

# Couplage du modèle de canopée urbaine TEB avec le modèle radiatif SPARTACUS-Urban et évaluation avec le modèle de référence HTRDR-Urban

Robert Schoetter<sup>1</sup>, Cyril Caliot<sup>2</sup>, Robin Hogan<sup>3,4</sup>, Valéry Masson<sup>1</sup>,  
Florent Retailleau<sup>2</sup>, Vincent Forest<sup>5</sup>, Vincent Eymet<sup>5</sup>, Atsushi Inagaki<sup>6</sup>,  
William Morrison<sup>7</sup>, Simone Kotthaus<sup>8</sup>, Tim Nagel<sup>1</sup>

1) CNRM, Université de Toulouse, Météo-France/CNRS, Toulouse, France

2) LMAP, CNRS/UPPA, Anglet, France

3) ECMWF, Reading, Royaume-Uni

4) Department of Meteorology, University of Reading, Reading, Royaume-Uni

5) Mésio-Star SAS, Toulouse, France

6) Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japon

7) Umweltmeteorologie, Universität Freiburg, Freiburg, Allemagne

8) SIRTIA-IPSL, Palaiseau, France

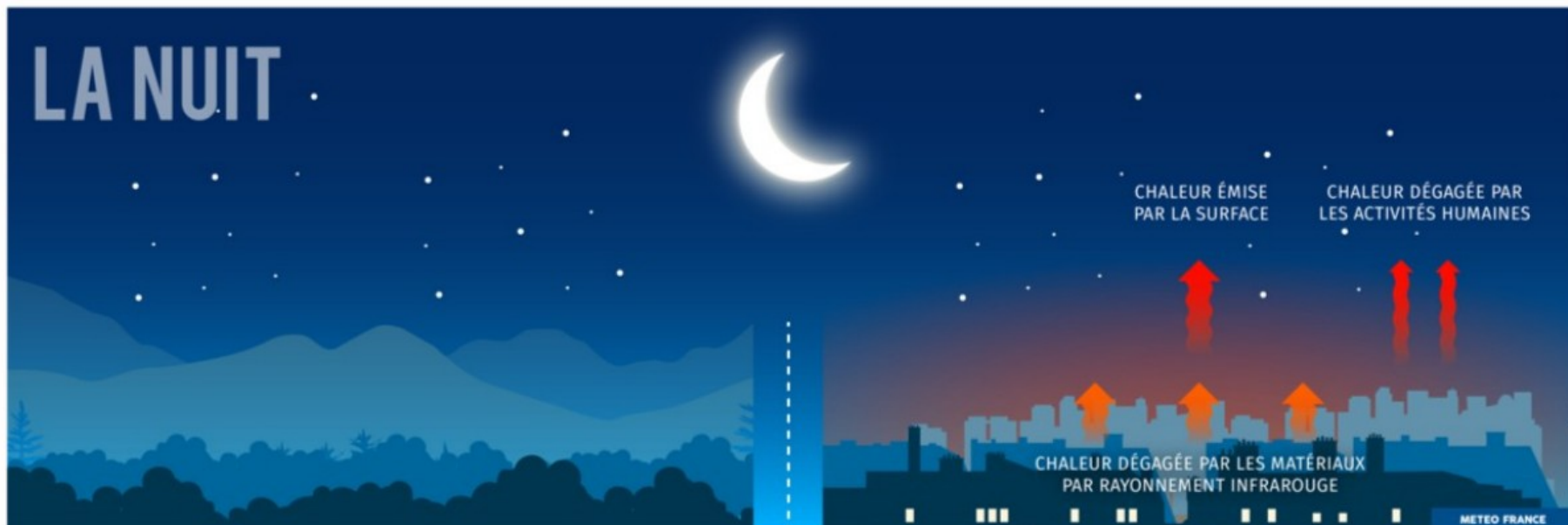
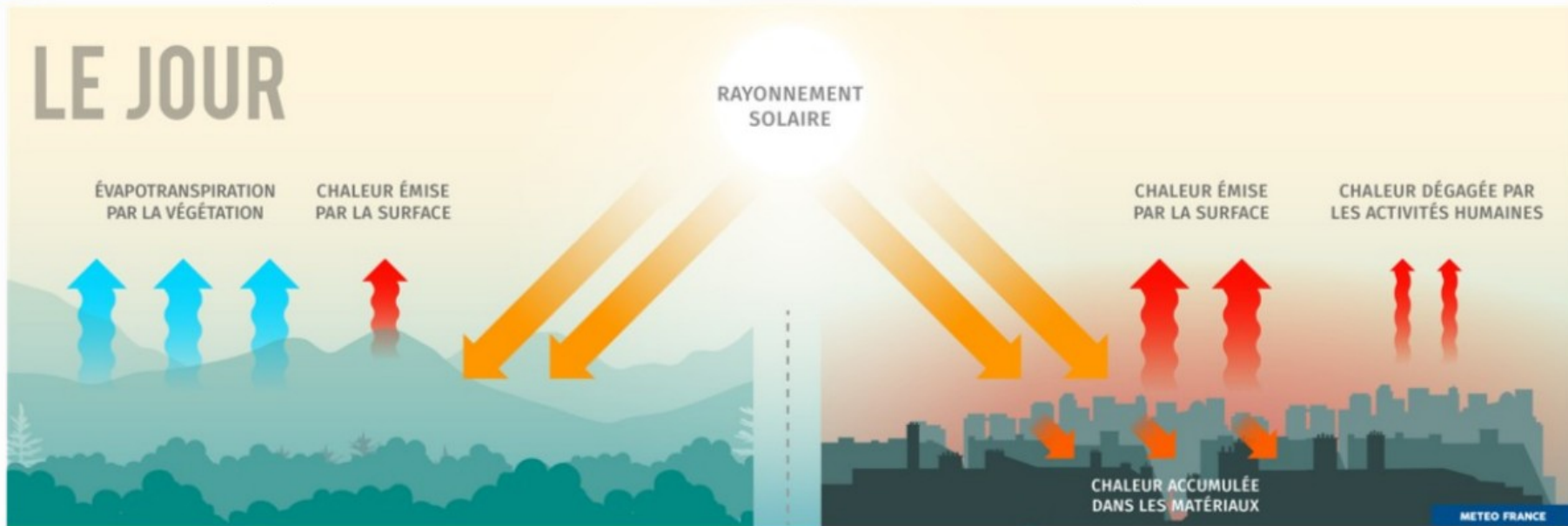
**Modélisation du climat urbain à Météo-France**

**Couplage entre TEB et SPARTACUS-Urban**

**Premiers résultats du projet ANR-MC2 : Simulations  
Monte-Carlo pour la météorologie et la climatologie**

# Modélisation du climat urbain à Météo-France

# Bilan d'énergie de surface en ville et en campagne



- **Le climat urbain**

- Îlot de chaleur urbain (ICU), surtout la nuit, jusqu'à 10 K
- Brise urbaine
- Modification des nuages et des précipitations
- Pollution de l'air

- **Effet sur les humains et les infrastructures**

- Augmentation du stress thermique et de la demande de climatisation
- Des mesures d'adaptation au changement climatique prometteuses en ville

- **Le climat urbain**

- Îlot de chaleur urbain (ICU), surtout la nuit, jusqu'à 10 K
- Brise urbaine
- Modification des nuages et des précipitations
- Pollution de l'air

- **Effet sur les humains et les infrastructures**

- Augmentation du stress thermique et de la demande de climatisation
- Des mesures d'adaptation au changement climatique prometteuses en ville

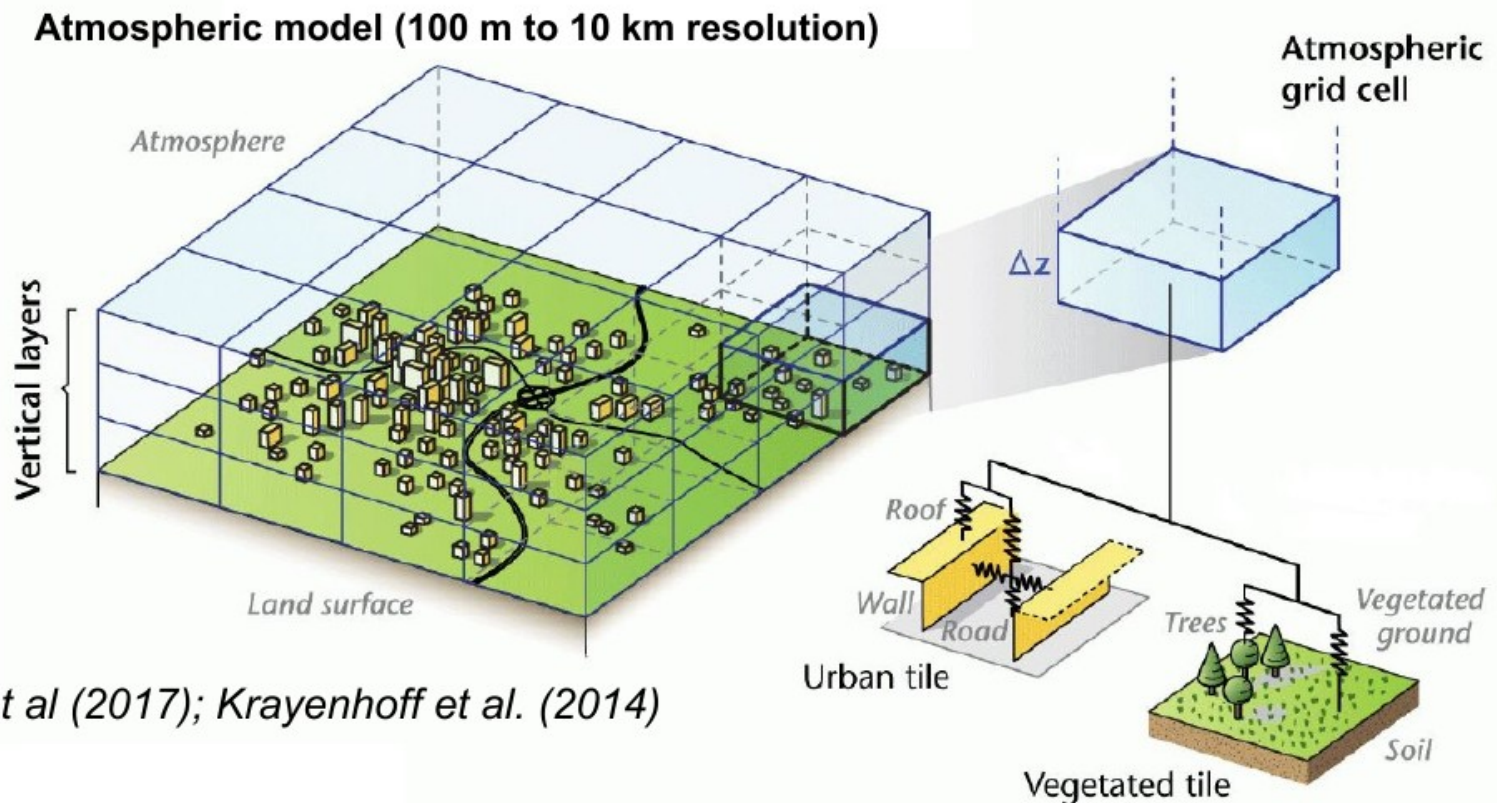
## Pourquoi représenter les villes dans les modèles météorologiques ?

- Études de processus
- Amélioration de la prévision numérique et des modèles de climat régional
- Quantification d'impacts et de mesures d'adaptation

# Comment représenter les villes dans les modèles atmosphériques ?

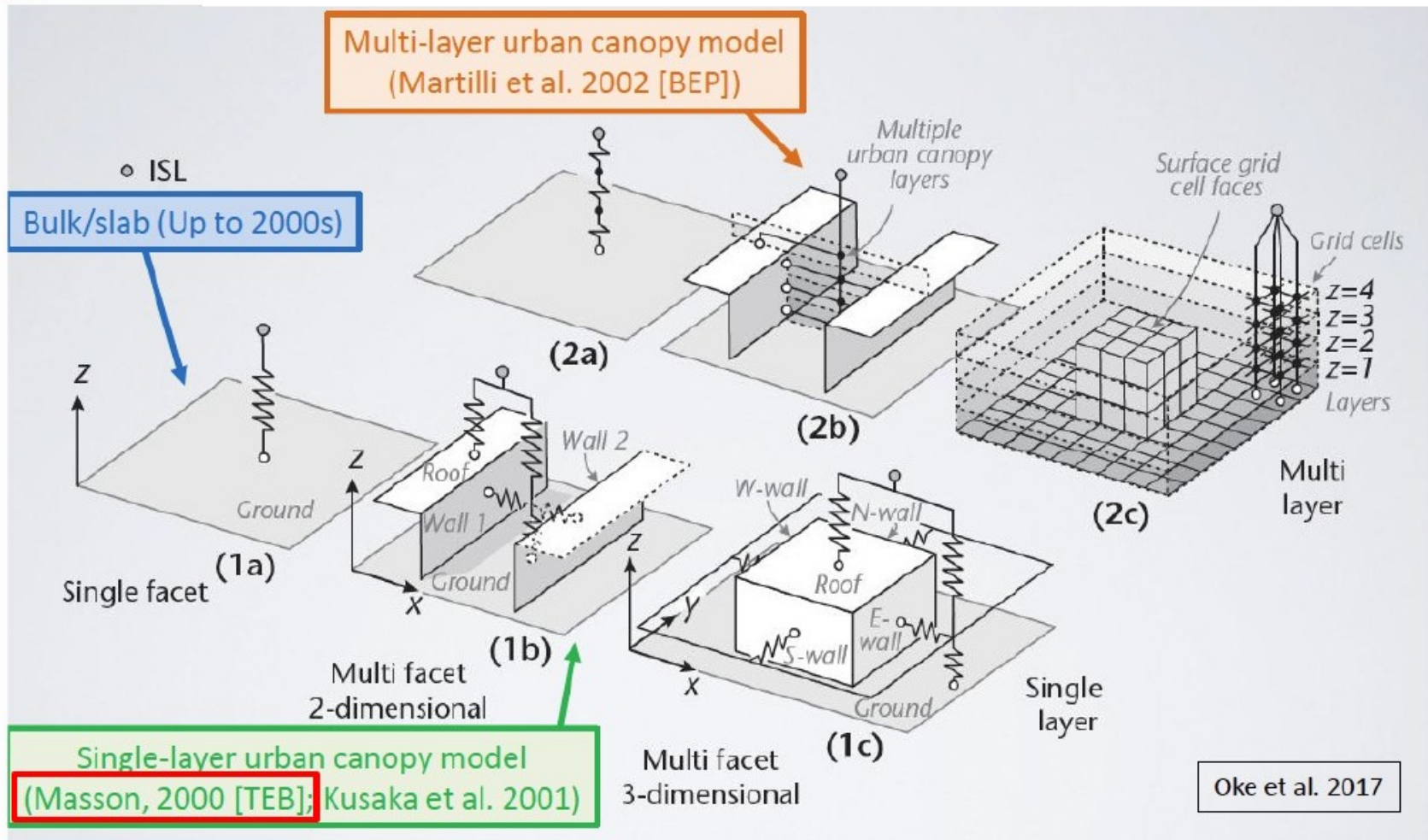
Surface energy and momentum balance in cities must be represented

This can be done with Urban Canopy Models (UCM)



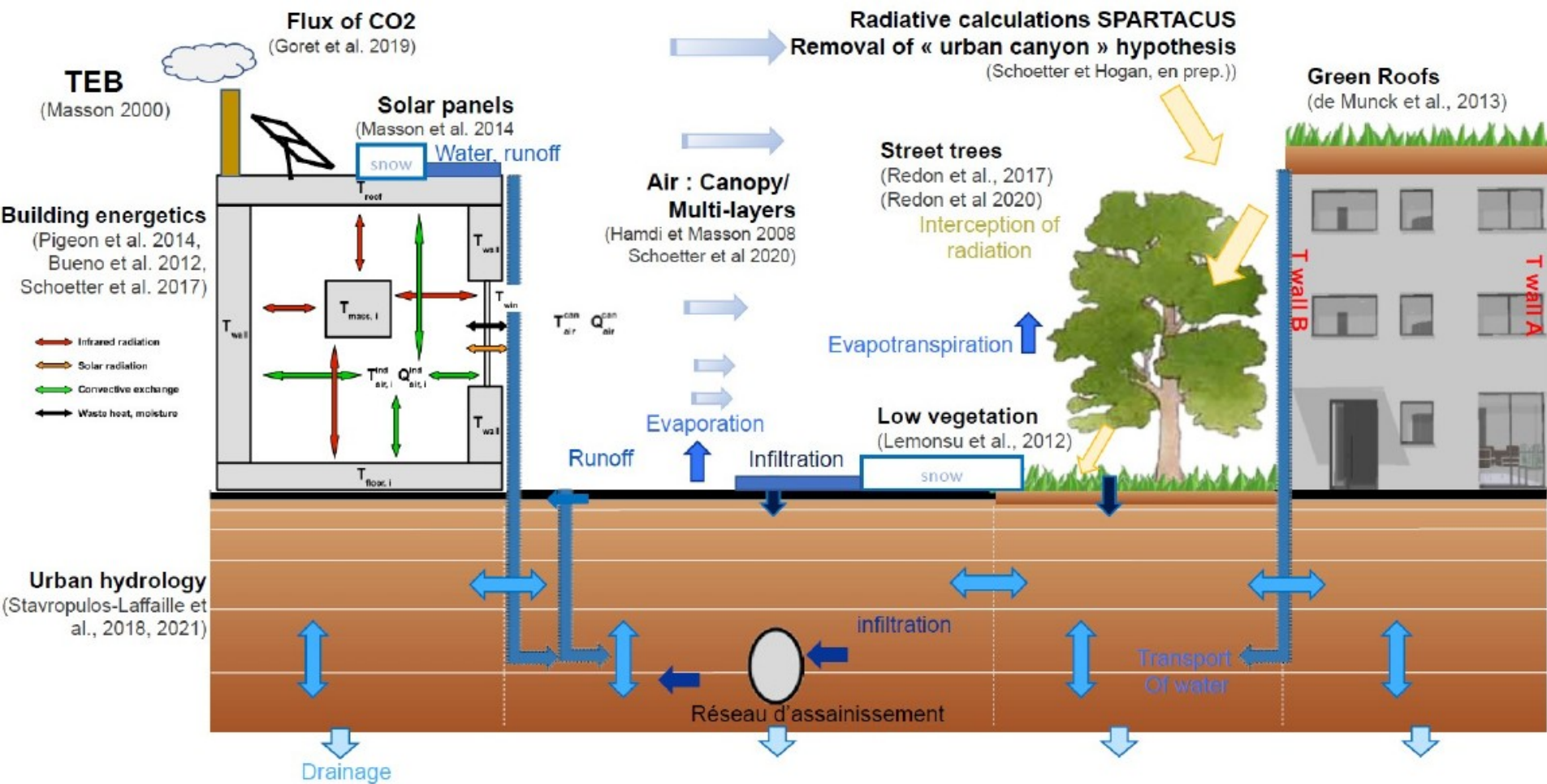
Oke et al (2017); Krayenhoff et al. (2014)

# Des modèles de canopée urbaine de différente complexité



**None of these UCM explicitly resolve all the buildings!**

# Le modèle de canopée urbaine TEB

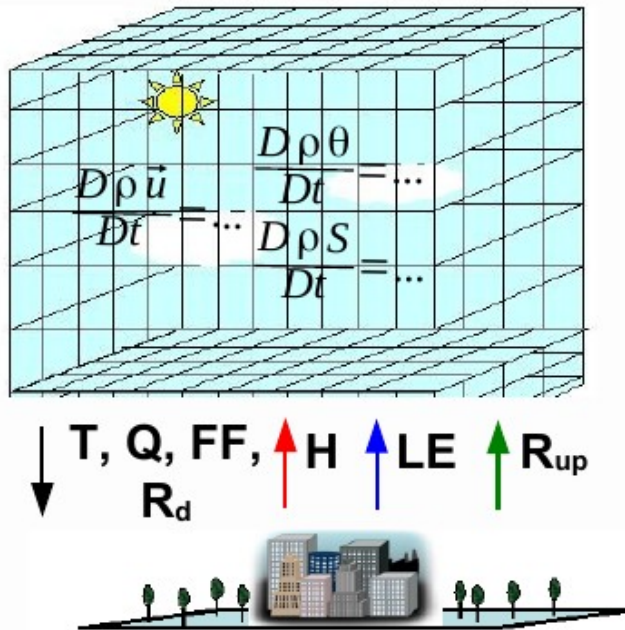


Source : Masson (2021)

# Couplage entre TEB et les modèles atmosphériques

Méso-NH/AROME/...

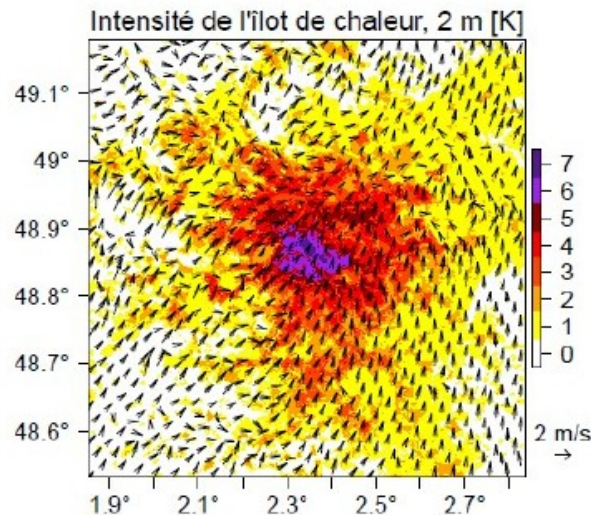
TEB



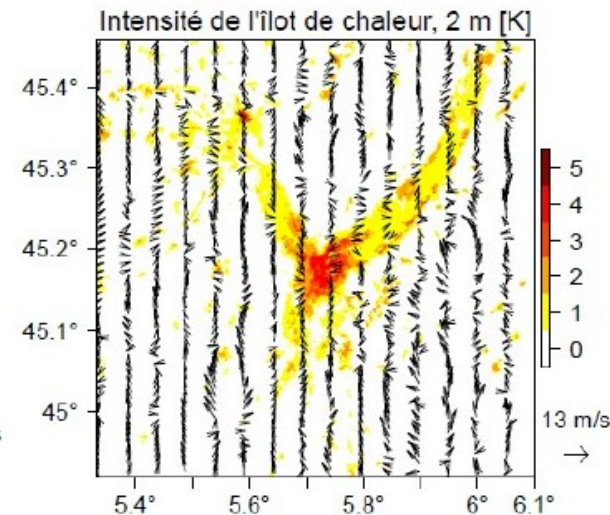
- **Méso-NH/AROME/...**: Résout les équations de conservation dans l'atmosphère
- **TEB**: Résout le bilan d'énergie en ville en supposant une rue-canyon infinie

# Exemple : îlot de chaleur urbain nocturne simulé par Meso-NH-TEB à 250 m de résolution

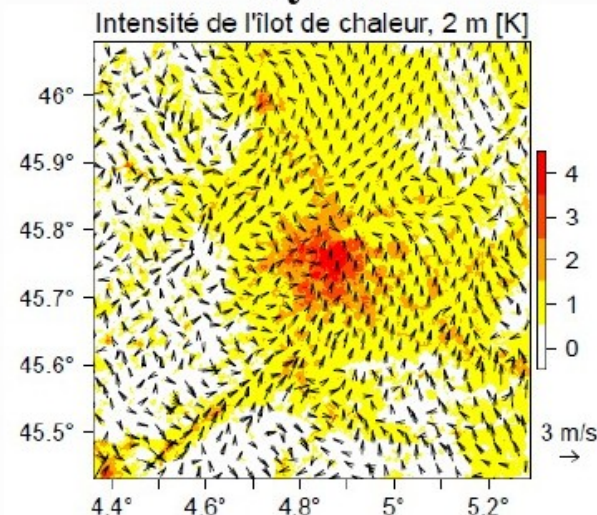
**Paris**



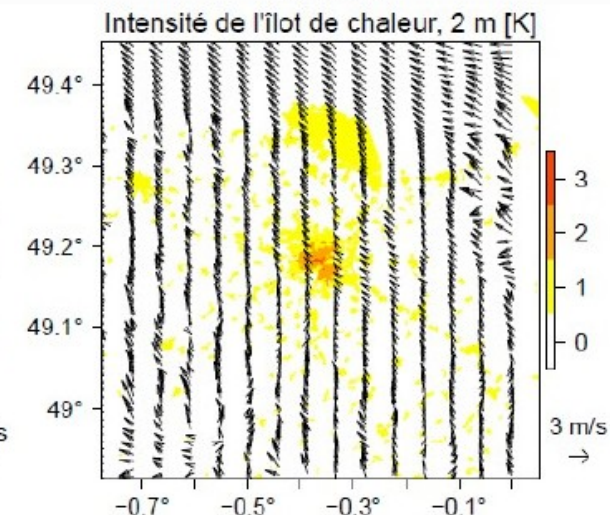
**Grenoble**



**Lyon**

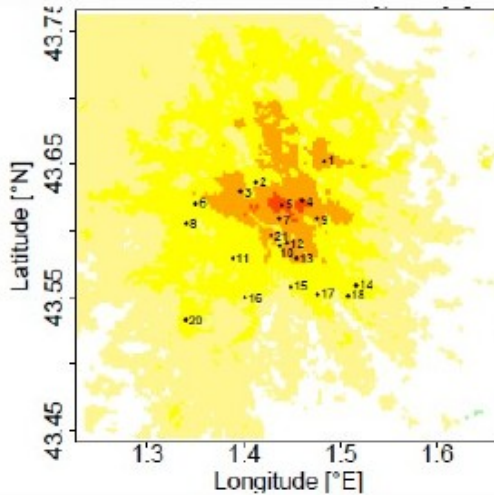


**Caen**

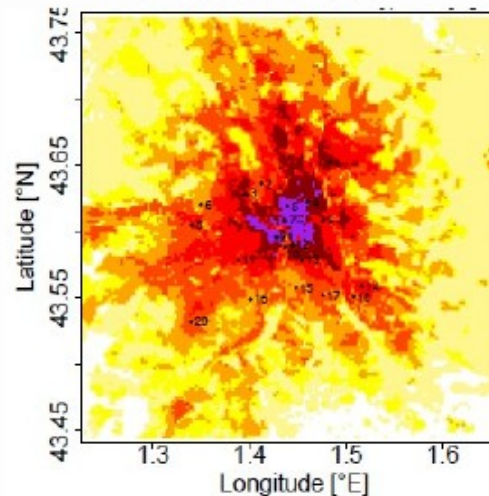


# Exemples d'application de TEB

ICU, situation nuageuse et ventée



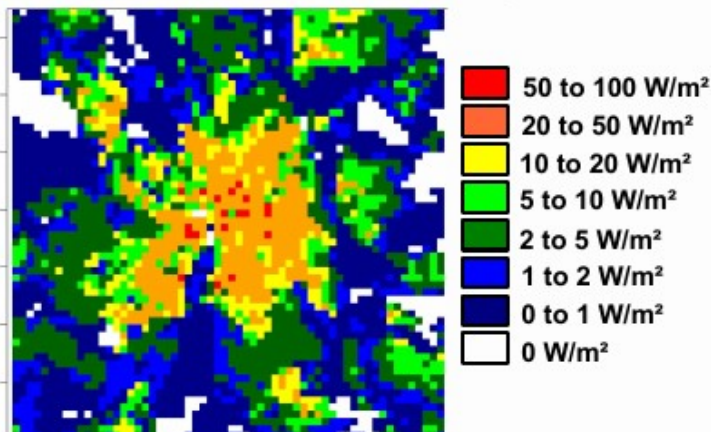
ICU, situation ensoleillée à vent faible



Intensité de l'ICU (2 m)

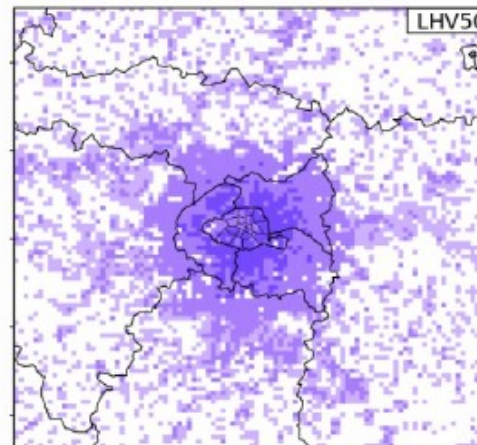


Flux de chaleur dû au chauffage



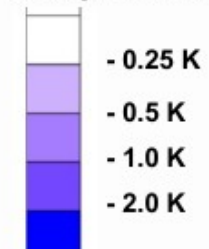
Schoetter et al., 2017

Effet potentiel de la végétalisation



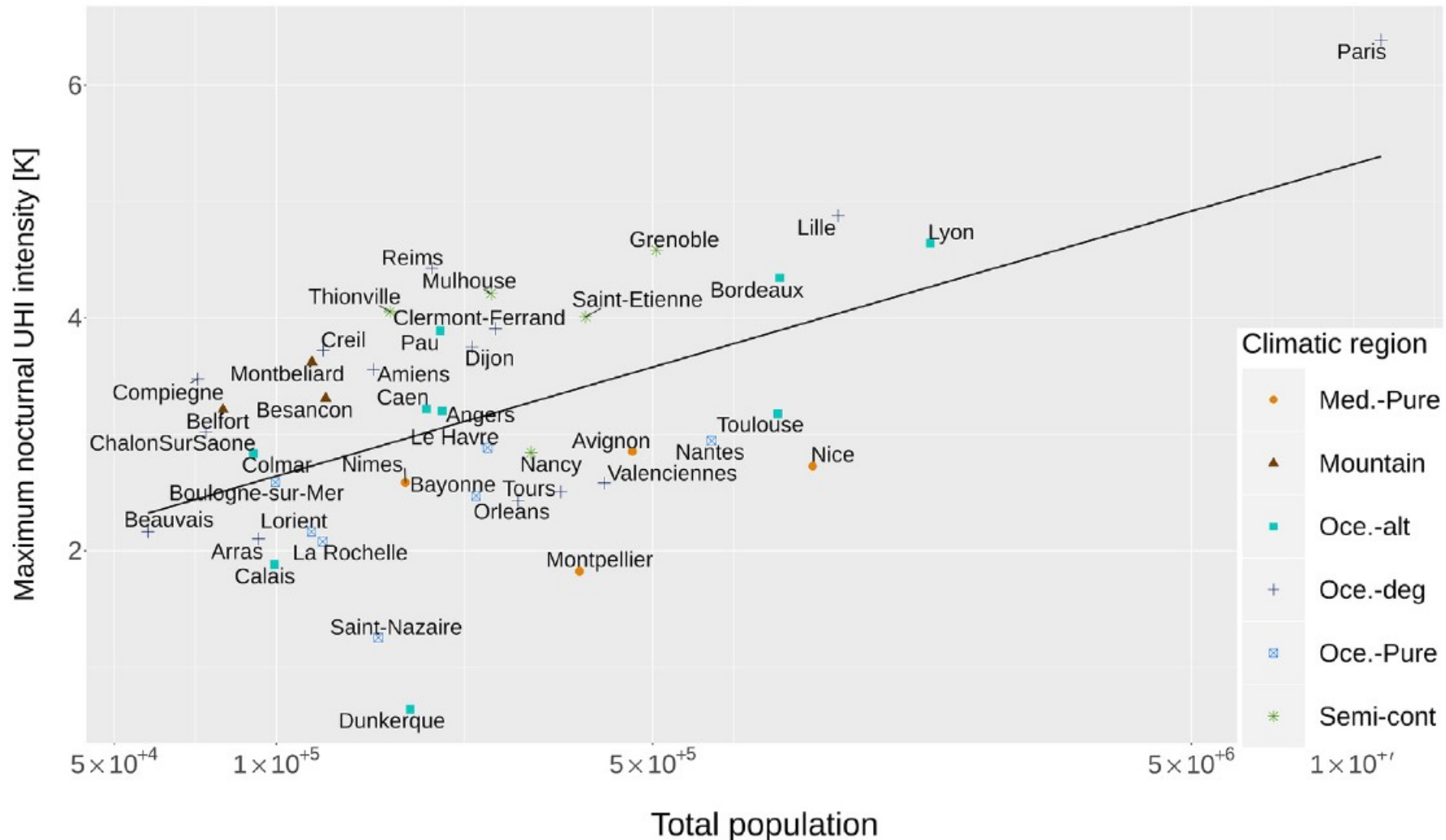
De Munck et al., 2018

Différence de température



# Exemples d'application de TEB

## - Îlot de chaleur urbain maximal, villes françaises

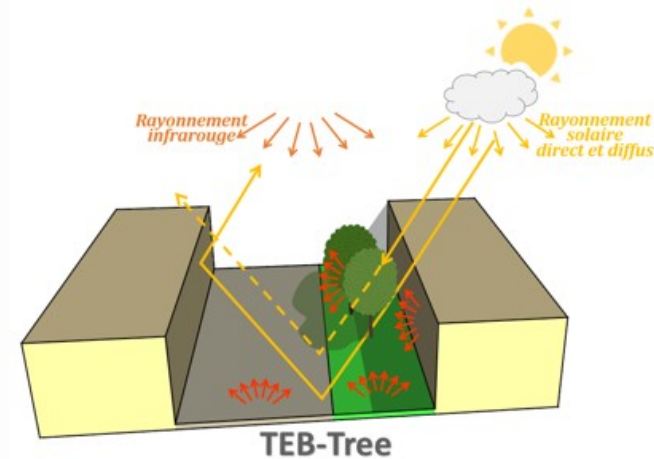


Gardes et al. (2020)

# Couplage entre TEB et SPARTACUS-Urban

# Les modèles de canopée urbaine simplifient la géométrie urbaine et le transfert radiatif

- **Simplification de la géométrie urbaine**
  - Rue-canyon de longueur infinie
  - Blocs de surface carrée ou rectangulaire
  - Hauteur de bâtiment uniforme par maille



Echanges radiatifs dans TEB  
(Redon et Lemonsu, 2020)

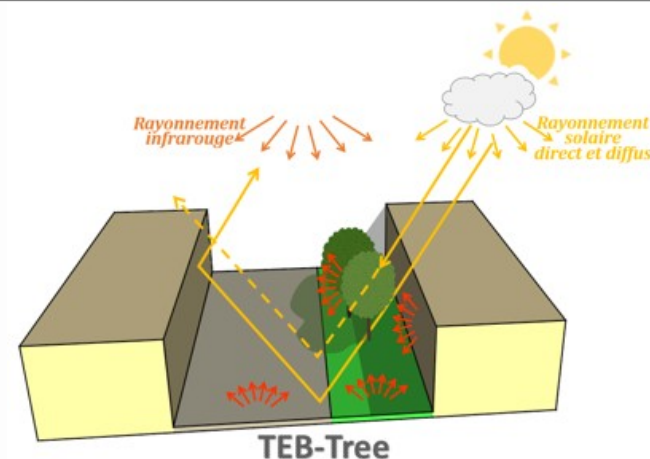
# Les modèles de canopée urbaine simplifient la géométrie urbaine et le transfert radiatif

## ■ Simplification de la géométrie urbaine

- Rue-canyon de longueur infinie
- Blocs de surface carrée ou rectangulaire
- Hauteur de bâtiment uniforme par maille

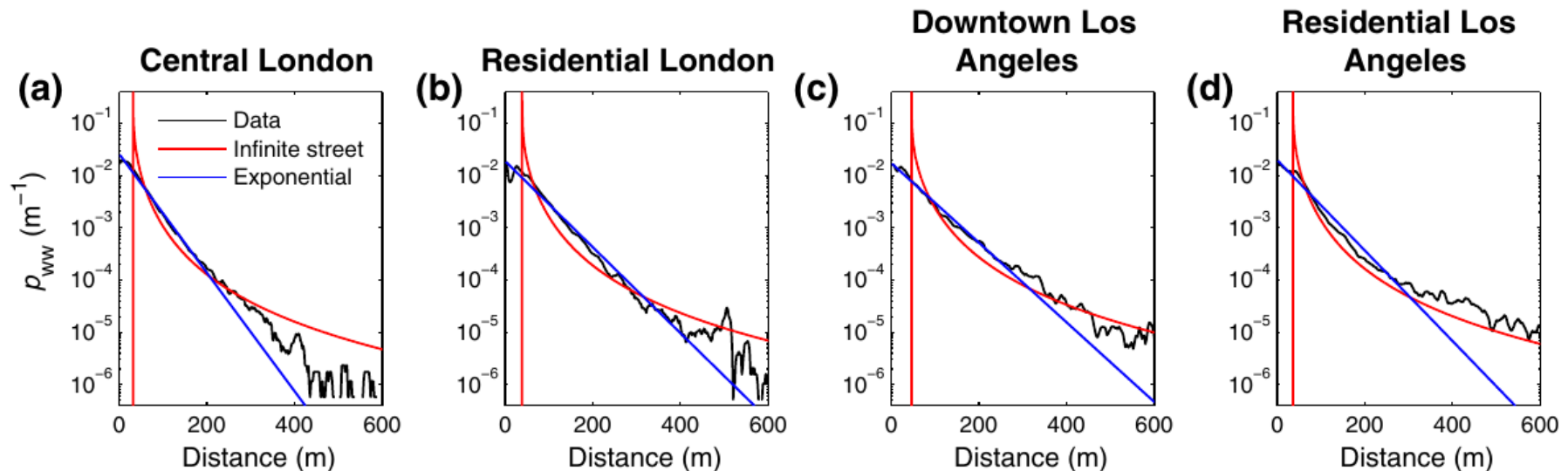
## ■ Simplification du transfert radiatif

- Radiosité (réflexions isotropes, vide, réflectivité *broadband*)
- Facteurs de forme analytiques pour des géométries simples
- Facteurs de forme via Monte-Carlo pour des géométries plus complexes



Echanges radiatifs dans TEB  
(Redon et Lemonsu, 2020)

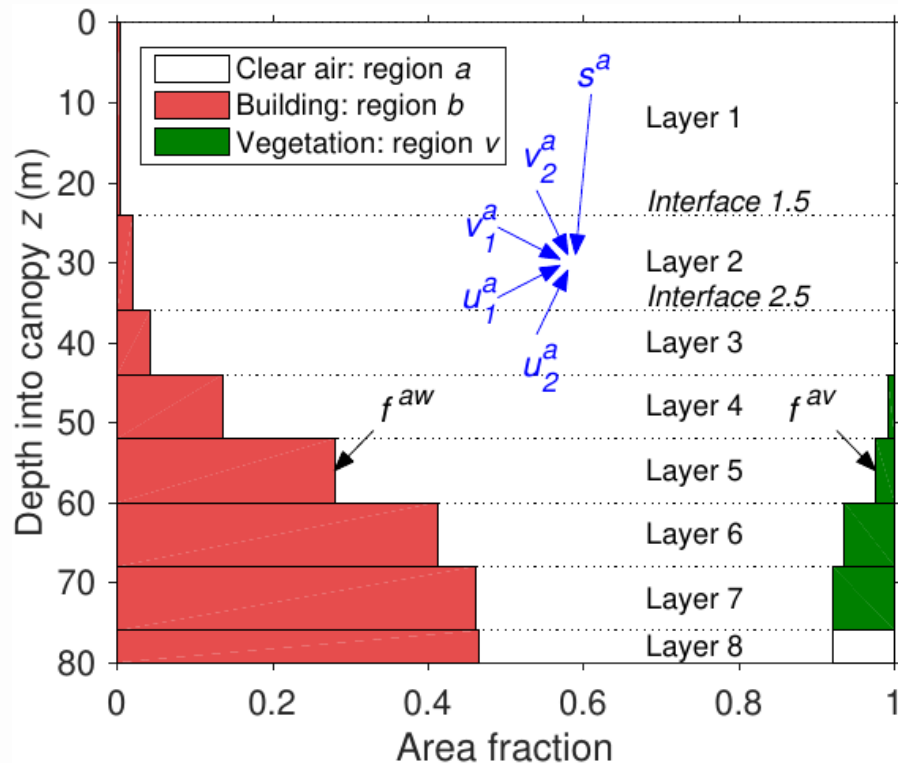
- **Modèle exponentiel de la géométrie urbaine (Hogan, 2019a)**
  - Le transfert radiatif dans la canopée urbaine est gouverné par la distribution des distances mur-mur et mur-sol
  - La morphologie rue-canyon mène à de distributions différentes de ces distances comparé à des quartiers réels (Hogan, 2019a ; Stretton et al., 2022)
  - Il est mieux de supposer une distribution exponentielle décroissante



**Distribution des distances mur-mur dans de vrais quartiers (Hogan, 2019a)**

# Changement de paradigme dans la modélisation du transfert radiatif urbain

- **Modèle de transfert radiatif SPARTACUS-Urban (Hogan, 2019b)**
  - Avec la géométrie exponentielle, l'atténuation du rayonnement par les bâtiments est similaire à l'atmosphère turbide (loi de Beer-Lambert)
  - L'Equation du Transfert Radiatif est résolue avec la Méthode des Ordonnées Discrètes (DOM)



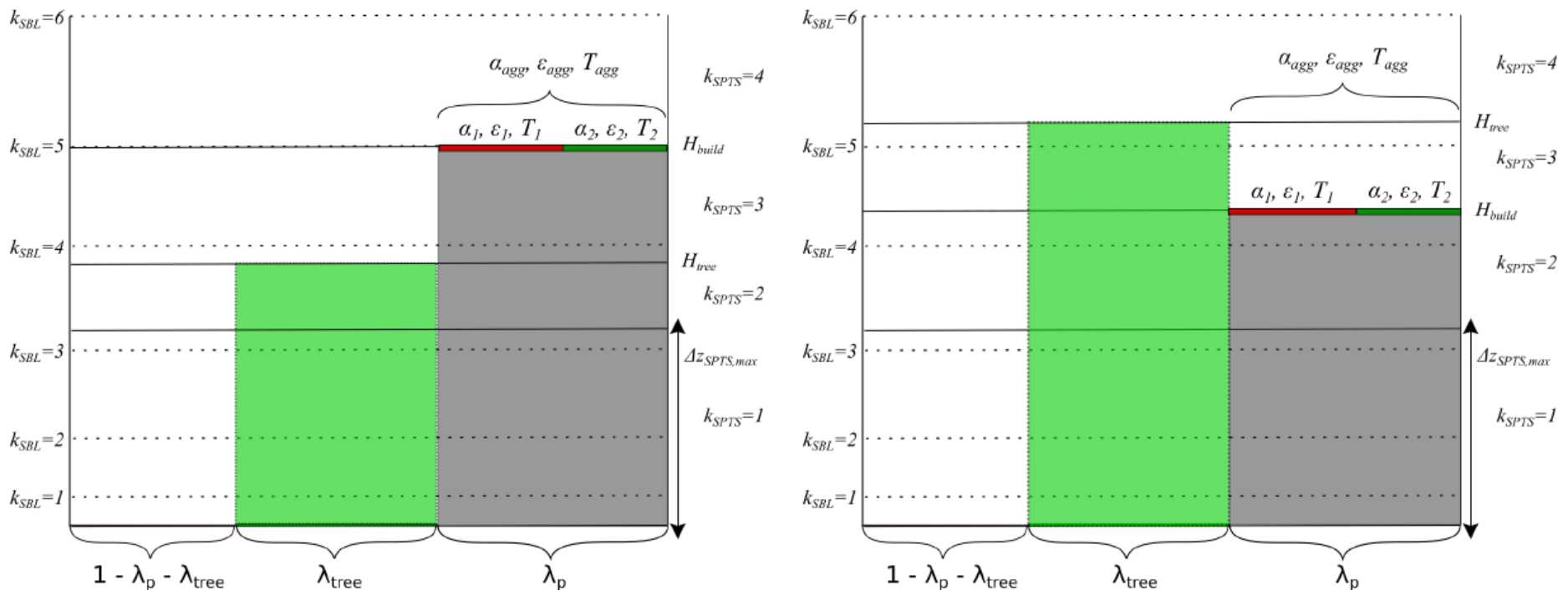
Hogan, 2019b

## SPARTACUS-Urban peut représenter :

- La variété des hauteurs des bâtiments et de la végétation
- La réflectivité spectrale et spéculaire
- L'interaction du rayonnement avec l'atmosphère dans la canopée urbaine

## ■ TEB-SPARTACUS

- TEB n'a toujours qu'une hauteur moyenne de bâtiment pour chaque maille
- Les arbres peuvent être plus élevés que les bâtiments
- SPARTACUS-Urban est librarie dans open-source SURFEX-v9.0
- Évaluation avec le modèle de référence HTRDR-Urban



- **Monte-Carlo est une méthode pour résoudre des intégrales**

$$S = \int_D f(x) dx = \int_D p(x) \frac{f(x)}{p(x)} dx = E\left(\frac{f(X)}{p(X)}\right) = E(W),$$

$$r = \int_{-\infty}^x p(x) dx,$$

$$S \approx \tilde{S} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N W_k(x_k).$$

- **Monte-Carlo est une méthode pour résoudre des intégrales**

$$S = \int_D f(x) dx = \int_D p(x) \frac{f(x)}{p(x)} dx = E\left(\frac{f(X)}{p(X)}\right) = E(W),$$

$$r = \int_{-\infty}^x p(x) dx,$$

$$S \approx \tilde{S} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N W_k(x_k).$$

- **La densité de flux radiatif est une intégrale**

$$\dot{q}(\mathbf{x}_0, t) = \int_0^\infty d\lambda \int_{2\pi} I(\mathbf{x}_0, t, -\boldsymbol{\omega}_0, \lambda) |\mathbf{n}(\mathbf{x}_0) \cdot \boldsymbol{\omega}_0| d\Omega(\boldsymbol{\omega}_0),$$

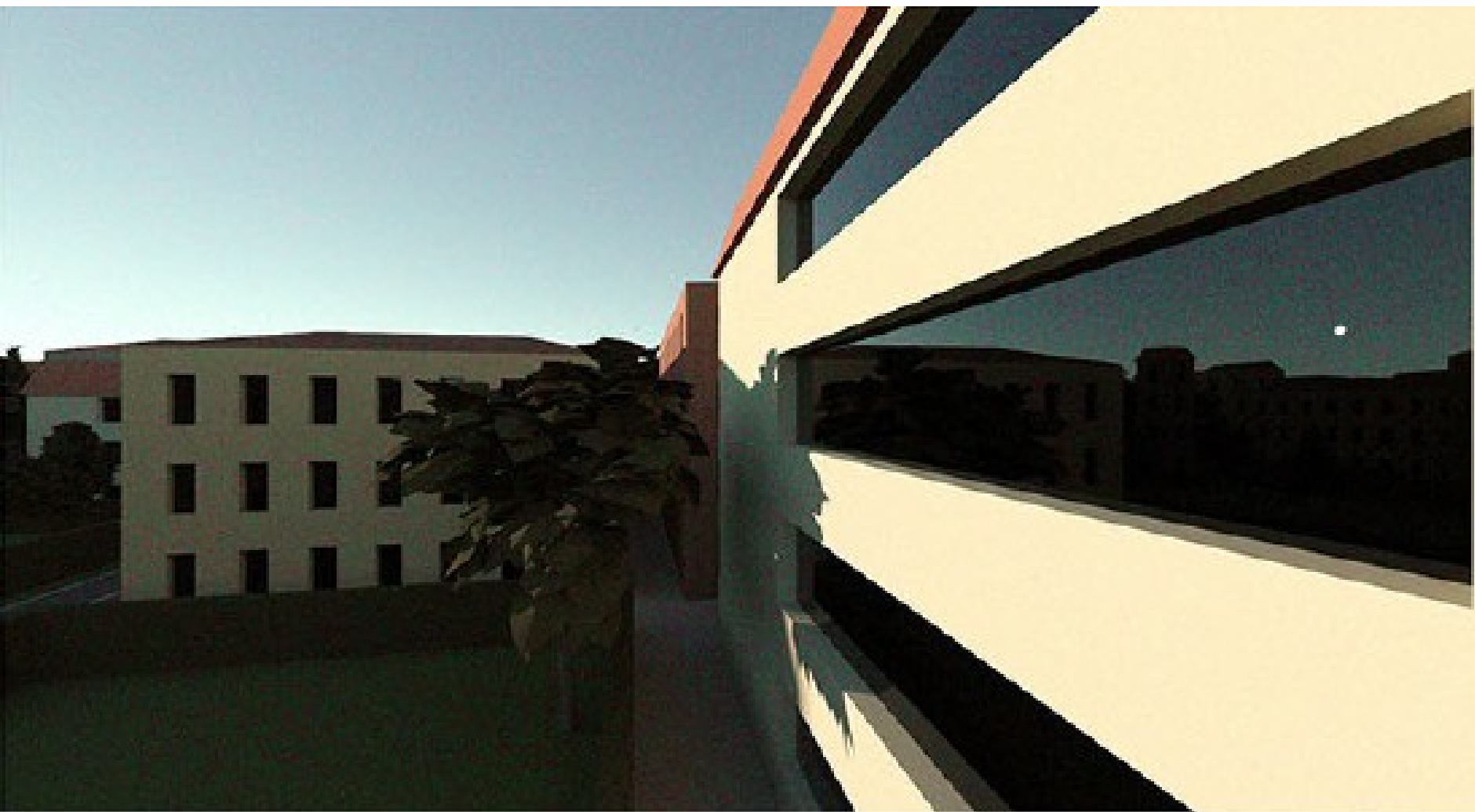
- **Conditions limites pour HTRDR-Urban**
  - TOA : Irradiance spectrale observée du disque solaire
  - Atmosphère : diffusion et absorption par l'air et les nuages
  - Surface : description triangulée (.obj) de la surface avec les bâtiments et la végétation, leur réflectivité spectrale et spéculaire ainsi que leur température de surface
- **HTRDR-Urban est disponible gratuitement et en open-source**
  - Description scientifique : Caliot et al. (2022)
  - Code source : <https://gitlab.com/meso-star/star-engine/-/tree/htrdr>

# Rendu d'une ville idéalisée avec HTRDR-Urban



**Source : Najda Villefranque et Vincent Forest**

# Rendu de la réflexion du soleil dans une fenêtre

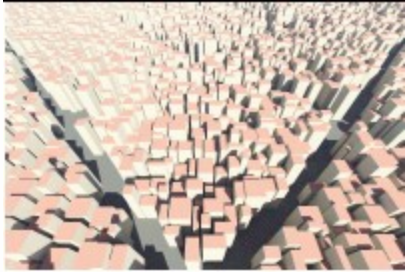


Les paramètres du verre correspondent  
à *soda lime silica glass* (Rubin, 1985)

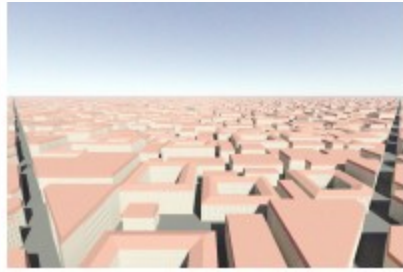
# Quartiers générés de manière procédurale

## - Sans arbres

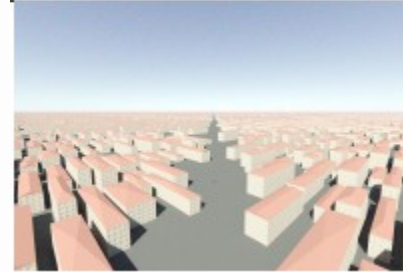
**LCZ1: Compact high-rise**



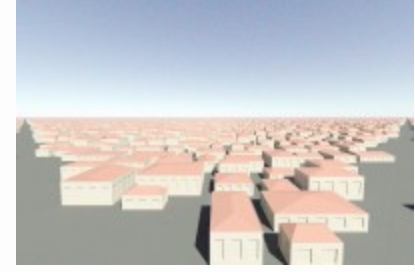
**LCZ2a: Blocks of comp. mid-rise**



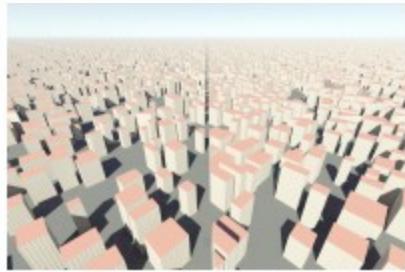
**LCZ2b: Rows of comp. mid-rise**



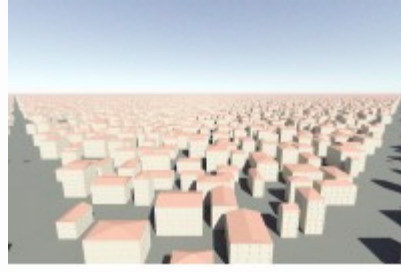
**LCZ3: Compact low-rise**



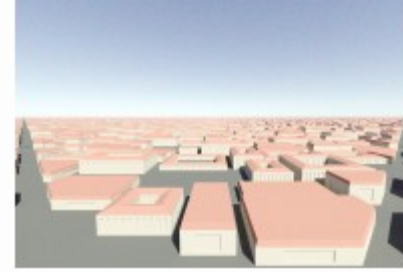
**LCZ4: Open high-rise**



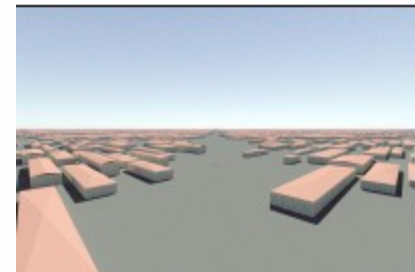
**LCZ5: Open mid-rise**



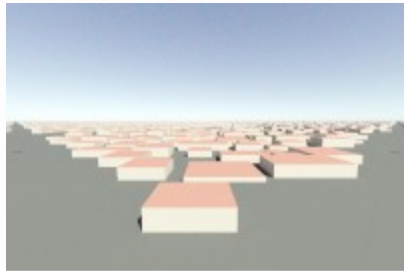
**LCZ6a: Blocks of open low-rise**



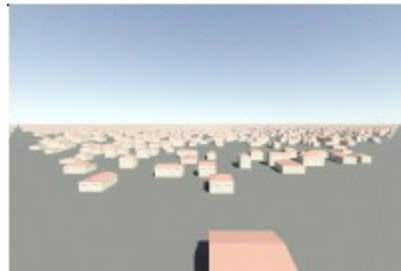
**LCZ6b: Rows of open low-rise**



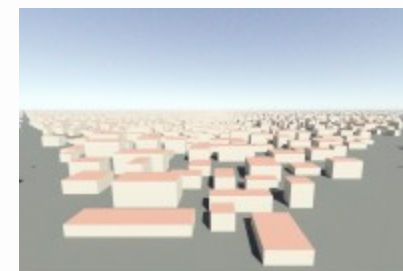
**LCZ8: Large low-rise**



**LCZ9: Sparsely built**

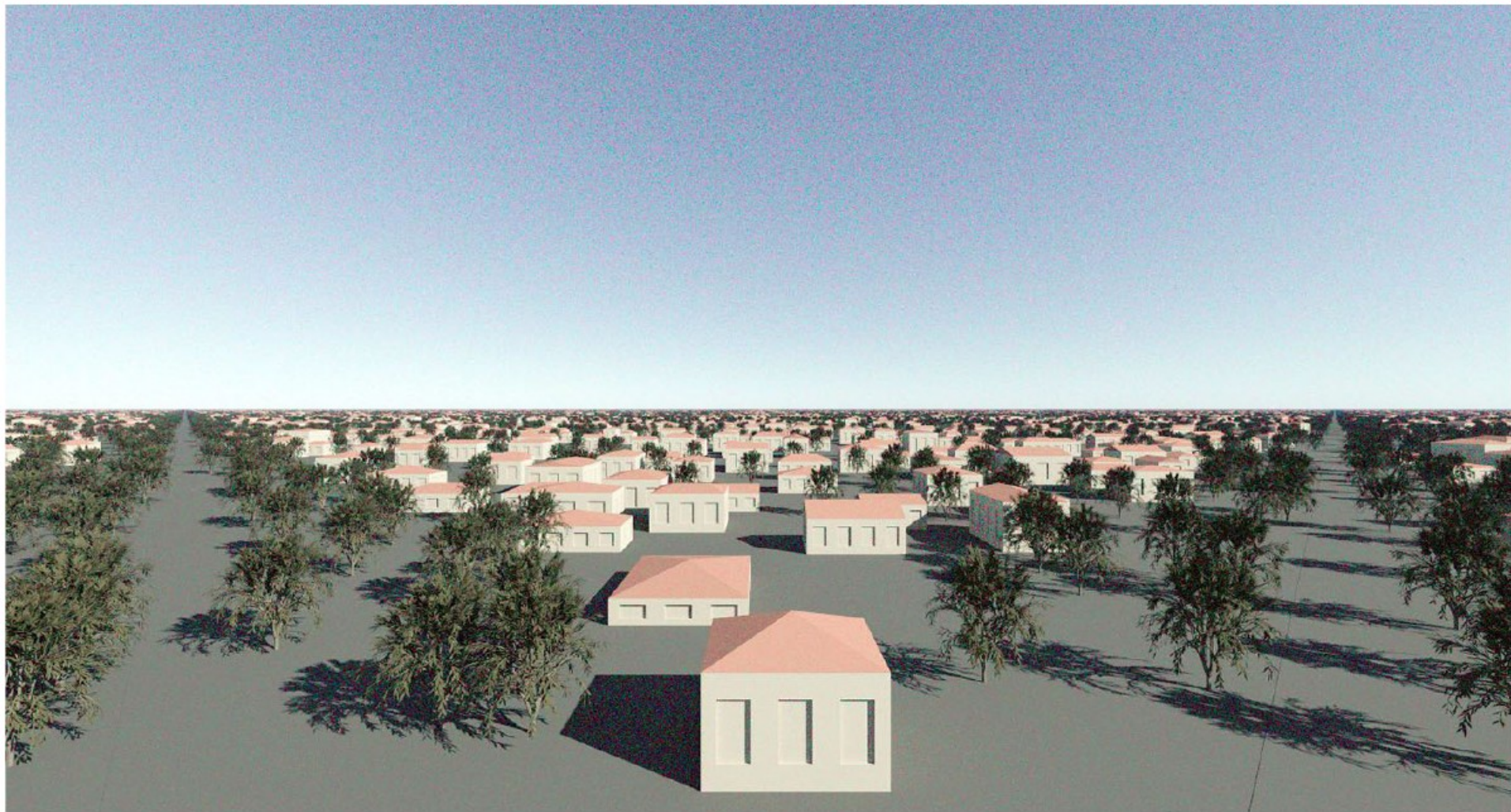


**LCZ10: Heavy industry**



# Quartiers générés de manière procédurale

## - Avec arbres

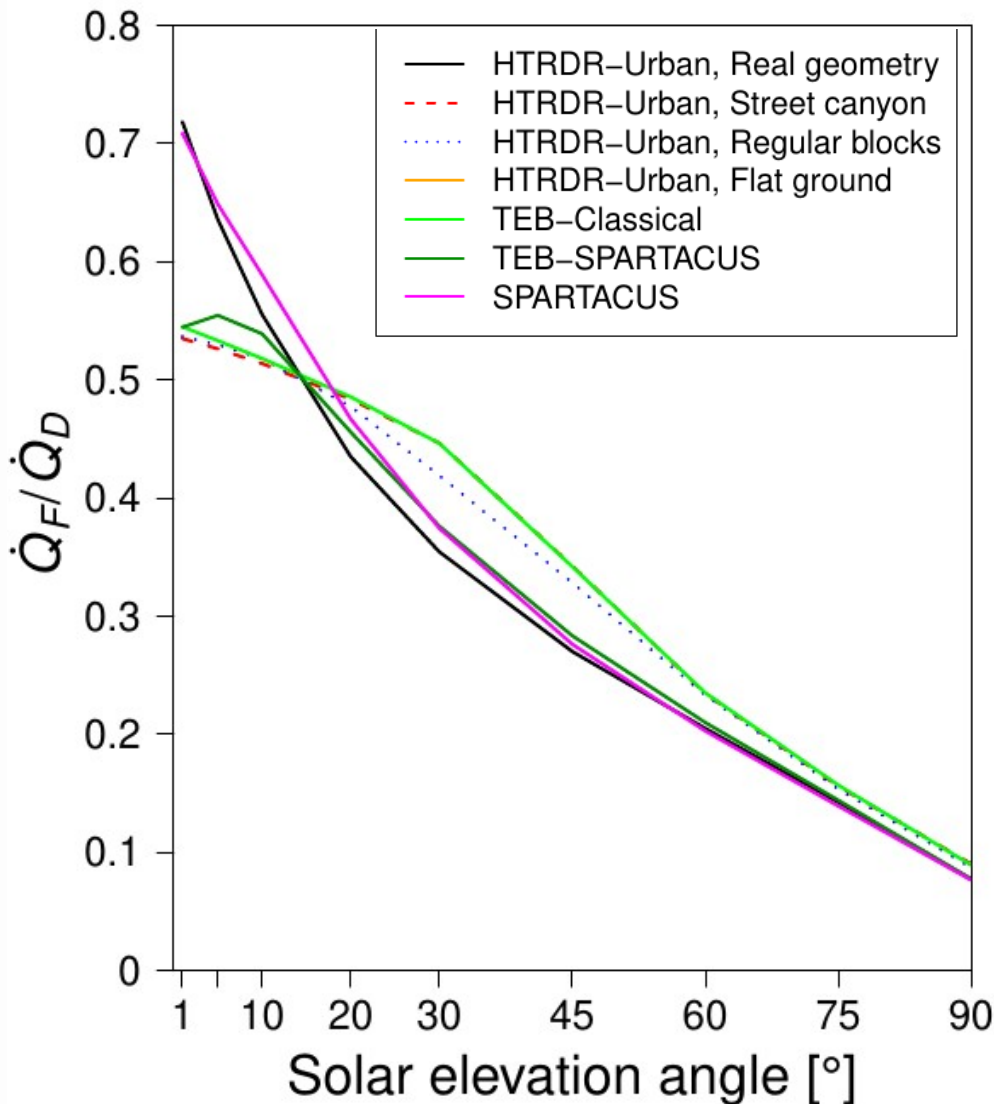


- **Différentes conditions limites pour le rayonnement descendant**
  - Uniquement du rayonnement solaire direct
  - Uniquement du rayonnement solaire diffus isotrope
  - Rayonnement terrestre
- **Analyse du bilan radiatif de la ville**
  - Fraction du rayonnement réfléchi :  $\frac{Q_U}{Q_D}$
  - Fraction du rayonnement absorbé par les toits ( $\frac{Q_R}{Q_D}$ ), les murs ( $\frac{Q_F}{Q_D}$ ), et le sol ( $\frac{Q_G}{Q_D}$ )
  - Fraction du rayonnement absorbé par les arbres :  $\frac{Q_T}{Q_D}$

# Résultats

## - Exemple : LCZ5 à toits plats

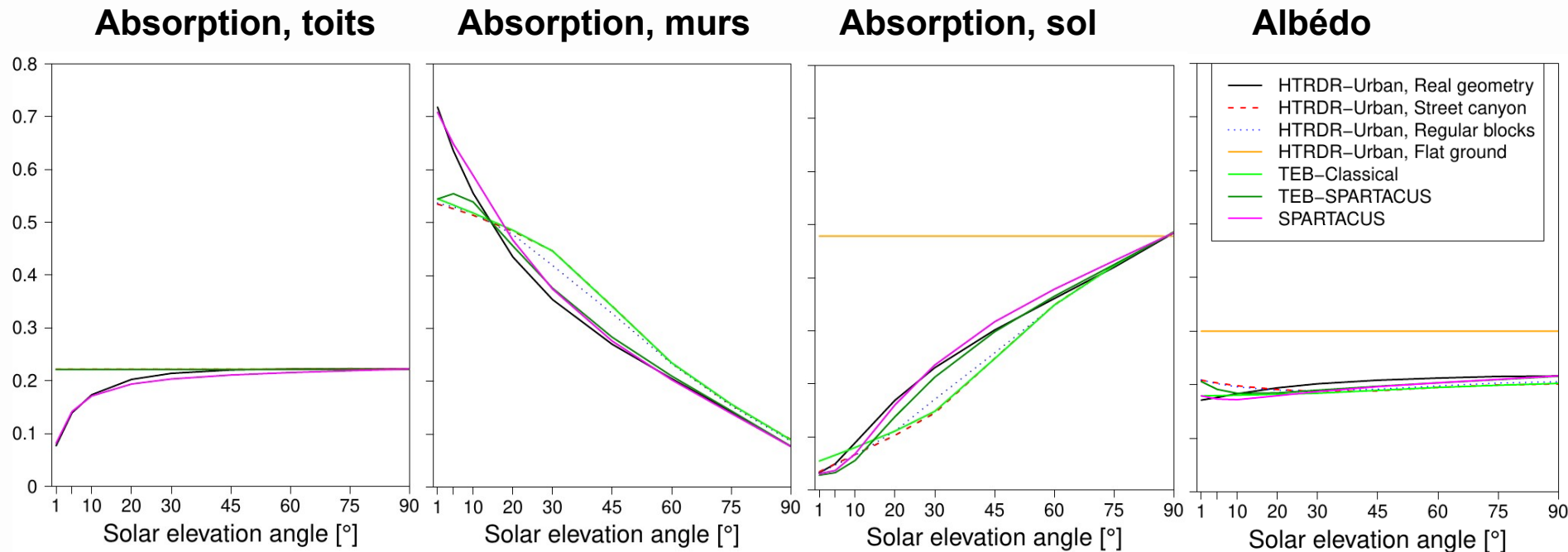
### Fraction du rayonnement absorbée par les murs



- “TEB-Classical” presque égal à “HTRDR–Urban, street canyon”
- TEB-Classical surestime l’absorption par les murs pour des angles d’élévation du soleil entre 15° et 60° ; forte amélioration avec TEB-SPARTACUS
- L’absorption par les murs est sous-estimée pour des angles d’élévation du soleil en-dessous de 10°.

# Résultats

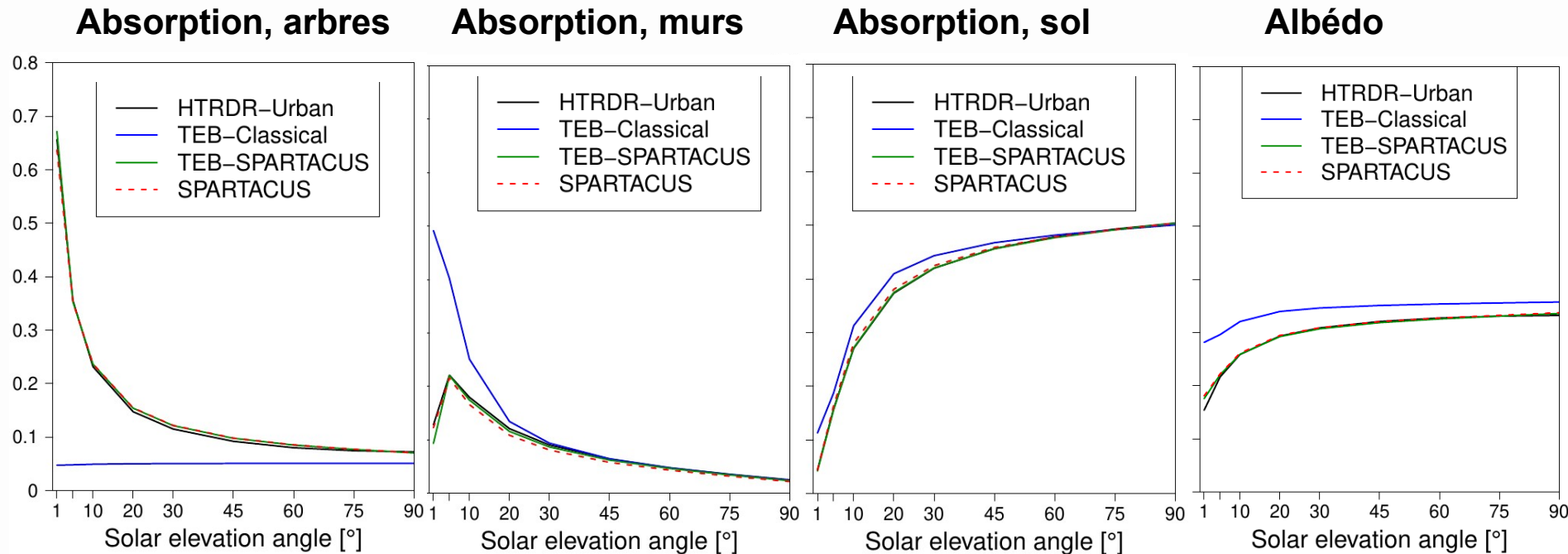
## - Exemple : LCZ5 à toits plats



- Toutes les géométries simplifiées surestiment l'absorption par les toits pour des angles d'élévation du soleil faibles
- TEB-Classical sous-estime (sur-estime) l'absorption par le sol (les murs)
- L'albédo de la ville est le paramètre le plus robuste

# Résultats

## - Exemple : LCZ9 avec arbres

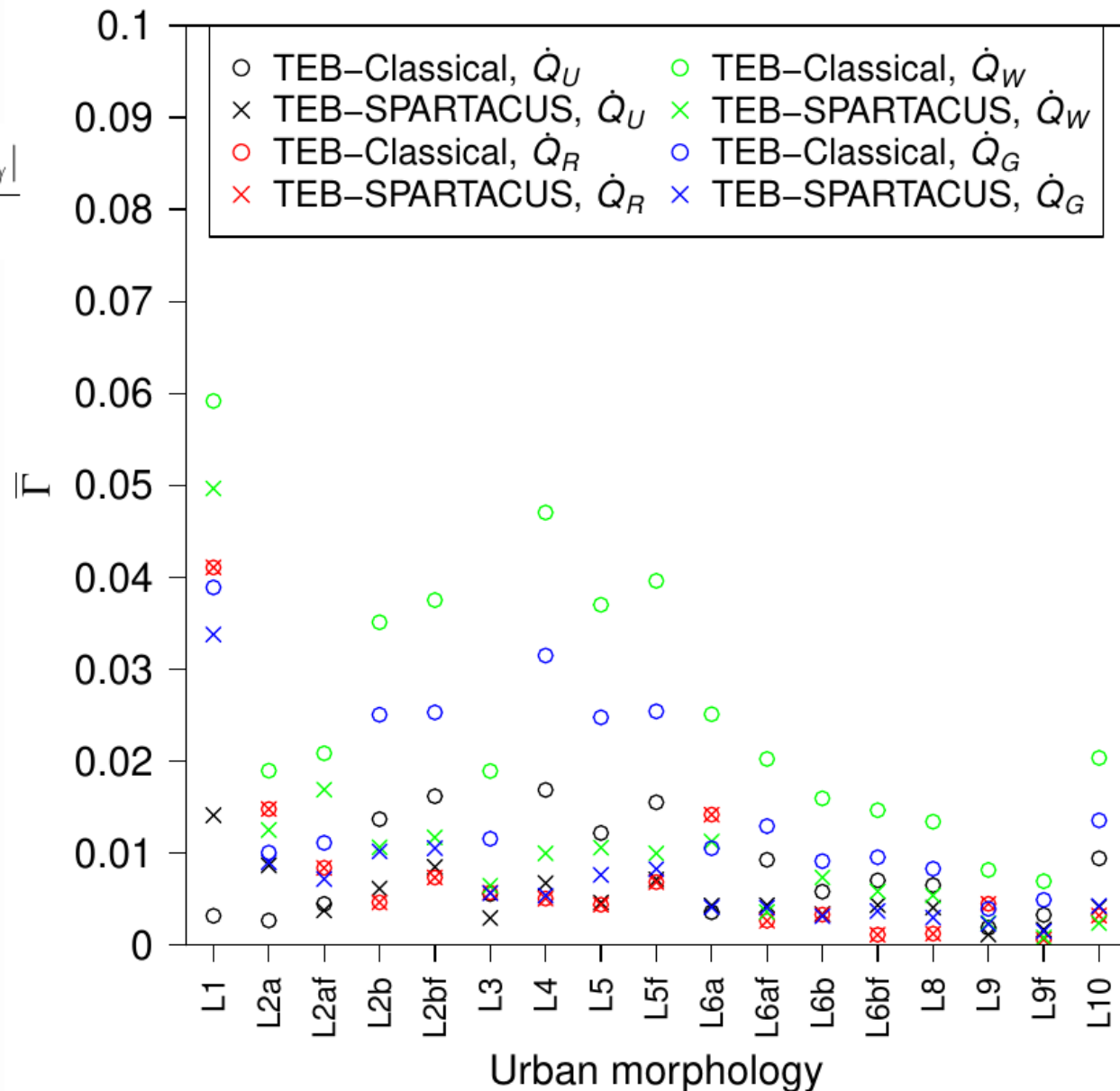


- Forte augmentation de l'absorption par les arbres avec SPARTACUS-Urban
- Les résultats de TEB-SPARTACUS sont très proches de ceux de HTRDR-Urban

# Résultats

## - Toutes les LCZ, rayonnement solaire direct

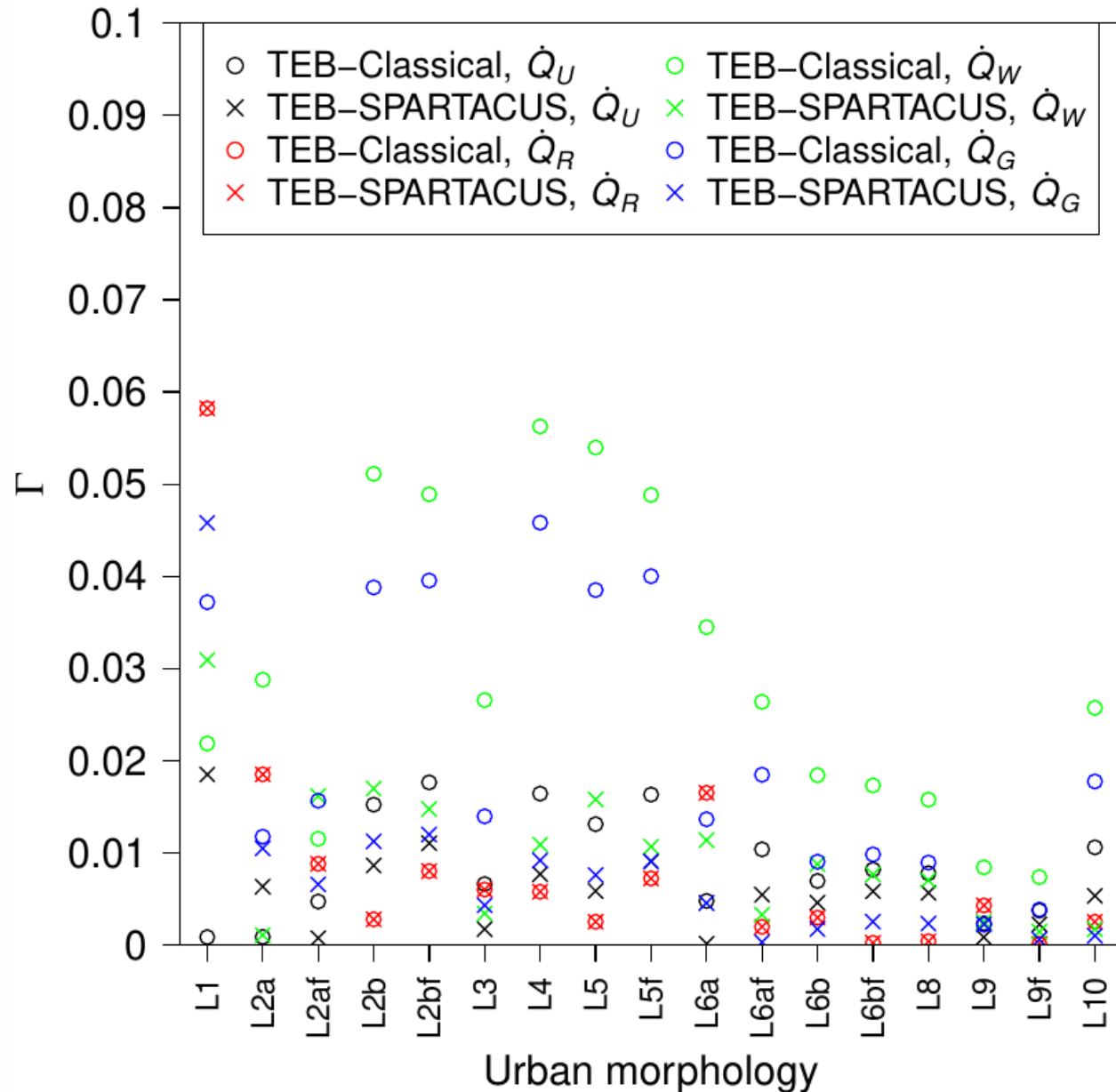
$$\bar{\Gamma} = \frac{\sum_{\gamma} \dot{Q}_{D,\gamma} |O_{\text{TEB},\gamma} - O_{\text{HTRDR},\gamma}|}{\sum_{\gamma} \dot{Q}_{D,\gamma}}$$



# Résultats

## - Toutes les LCZ, rayonnement solaire diffus

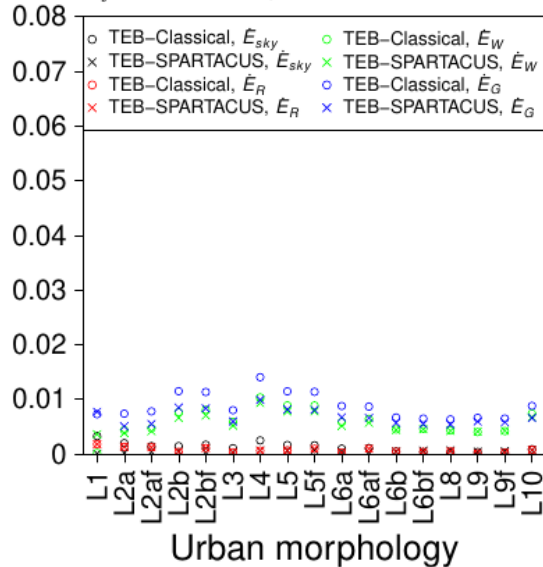
$$\Gamma = |O_{\text{TEB}} - O_{\text{HTRDR}}|$$



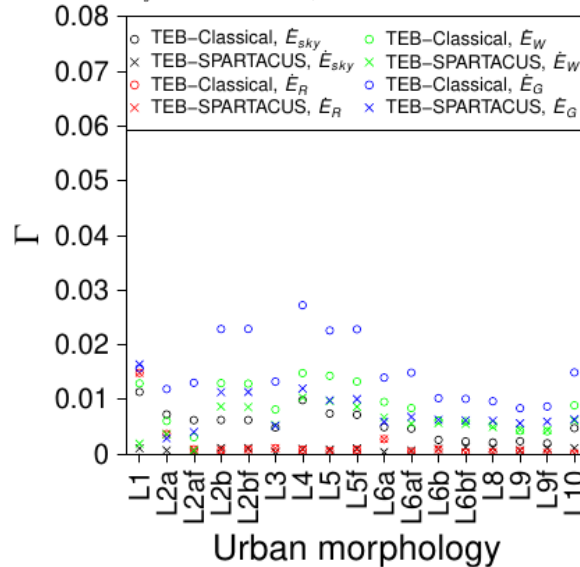
# Résultats

## - Toutes les LCZ, rayonnement terrestre

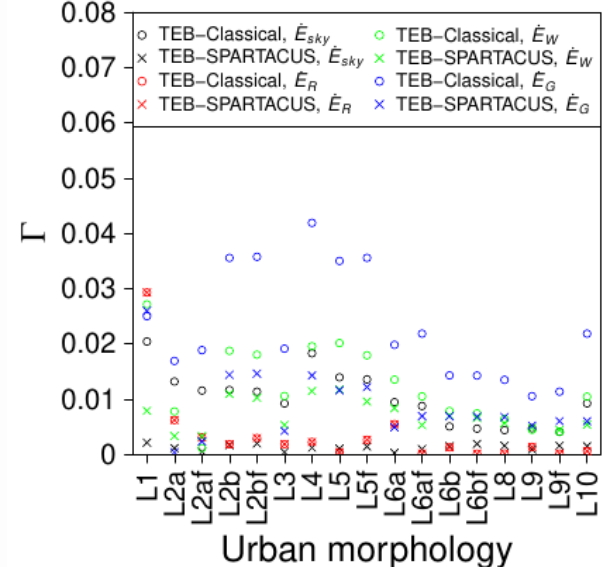
$T_{surf} = 284.2 \text{ K}$ ,  $T_{air} = 294.2 \text{ K}$



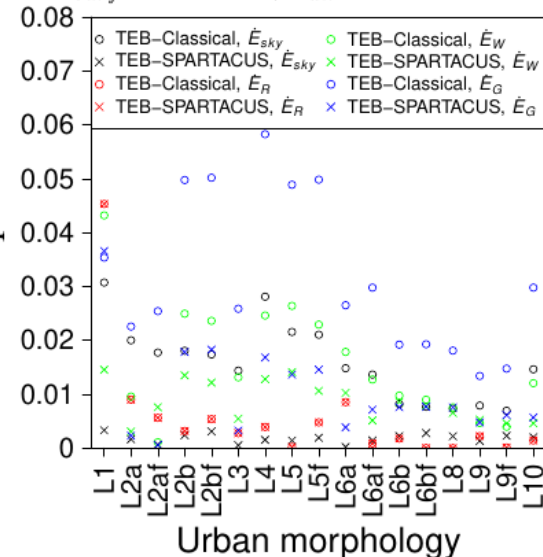
$T_{surf} = 294.2 \text{ K}$ ,  $T_{air} = 294.2 \text{ K}$



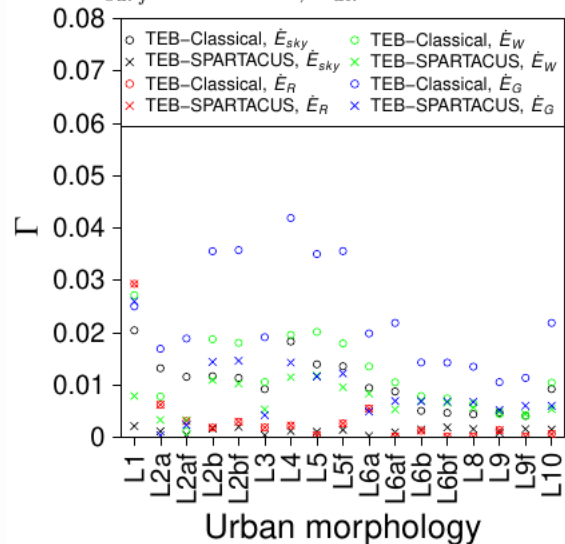
$T_{surf} = 304.2 \text{ K}$ ,  $T_{air} = 294.2 \text{ K}$



$T_{surf} = 314.2 \text{ K}$ ,  $T_{air} = 294.2 \text{ K}$



$T_{surf} = 324.2 \text{ K}$ ,  $T_{air} = 294.2 \text{ K}$



# Conclusions sur le couplage entre TEB et SPARTACUS-Urban

## ■ Conclusions

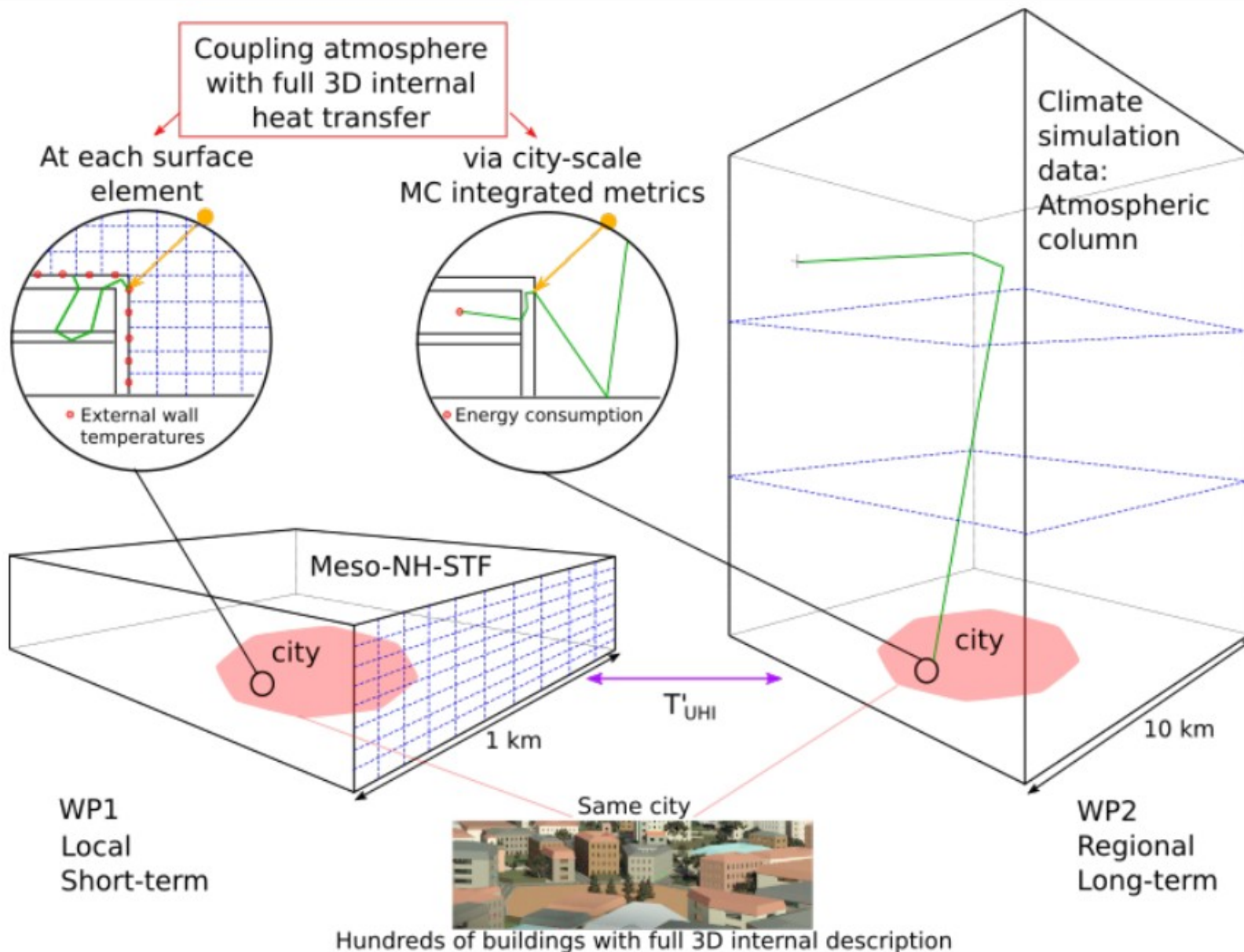
- SPARTACUS-Urban couplé à TEB pour une géométrie urbaine plus réaliste et une meilleure physique du transfert radiatif (*open-source* SURFEX-v9.0)
- Modèle de référence *open-source* HTRDR-Urban pour la validation de modèles moins détaillés, des études de processus ou d'adaptation
- TEB-SPARTACUS simule mieux les observables radiatives que TEB-Classical pour toutes les LCZ, surtout en présence d'arbres

## ■ Travaux futurs

- Améliorer TEB pour utiliser davantage les capacités de SPARTACUS-Urban
- Etendre la validation à des quartiers avec une variété de types de bâtiment et de matériaux de construction

# **Premiers résultats du projet ANR-MC2 : Simulations Monte-Carlo pour la météorologie et la climatologie**

# Résumé du projet MC2 (Caliot et al., 2021)

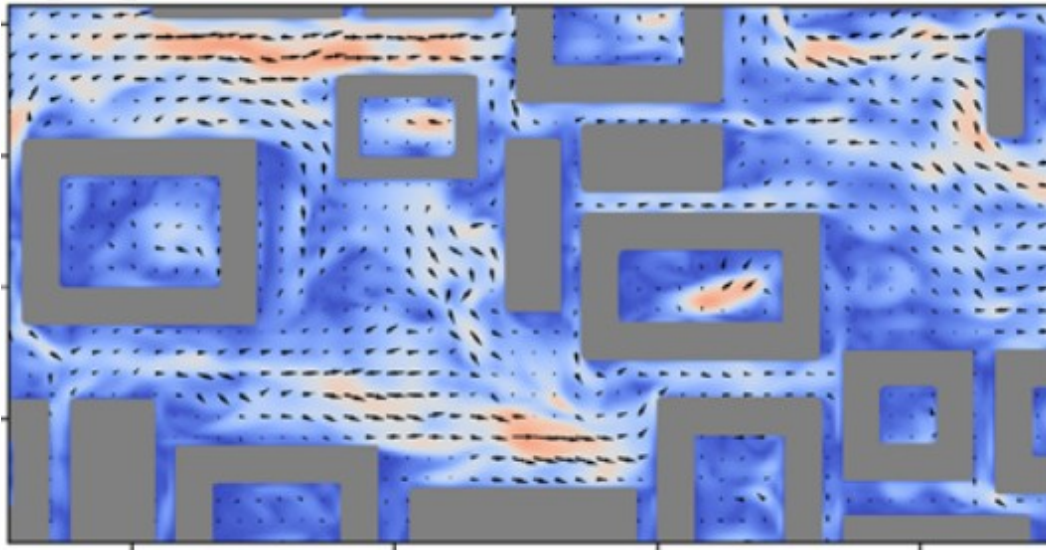


# Motivations pour la version micro-échelle de Meso-NH

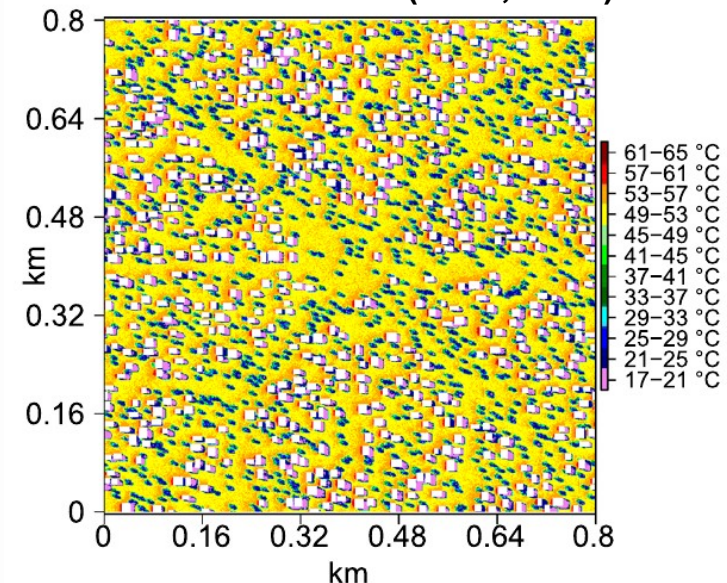
## ■ Quantification de la météorologie urbaine

- Hétérogénéité à l'échelle d'un quartier du vent, du rayonnement, etc.
- Des variables très importantes pour le bilan d'énergie, le confort, ...
- Les moyennes sur le quartier (mésos-échelle) sont peu pertinentes

Champ du vent instantané dans un quartier de Pavillons Continus sur Îlot Fermé ; Nagel et al. (2023, BLM)



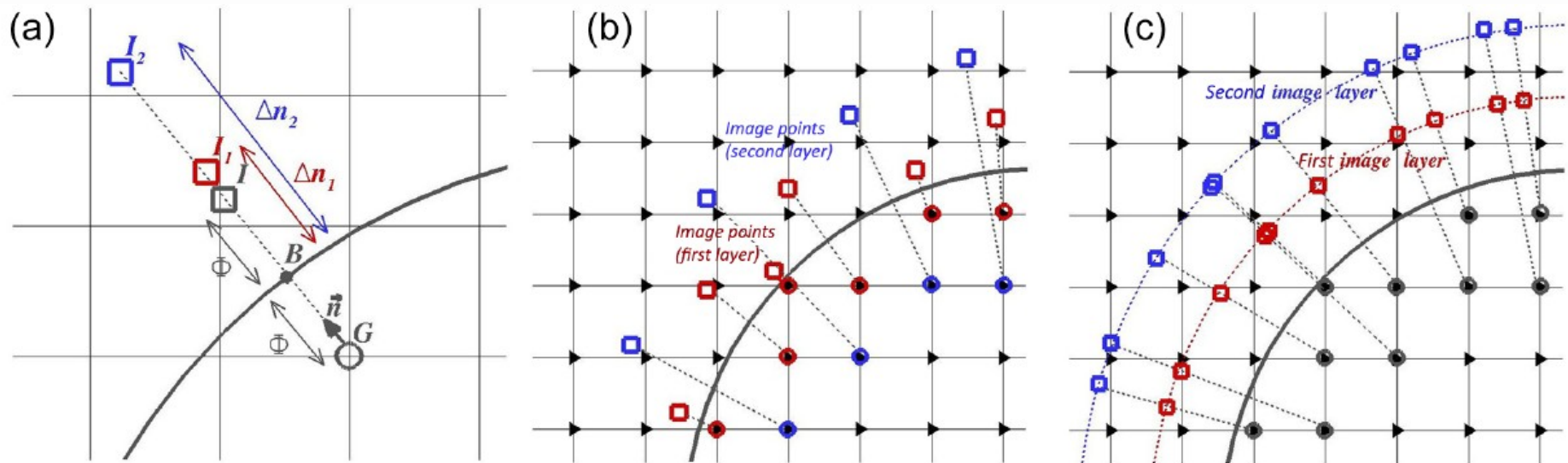
Température Moyenne Radiative pour un corps humain dans un quartier de Pavillons Discontinus  
Schoetter et al. (2023, BLM)



# Développement de la version micro-échelle de Meso-NH (Meso-NH-IBM)

- **Meso-NH, frontières immergées (Immersed Boundary Method; IBM)**
  - Intégration et validation des IBM par Auguste et al. (2019)
  - Sans échanges thermiques et radiatifs - uniquement sous conditions neutres

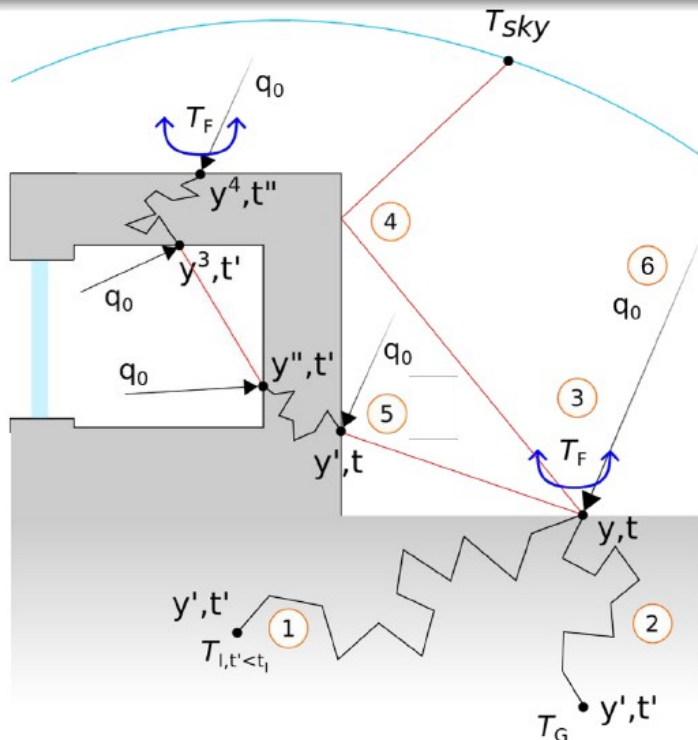
Exemple de positionnement des points ghost et images nécessaires pour représenter une frontière immergée (Auguste et al., 2019, GMD)



# Développement de la version micro-échelle de Meso-NH (Meso-NH-IBM)

- **Ajout des échanges thermiques et radiatifs (projet ANR-MC2)**
  - Solveur Monte-Carlo *stardis* des échanges rayonnement-conduction-convection
  - Haut réalisme de la prise en compte des processus physiques (RTE)
  - Temps de calcul insensible à la géométrie et à la complexité des données

$$T_s(\vec{y}, t) = P_c T(\vec{y} - \delta_b, t) + P_v T_{air} + P_r T_r + \varepsilon \frac{q_0}{h_{tot}}$$



$$P_c = \frac{k}{\delta_b h_{tot}} ; P_v = \frac{h_c}{h_{tot}} ; P_r = \frac{h_r}{h_{tot}}$$

$$h_{tot} = \frac{k}{\delta_b} + h_c + h_r$$

Retailleau et al., 2023

Caliot et al., 2024

# Développement de la version micro-échelle de Meso-NH (Meso-NH-IBM)

- **Calcul du coefficient d'échange ( $c_H$ )**
  - Rowley (1930) :  $f$  (FF)
  - DOE-2 :  $f$  (FF, T, orientation)
  - Monin Obukhov : idem SURFEX pour surfaces horizontales, neutre sinon

# Développement de la version micro-échelle de Meso-NH (Meso-NH-IBM)

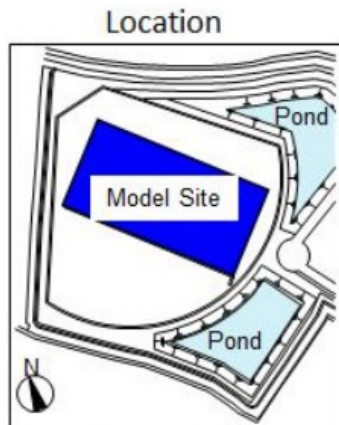
- **Calcul du coefficient d'échange ( $c_H$ )**
  - Rowley (1930) :  $f$  (FF)
  - DOE-2 :  $f$  (FF, T, orientation)
  - Monin Obukhov : idem SURFEX pour surfaces horizontales, neutre sinon
- **C'est le maillon faible !**
  - Aucune de ces approches n'est parfaite
  - Rowley (1930), DOE-2 : incohérence entre conditions mesures et application
  - Monin Obukhov : conditions stationnaires et homogènes supposées

**Une analyse de sensibilité sera faite**

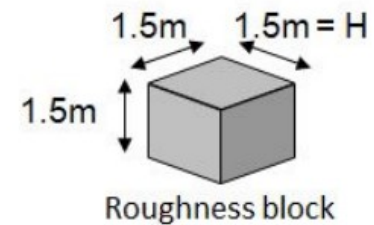
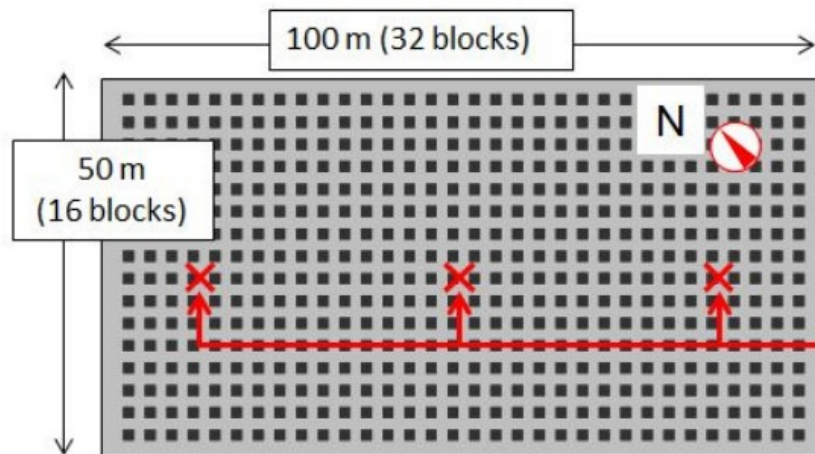
# Validation sur le site COSMO

- **Simulation d'une ville idéalisée (site COSMO au Japon)**
  - Peu d'incertitudes sur matériaux, activités humaines, végétation, ...
  - Observations: H, LE, FF, Profil de T (0-6 m), SW<sub>d</sub>, LW<sub>d</sub>, Caméras thermiques

1/5 scaled model of a residential city in Japan



Nippon Institute of Technology  
Miyamae-shi, Saitama, Japan



8m Tower



Center tower

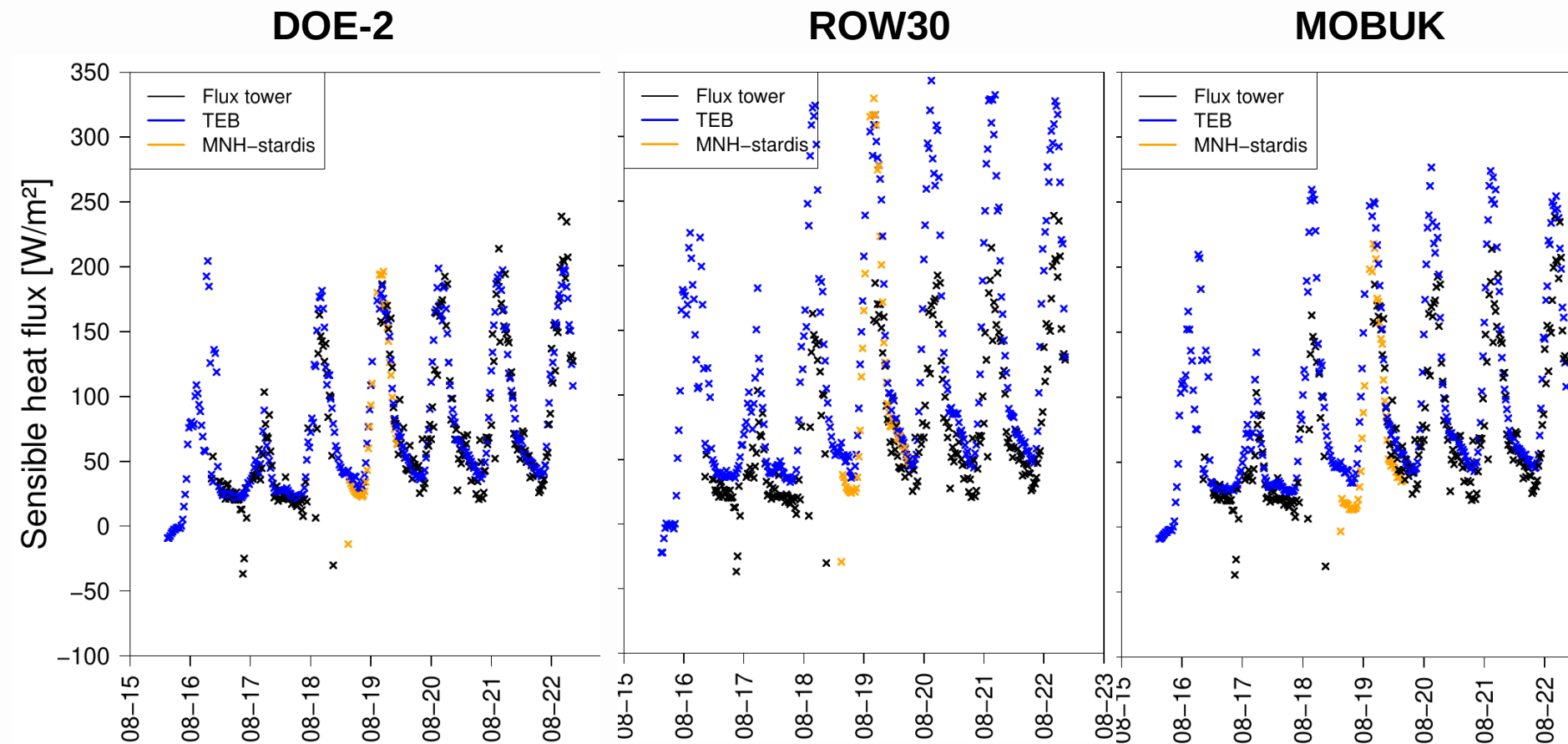
## Site Parameters

Regular array

Building area density 0.25



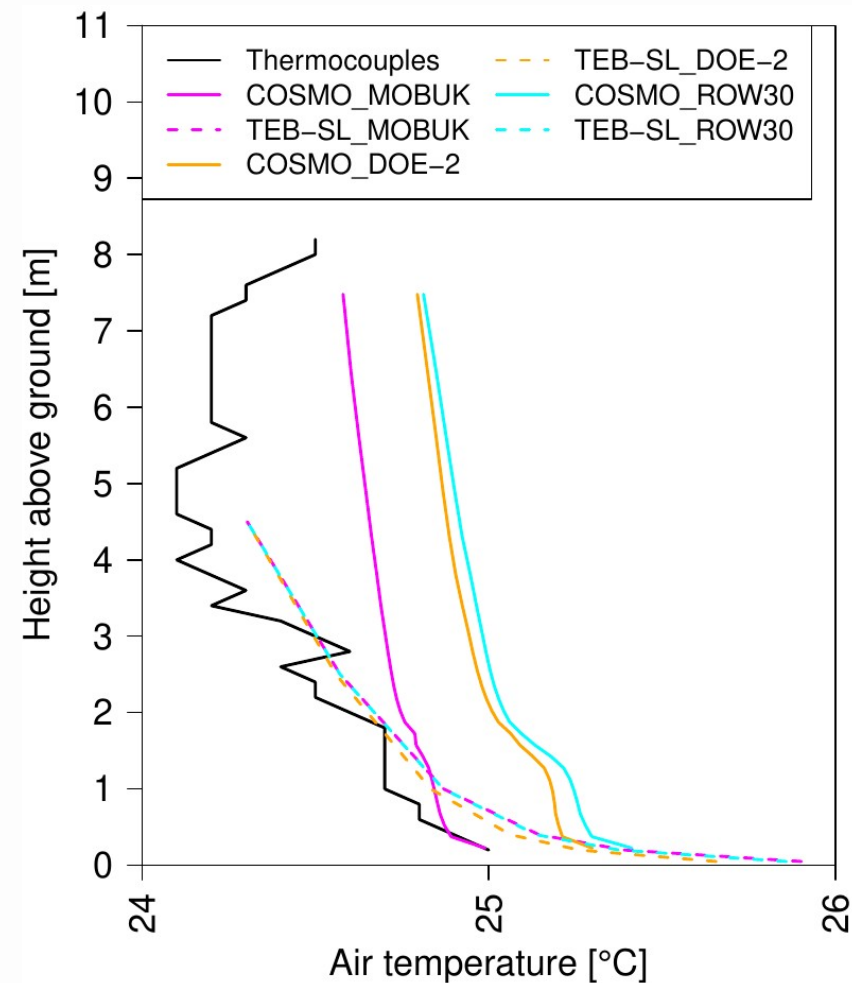
# Résultat : Flux de chaleur sensible



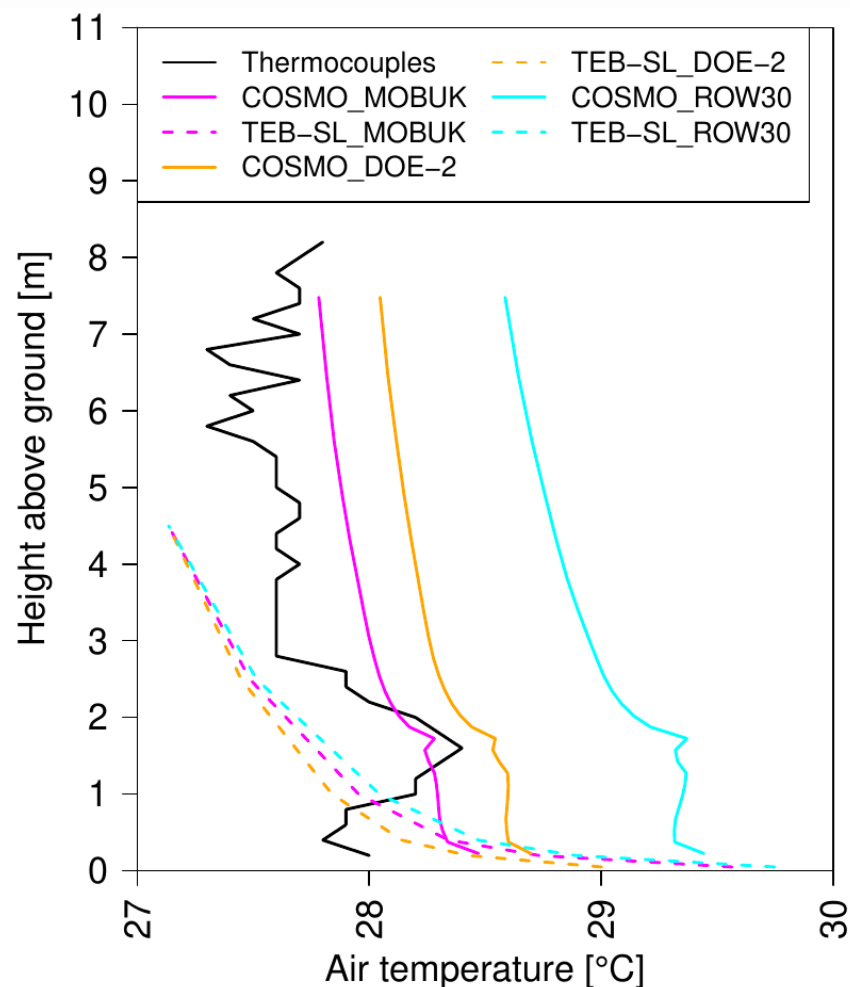
Résultat très prometteur, mais haute sensibilité au coefficient d'échange

# Résultat : Profils de température

## 5 heure locale

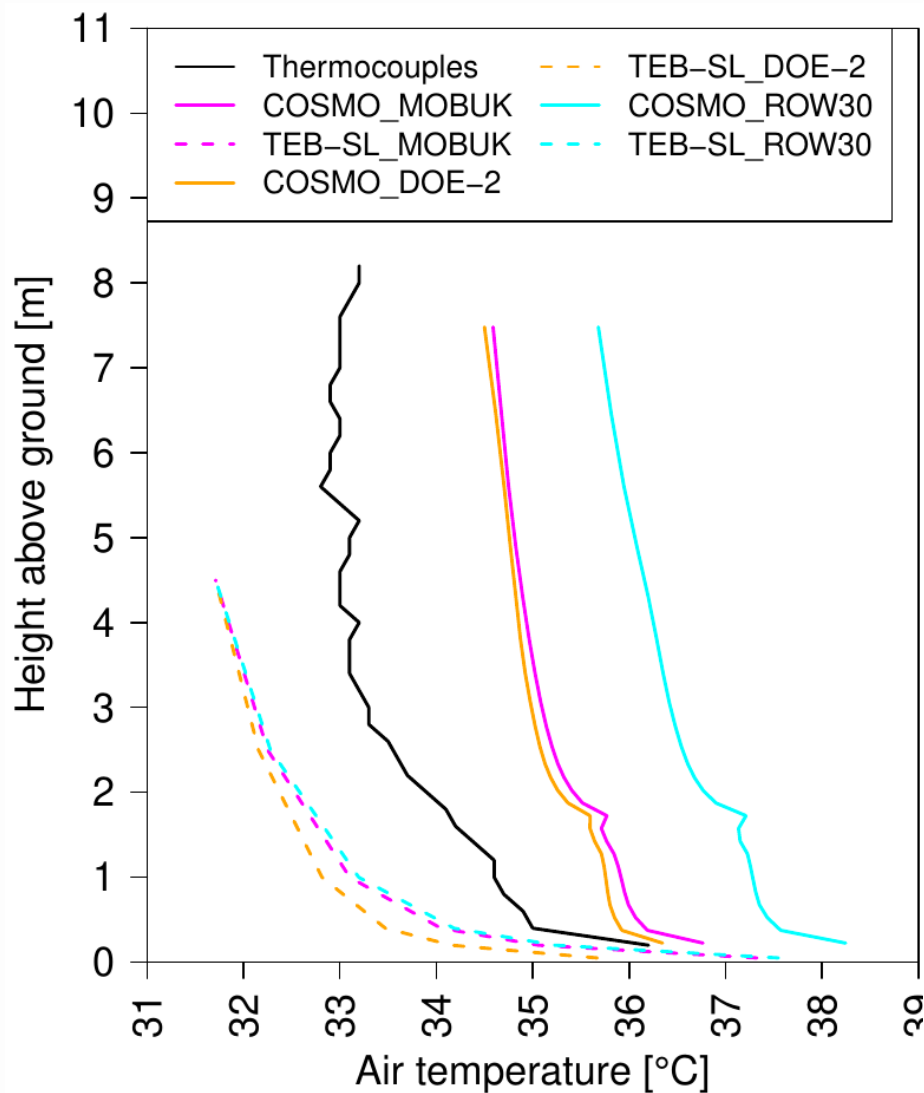


## 8 heure locale

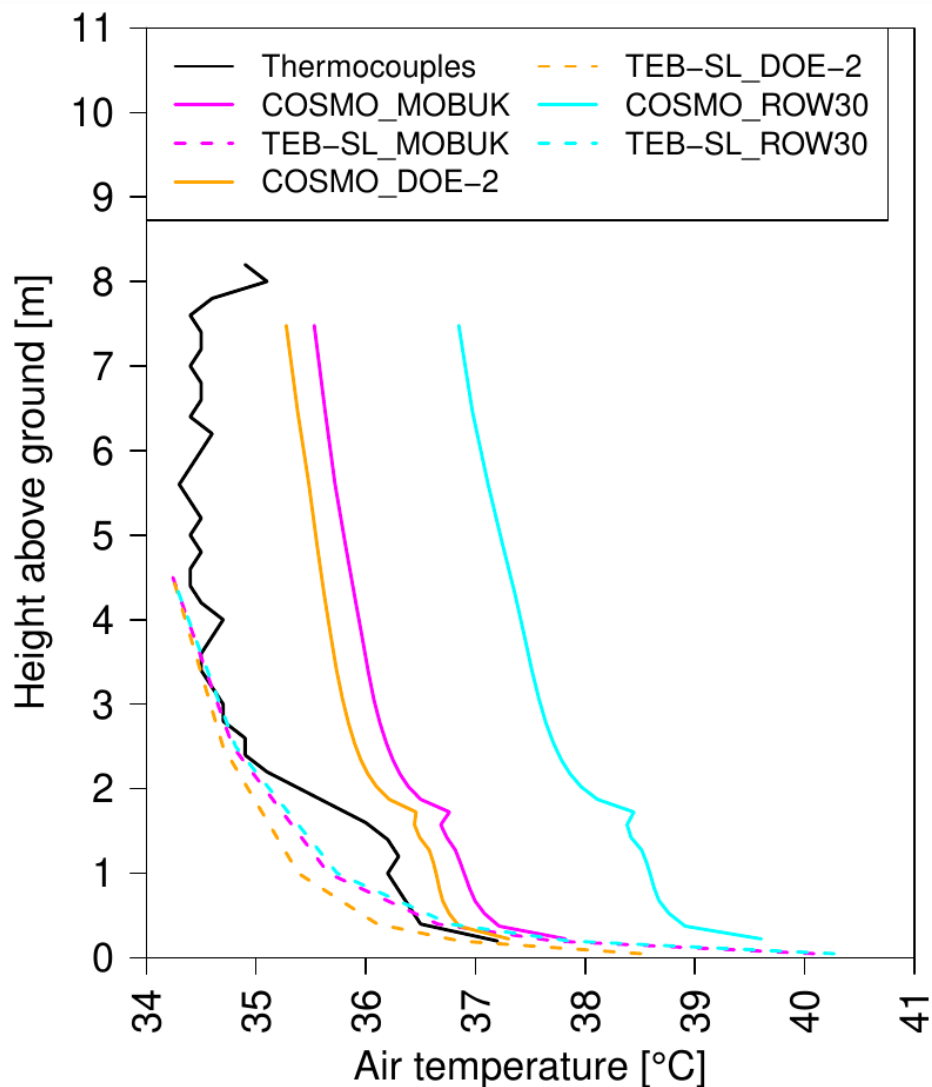


# Résultat : Profils de température

## 11 heure locale

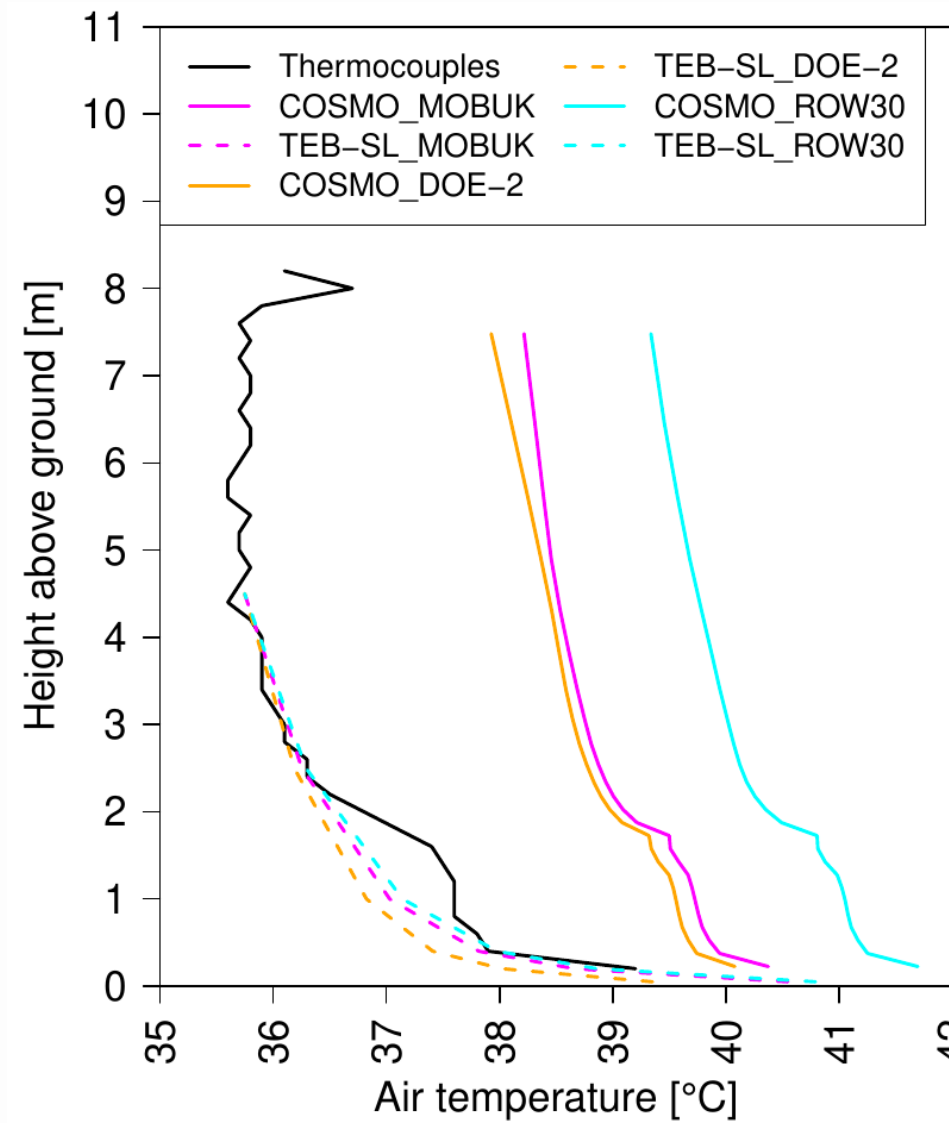


## 13 heure locale

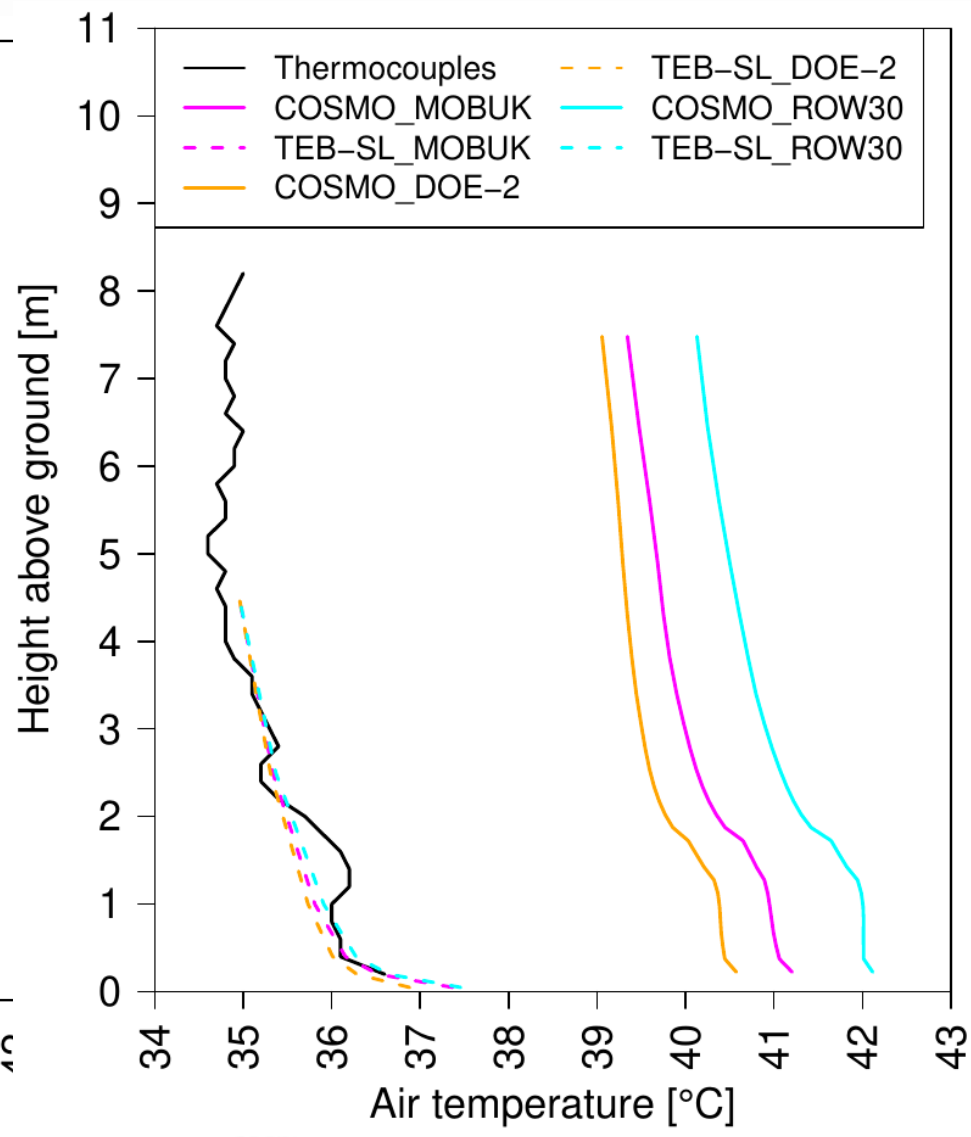


# Résultat : Profils de température

## 15 heure locale



## 17 heure locale



## Suite du projet ANR-MC2 (WP1)

---

- **Publication de la validation de Meso-NH-stardis**
- **Optimisation**
  - Nouvelle version de stardis par Mésio-Star
  - Meilleur échange et stockage des variables
- **Application sur des quartiers réels (Geoclimate et city generator 2)**
  - Ile du Ramier
  - Place du Capitole à Toulouse
- **Test d'autres algorithmes Monte-Carlo**
  - Stockage de la température de surface
  - Monte-Carlo symbolique

# Bibliographie (1)

- **Auguste, F., G. Réa, R. Paoli, C. Lac, V. Masson, D. Cariolle, 2019** : Implementation of an immersed boundary method in the Meso-NHv5. 2 model: applications to an idealized urban environment. *Geoscientific Model Development*, 12 (6), 2607–2633.
- **Caliot, C., R. Schoetter, V. Forest, V. Eymet, et T.-Y. Chung, 2022** : Model of spectral and directional radiative transfer in complex urban canopies with participating atmospheres. *Boundary-Layer Meteorology*, 186, 145-175.
- **Caliot, C., L. d'Alençon, S. Blanco, V. Forest, R. Fournier, F. Hourdin, F. Retailleau, R. Schoetter et N. Villefranque, 2024** : Coupled heat transfers resolution by Monte Carlo in urban geometry including direct and diffuse solar irradiances. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 222, 125139.
- **De Munck, C., A. Lemonsu, V. Masson, J. Le Bras et M. Bonhomme, 2018** : Evaluating the effects of greening scenarios on thermal comfort and energy and water consumptions for adapting Paris city to climate change. *Urban Climate*, 23, 260-286.
- **Gardes, T., R. Schoetter, J. Hidalgo, N. Long, E. Marquès, et V. Masson, 2020** : Statistical prediction of the nocturnal urban heat island intensity based on urban morphology and geographical factors – An investigation based on numerical model results for a large ensemble of French cities. *Science of the Total Environment*, 737, 139253.
- **Hogan, R.J., 2019a** : An exponential model of urban geometry for use in radiative transfer applications. *Boundary-Layer Meteorology*, 170, 357-372.
- **Hogan, R.J., 2019b** : Flexible treatment of radiative transfer in complex urban canopies for use in weather and climate models. *Boundary-Layer Meteorology*, 173, 53-78.

## Bibliographie (2)

- **Krayenhoff, E.S., A. Christen, A. Martilli et T.R. Oke, 2014** : A multi-layer radiation model for urban neighbourhoods with trees. *Boundary-Layer Meteorology*, 151 (1), 139-178.
- **Oke, T.R., Mills, G., Christen, A., et J.A. Voogt, 2017** : *Urban Climates*, Cambridge University Press.
- **Masson, V., 2021** : Présentation URBAN-ACCORD meeting.
- **Nagel, T., R. Schoetter, V. Bourgin, V. Masson et E. Onofri, 2023** : Drag Coefficient and Turbulence Mixing Length of Local Climate Zone-Based Urban Morphologies Derived Using Obstacle-Resolving Modelling. *Boundary-Layer Meteorology*, 186, 737-769.
- **Retailleau, F., R. Schoetter, V. Forest et C. Caliot, 2023** : Résolution d'un problème de transferts thermiques couplés en géométrie urbaine par la méthode Monte Carlo. Présentation à la Société Française de Thermique.
- **Rubin, M., 1985** : Optical properties of soda lime silica glasses. *Solar Energy Materials*, 12(4), 275-288.
- **Schoetter, R., V. Masson, A. Bourgeois, M. Pellegrino et J.P. Lévy, 2017** : Parametrisation of the variety of human behaviour related to building energy consumption in the Town Energy Balance (SURFEX-TEB v.8.1). *Geoscientific Model Development*, 10, 2801-2831.
- **Schoetter, R., C. Caliot, T.-Y. Chung, R.J. Hogan et V. Masson, 2023** : Quantification of uncertainties of radiative transfer calculation in urban canopy models. *Boundary-Layer Meteorology*, 189, 103-138.
- **Schoetter, R., R.J. Hogan, C. Caliot et V. Masson, 2024** : Coupling the urban canopy model TEB (SURFEXv9.0) with the radiation model SPARTACUS-Urbanv0.6.1 for more realistic urban radiative exchange calculation. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1118>.
- **Stretton, M.A., W. Morrison, R.J. Hogan, et S. Grimmond, 2022** : Evaluation of the SPARTACUS-Urban radiation model for vertically resolved shortwave radiation in urban areas. *Boundary-Layer Meteorology*, 184, 301-331.