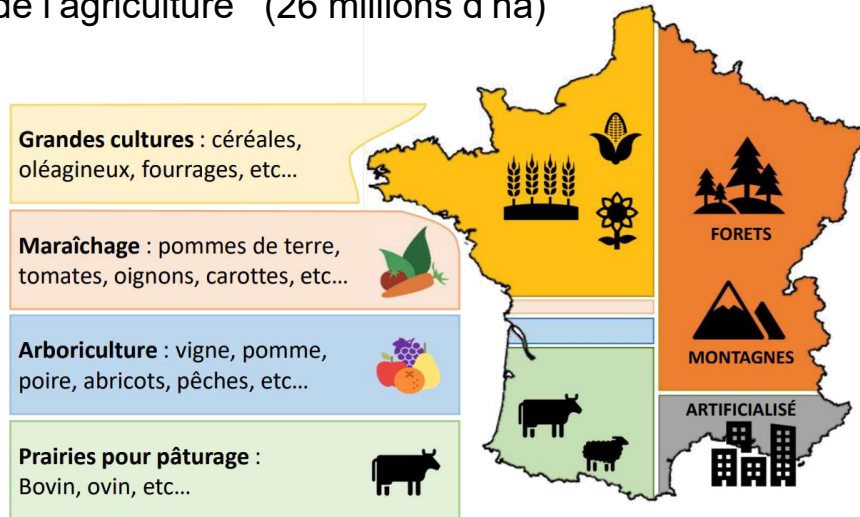
Rythme de développements ENRi :



# La production d'électricité en France demain ?

## Photovoltaïque et occupation des sols :

- Dans scénarios RTE : 100 GW  $\Rightarrow$  0,1 millions d'ha
- En France, c'est :
  - 0,2% de la surface métropolitaine (54 millions d'ha)
  - 0,6% de la forêt (17 millions d'ha)
  - 0,4% de l'agriculture (26 millions d'ha)



# Cartographies urbaines – ressources solaires

Cadastre solaire (<https://solar.namr.com/>)

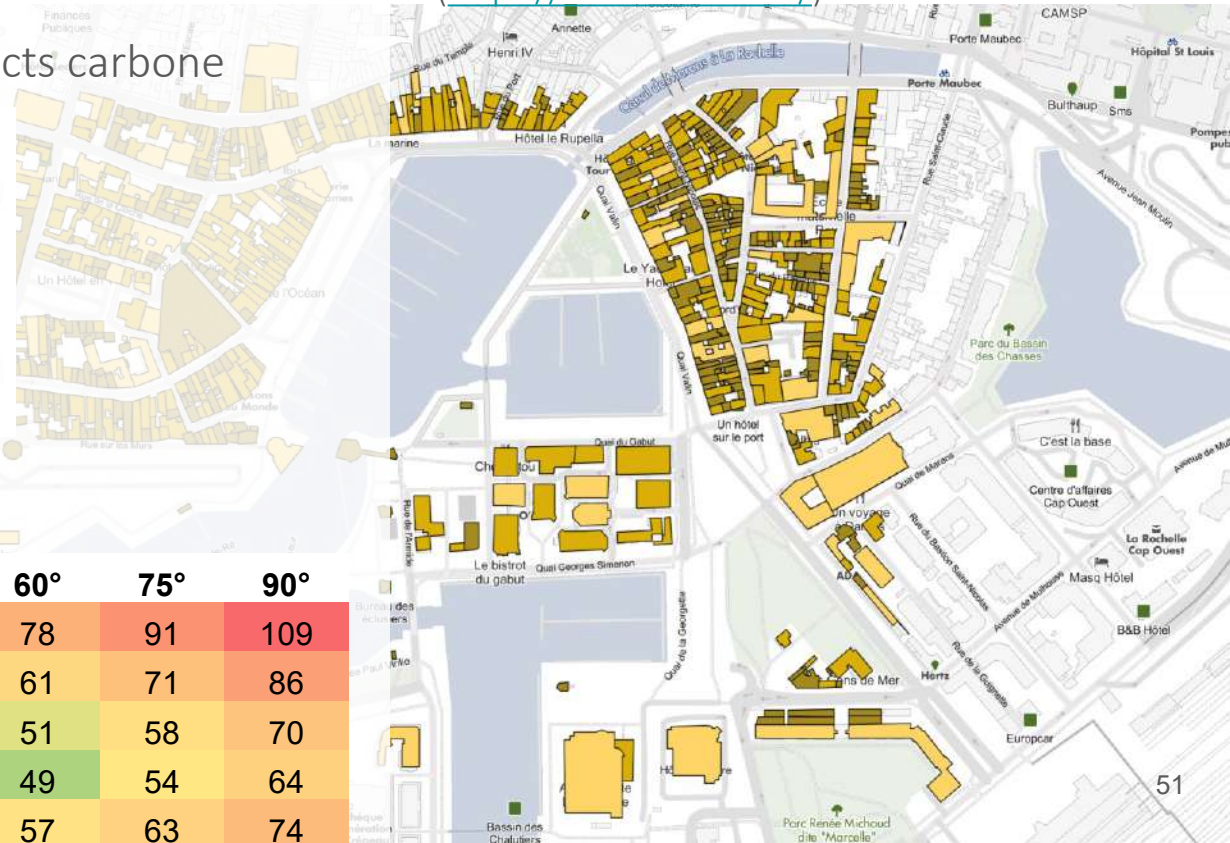
potentiel correct    potentiel bon    potentiel excellent

Conception, implantation et impacts carbone



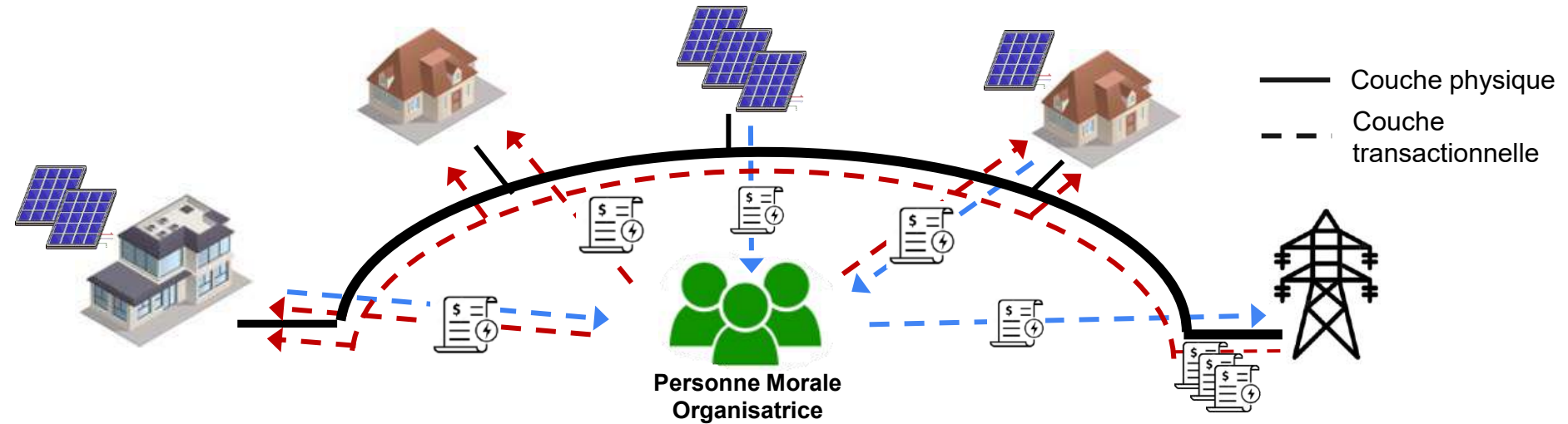
$g_{CO2eq}/kWh$

	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Est	52	56	61	68	78	91	109
Sud	52	51	52	56	61	71	86
West	52	49	50	52	57	63	74



# Photovoltaïque et bâtiments : et si on la jouait collectif ?

## L'autoconsommation collective



- Echelle spatiale (2 km en zone urbaine, 10 km en zone semi-urbaine, 20 km en zone rurale);
- PMO;
- Capacité de production totale de 3 MW par opération;
- Répartition de l'énergie par système de clés de répartition;

# Photovoltaïque et bâtiments : et si on la jouait collectif ?

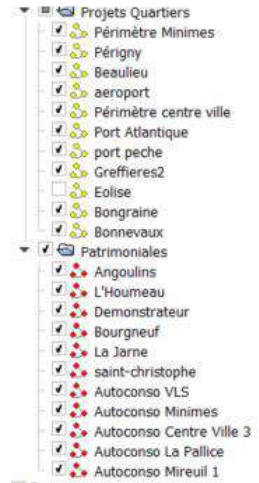
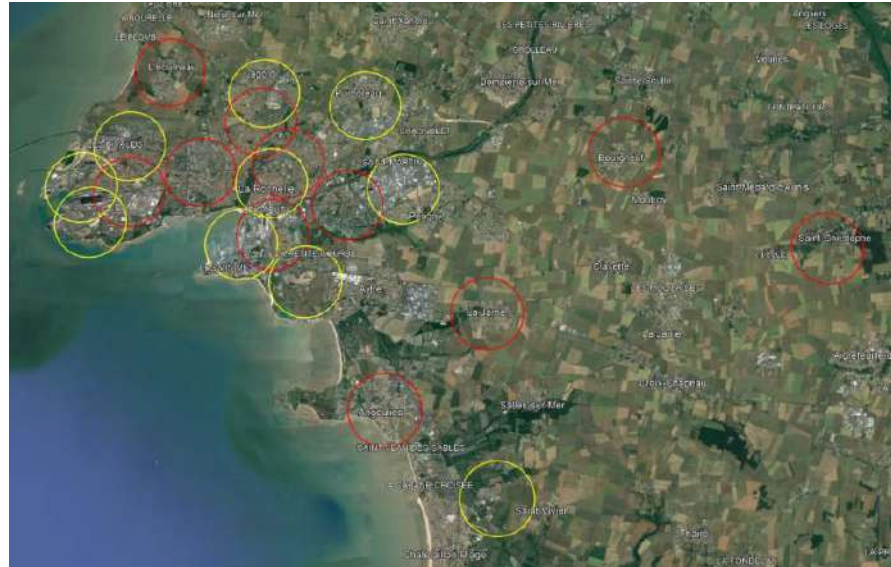
## L'autoconsommation collective

Quelques chiffres (T3 2023) :

- 259 opérations actives en France
- 23 opérations actives en Nouvelle-Aquitaine
- En moyenne, 2 producteurs et 13 consommateurs

Source :

<https://observatoire.enedis.fr/thematique/autoconsommation/indicateurs>

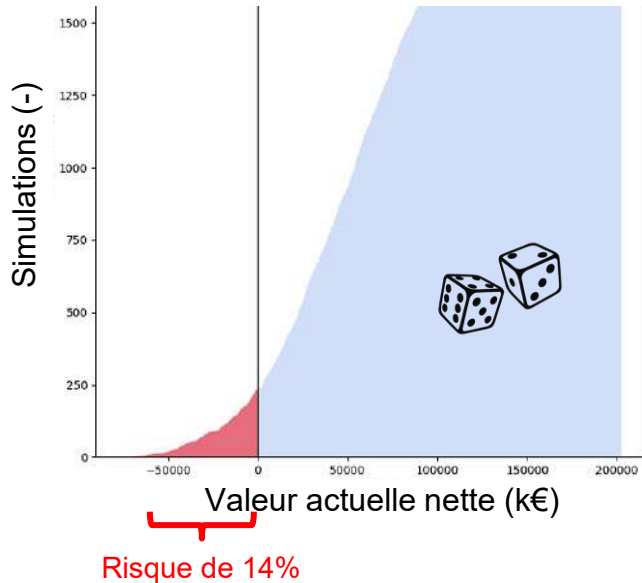


# Photovoltaïque et bâtiments : et si on la jouait collectif ?

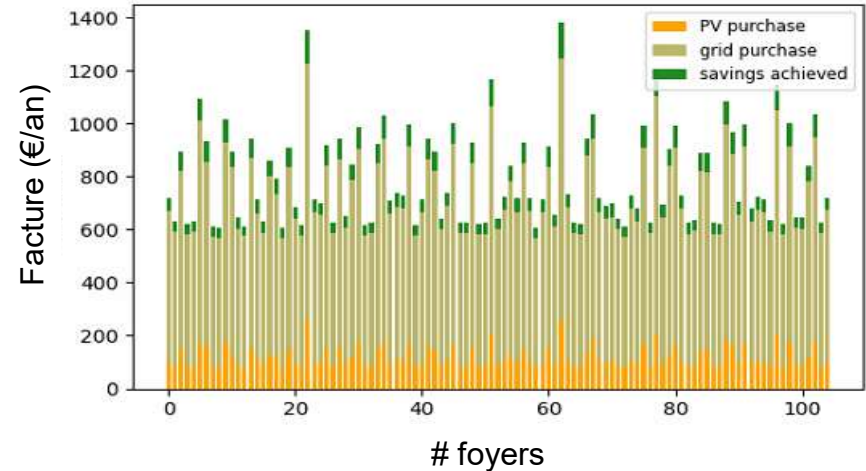


## Intérêt économique :

- Côté investisseur : évaluer le risque



- Côté participants : se protéger des variations de prix



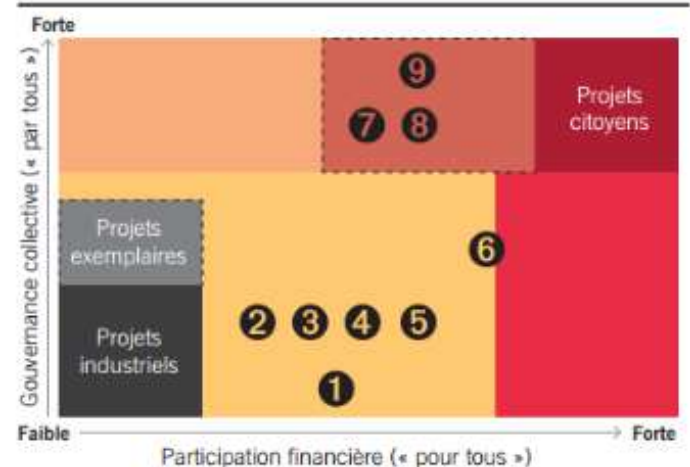
# Photovoltaïque et bâtiments : et si on la jouait collectif ?

## Intérêt social :

- Dimension humaine et démocratique autour de l'énergie (entre solution individuelle et grands projets de production)
- Faciliter d'accès aux ENRi pour les ménages modestes ou sans accès au gisement solaire
- Rapprocher les moyens de production des centres de consommation (sensibilisation à la thématique de l'énergie)
- Grande variété de modèles participatifs

Source : *La transition énergétique par tous et pour tous : quel potentiel d'hybridation pour les projets d'énergies renouvelables ?* Andreas Rüdinger (Iddri), 2016

**Figure 2.** Classification des différents modèles participatifs

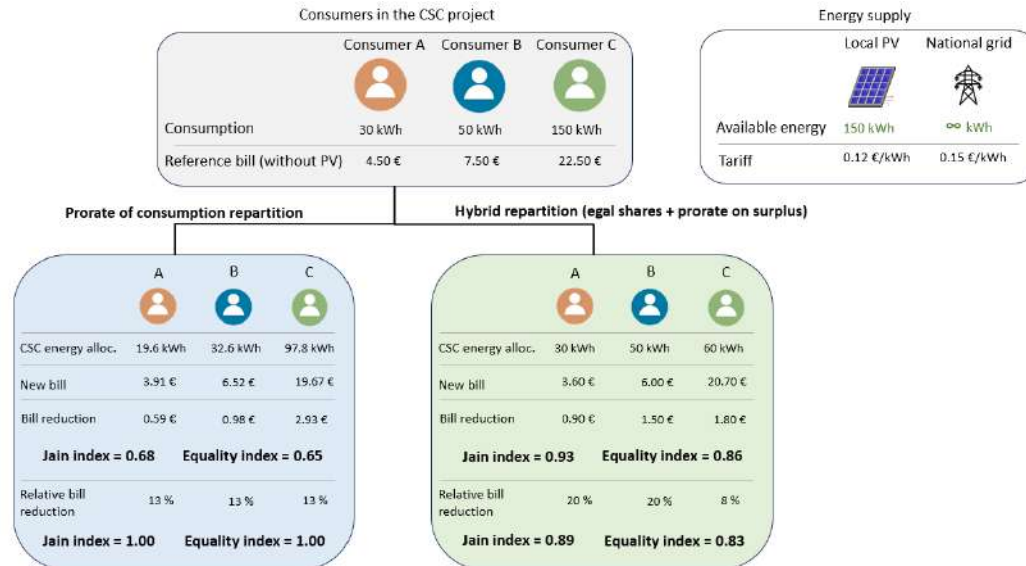


- 1 fonds d'investissement propriétaire des projets
- 2 pool restreint d'investisseurs locaux ou diffus
- 3 financement participatif en externe
- 4 financement participatif « in-house »
- 5 partenariats avec banques locales
- 6 service de développement spécifique
- 7 création de coopératives locales
- 8 sociétés d'économie mixtes locales
- 9 projet local à gouvernance partagée

# Photovoltaïque et bâtiments : et si on la jouait collectif ?

## Intérêt social : La conception des clés de répartition, un enjeu d'équité

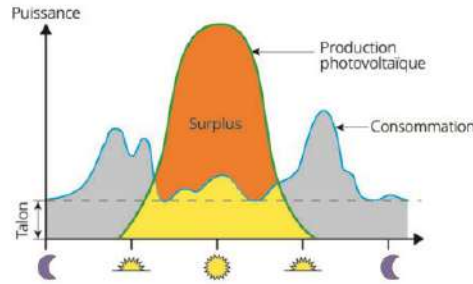
- Clés standards : fixes (égalitaire, pro-rata investissement), dynamique (pro-rata conso)
- Clés « innovantes » : hybride, optimisation (maximisation gains communauté, minimisation écarts entre participants, maximisation des plus petits gains, etc), théorie des jeux (ex: valeur de Shapley)



Source : Pawlak, S., Le Dréau, J., Inard, C., & Novel, A.. Designing renewable energy production at district scale: a sensitivity analysis. In International Conference of IBPSA. 2023

# Photovoltaïque et bâtiments : un mariage heureux ?

Dynamiques de production :



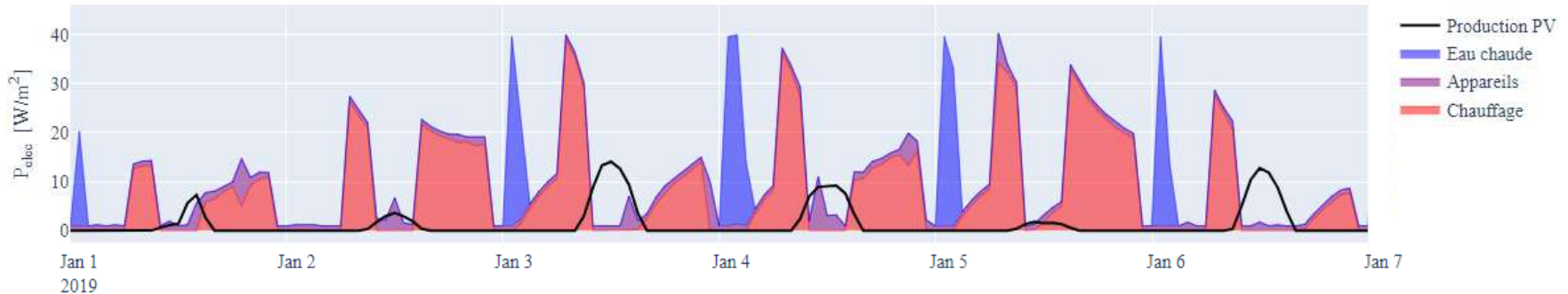
**LEXIQUE**

$$\text{Taux d'autoconsommation} = \frac{\text{Production utilisée}}{\text{Production totale}} = \frac{\text{jaune}}{\text{orange} + \text{jaune}}$$

$$\text{Taux d'autoproduction} = \frac{\text{Production utilisée}}{\text{Consommation totale}} = \frac{\text{jaune}}{\text{gris} + \text{jaune}}$$

Source : Enerfox

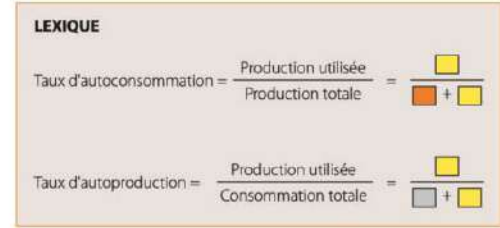
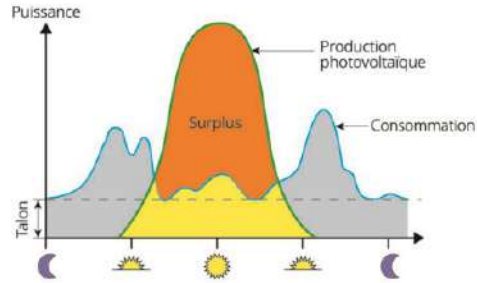
Exemple pour 1 foyer



$$T_{\text{autoconsommation}} = 19 \%$$

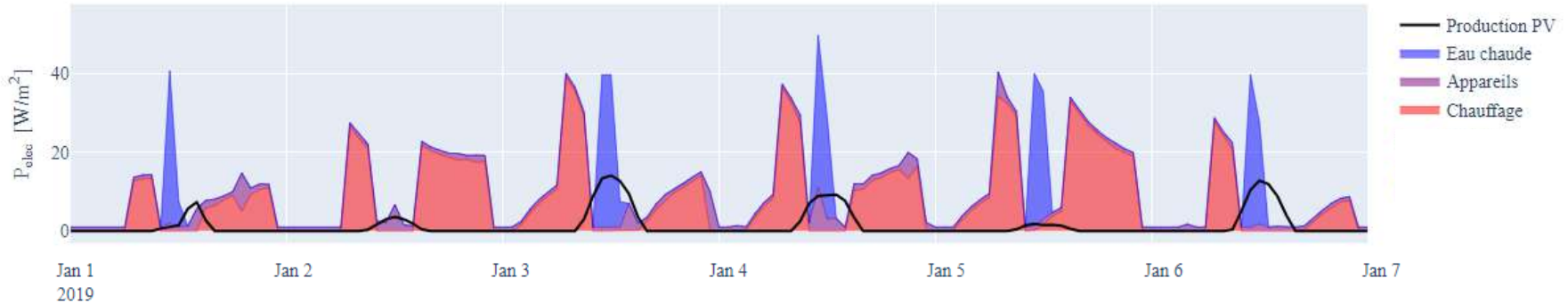
# Photovoltaïque et bâtiments : un mariage heureux ?

Dynamiques  
de production :



Source : Enerfox

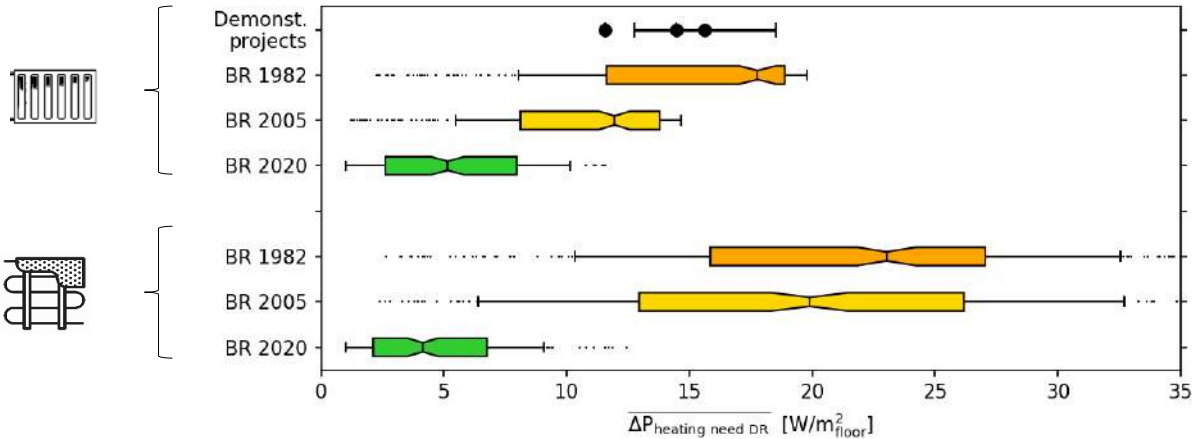
Exemple pour 1 foyer



$$T_{\text{autoconsommation}} = 40 \%$$

# Photovoltaïque et bâtiments : un mariage heureux ?

Dynamiques de production : et pourquoi pas devenir plus flexible ?



Heating need  
[kWh/m².year]



BR 1982



BR 2005

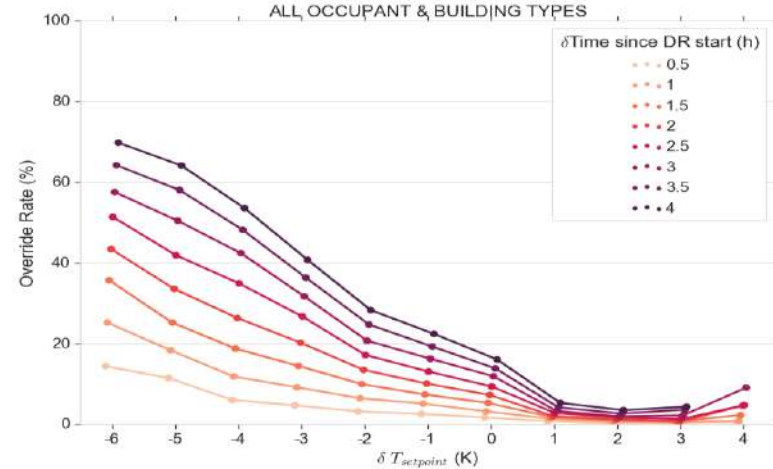
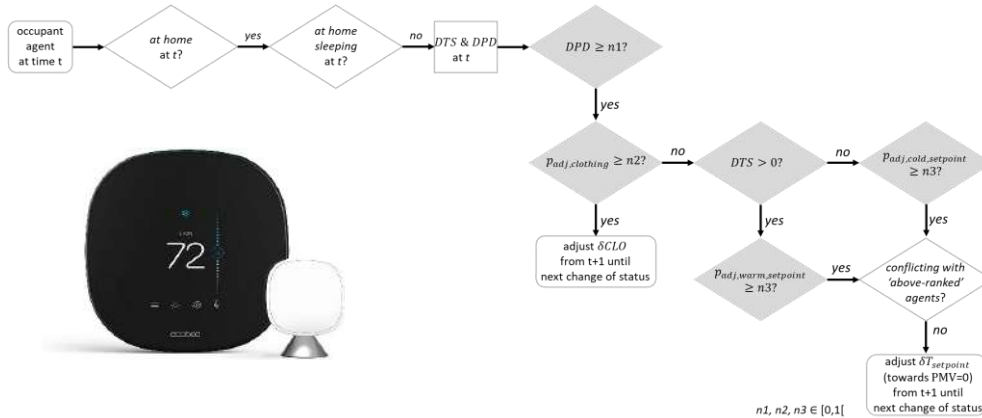


BR 2020

Sources : Le Dréau, J., Mellas, I., Vellei, M., & Meulemans, J. (2019, November). Upscaling the flexibility potential of space heating in single-family houses.

# Photovoltaïque et bâtiments : un mariage heureux ?

Dynamiques de production : et pourquoi pas devenir plus flexible ?



# Merci de votre attention



## Perspectives et Discussions

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

Échelles temporelles, dynamiques et dimensions humaines :

- Bâtiment et usages constants ?
- évolutions des techniques ?
- Adaptabilité et auto-organisation ?

- Comment comparer des solutions dans différentes localisations ?
- Solutions dépendantes du type de séquence climatique ? (canicule de 2003 pour la RE2020)
- Comment comparer des solutions présentes et futures ?