

Modélisation par CFD des échanges convectifs en milieu urbain : apports et enjeux

T. Gresse, L. Merlier, J. Jacob (M2P2 UMR 7340)
05/12/2024

Remerciements à F. Schmitt, A. Rodler et à toute l'équipe du projet DIAMS !

PLAN

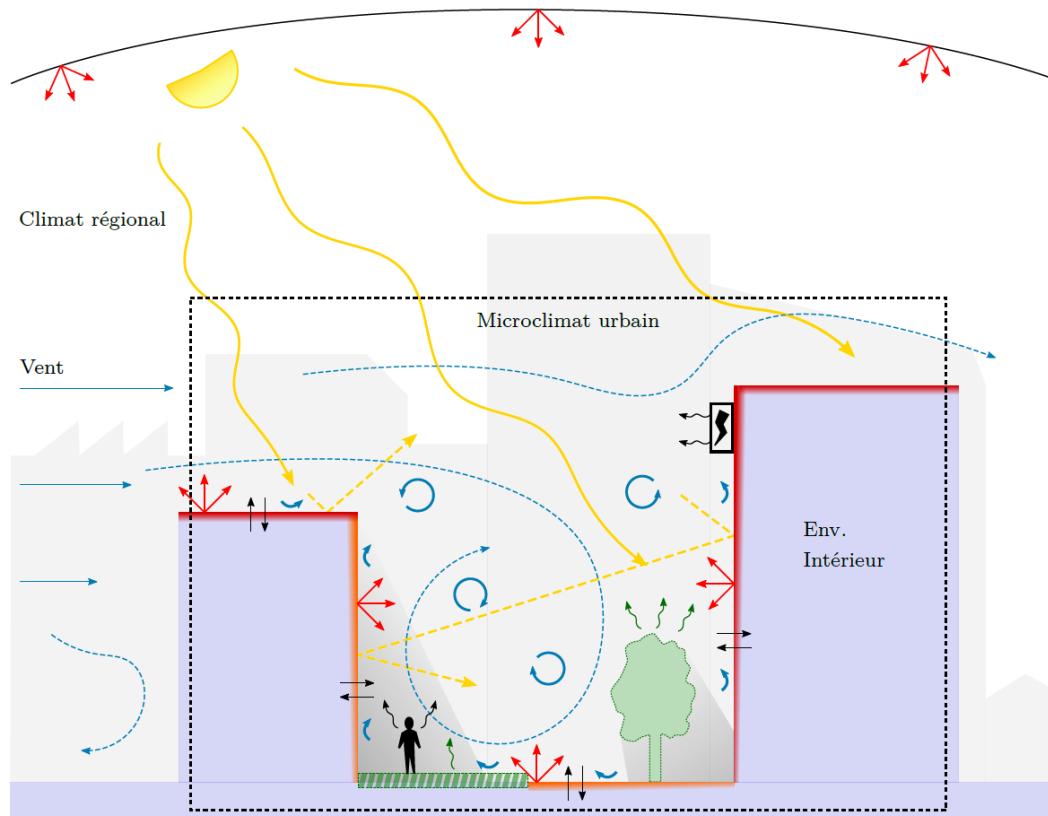
- La modélisation microclimatique urbaine
- La modélisation par la CFD-LES des échanges convectifs urbains avec TRABOULE-ProLB
- Etude d'écoulements de convection mixte en rue canyon
- Conclusions et perspectives

La modélisation microclimatique urbaine

Les microclimats urbains

Phénomènes physiques

4



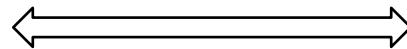
- Rayonnement solaire
- Écoulements d'air
- Stockage / Conduction
- Rayonnement infrarouge
- Échanges convectifs
- Évapo-transpiration
- Multi-réflexions
- Turbulence
- Rejets anthropogéniques
- Température de surface

Les modèles de climats urbains

5

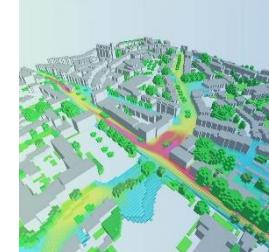
Classification

Echelle ville



Echelle quartier

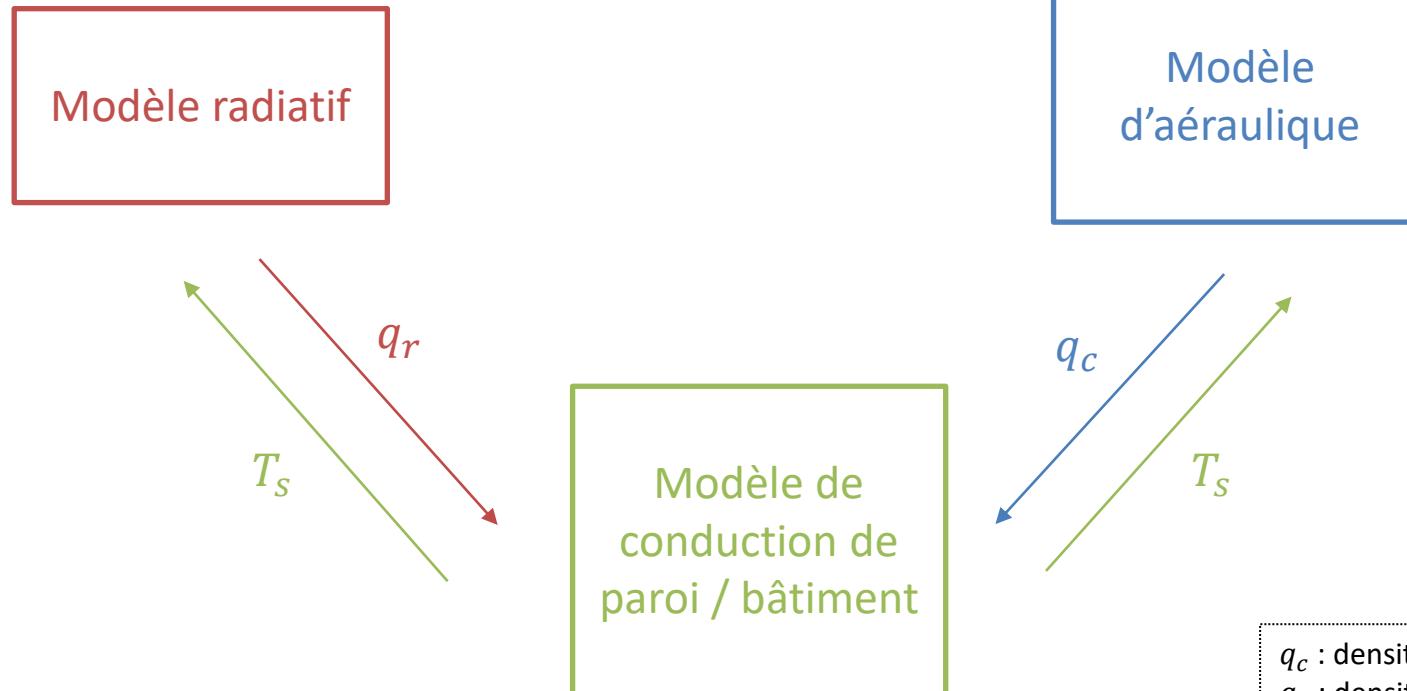
- Reposent sur l'utilisation de *paramètres moyens* (rugosité, l'albédo, etc)
 - Représentent de manière *non-explicite* les formes urbaines.
 - Produisent des *données homogènes* pour l'ensemble du quartier considéré
 - Demandent des *ressources de calcul limitées*
- ⇒ TEB, UWG..
- Reposent sur le *maillage* des surfaces et de l'air
 - Représentent de manière *explicite* la structure tri-dimensionnelle du bâti
 - Calculent les conditions microclimatiques avec une *haute résolution*
 - Demandent des *ressources de calcul conséquentes*
- ⇒ ENVI-met, SOLENE-Microclimat..



Les modèles microclimatiques

6

Principe de la modélisation

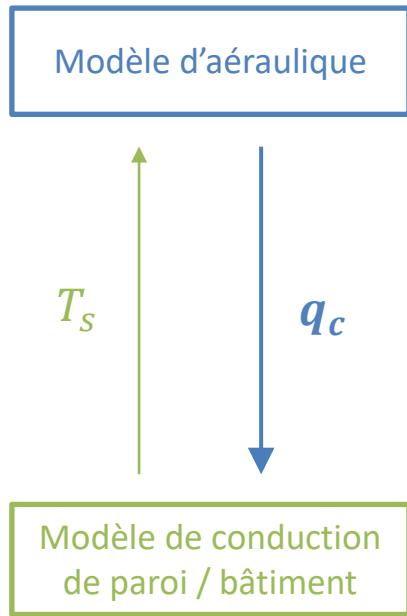


q_c : densité de flux convectif
 q_r : densité de flux radiatif
 T_s : température de surface

Les modèles détaillés

Modélisation des échanges convectifs

7



1. Utilisation de corrélations empiriques pour h_c
→ U_v et T_a issus de données météo
2. Utilisation de corrélations empiriques pour h_c
→ U_v et T_a issus de calculs avec modèles zonaux ou CFD
3. Calcul direct de q_c par la CFD
→ voir la suite

h_c : coefficient d'échange convectif
 U_v : vitesse du vent
 T_a : température d'air

La modélisation par la CFD-LES des échanges convectifs urbains avec TRABOULE-ProLB

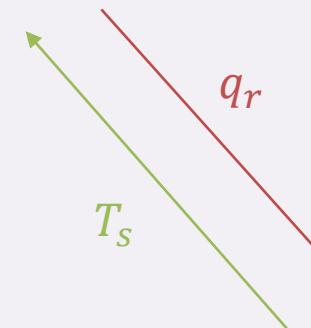
TRABOULE-ProLB

Présentation générale

9

Modèle radiatif

- ETR : méthode VF
- Milieu participant
- Ciel isotrope
- Maillage Cartésien

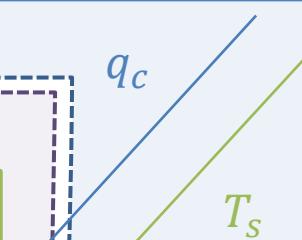


TRABOULE



Modèle d'aéraulique

- Dynamique : LBM-LES
- Eq. énergie : méthode VF
- Flottabilité : Boussinesq
- Lois de parois pour U et T
- Maillage Cartésien



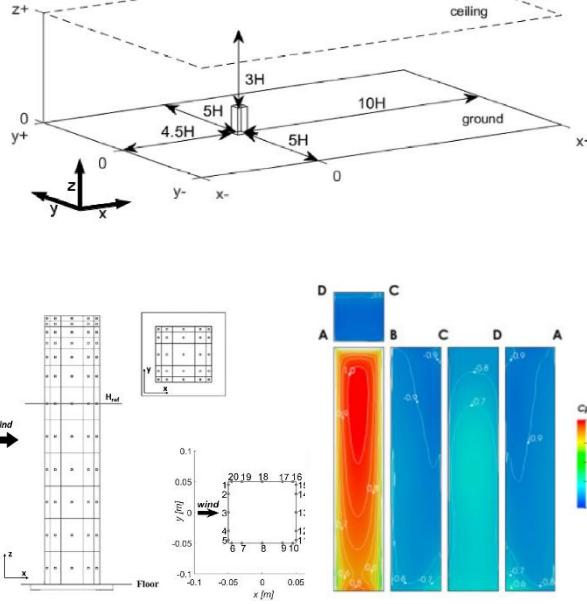
Modèle de conduction de paroi

- Eq. chaleur : méthode VF
- Multicouches
- Maillage 1D raffiné

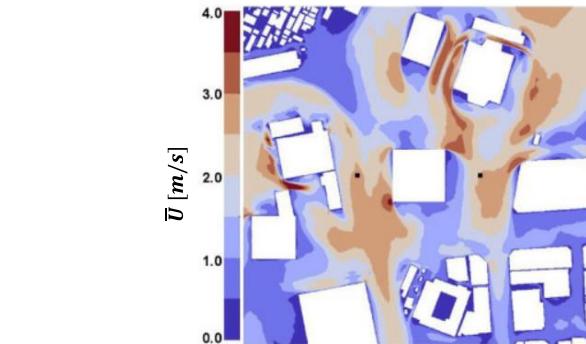
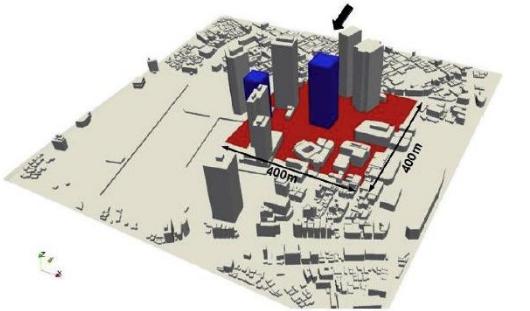
Application de ProLB

Etudes aérauliques urbaines

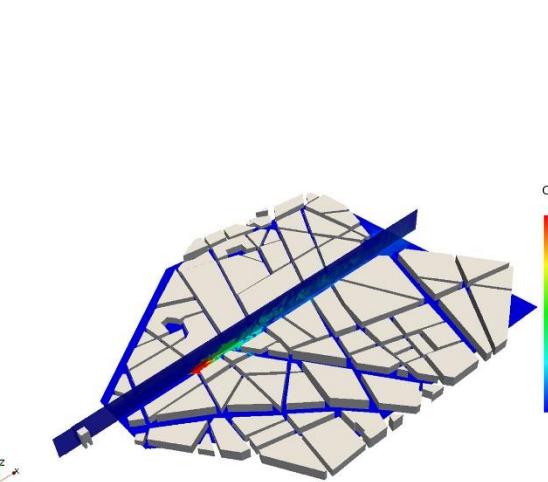
10



Écoulements autour de bâtiments
(Buffa *et al.*, 2021)



Études de vent à l'échelle du quartier
(Jacob et Sagaut, 2018)



Dispersion de polluants
(Merlier *et al.*, 2019)

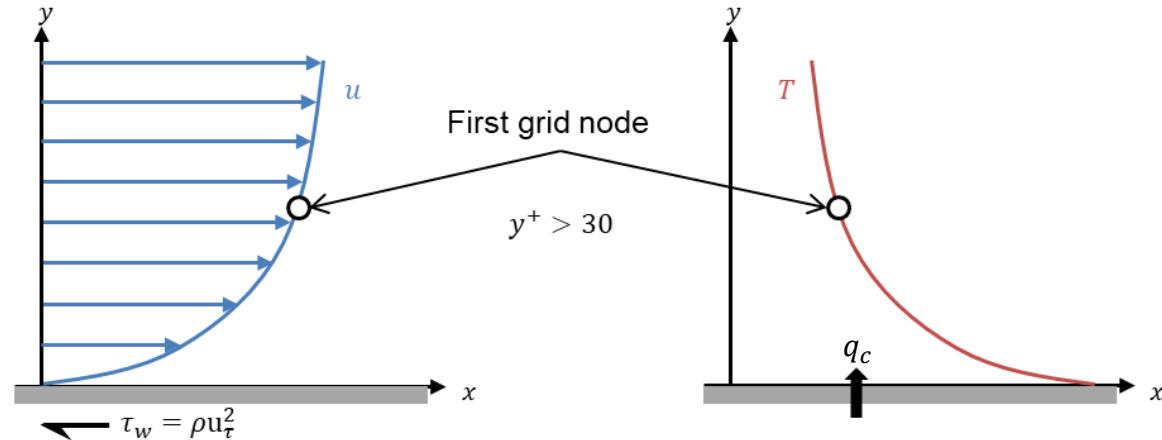
TRABOULE-ProLB

11

Modélisation de l'échange convectif

- Lois de parois standard

- Equations de couche limite 1D



Quantité de mouvement:

$$\nu \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

Energie:

$$\nu \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$

→

$$\left\{ \begin{array}{l} u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B \\ T^+ = Pr_{t,w}(u^+ + P) \end{array} \right.$$

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu}$$

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau}$$

$$T^+ = \frac{(T_s - T_a)\rho c_p u_\tau}{q_c}$$

TRABOULE-ProLB

Modélisation de l'échange convectif

12

- Lois de parois dans ProLB

- Vitesse (*Cai et Sagaut, 2021*)

$$u^+ = Re_y \left[\left(1 - \tanh \frac{Re_y}{s} \right)^p \sqrt{Re_y} + \left(\tanh \frac{Re_y}{s} \right)^p \frac{1}{E} e^{W(\kappa E Re_y)} \right]^{-1}$$

- Temperature (*Kader, 1981*)

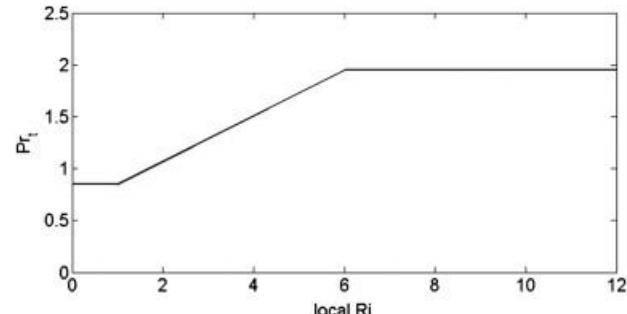
$$T^+ = Pr y^+ e^{-\Gamma} + \boxed{Pr_{t,w}} \left(\frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B + P_J \right) e^{-1/\Gamma} \text{ avec } \Gamma = \frac{0.01(Pr y^+)^4}{1+5Pr^3 y^+}$$

- Densité de flux convectif (pour $y^+ > 30$)

$$q_c = \frac{(T_s - T_a) \rho c_p u_\tau}{\boxed{Pr_{t,w}} \left[\frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B + P_J \right]}$$

Ajustement du $Pr_{t,w}$ pour les écoulements de convection mixte urbains (*T. Defraeye et al, 2011*)

$Pr_{t,w}$ fonction du R_i local (*Allegrini et al., 2012*)



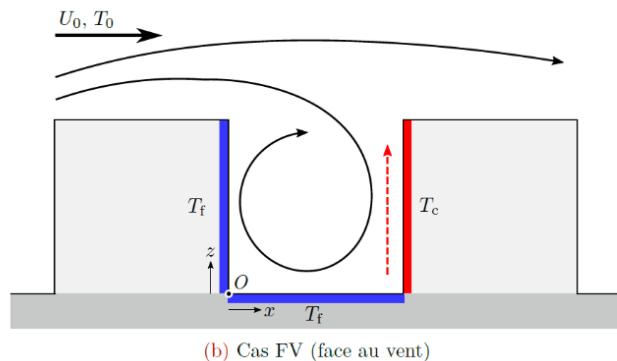
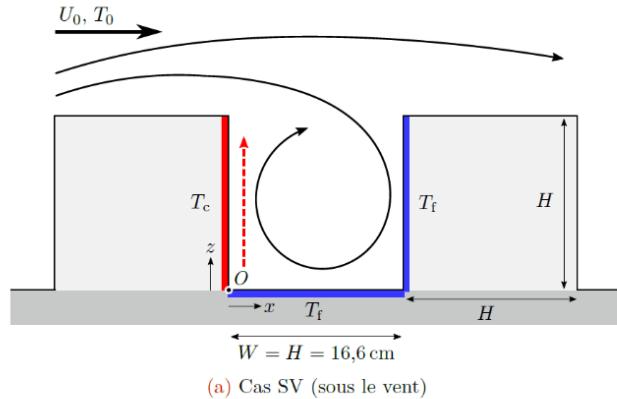
Etudes d'écoulement de convection mixte en rue canyon

Ecoulement de convection mixte en rue canyon

14

Etude 1 : conditions stationnaires - configurations

F. Schmitt (2024), *Interactions rayonnement-atmosphère en milieu urbain : modélisation avancée et analyse de leurs effets sur le rafraîchissement*, Thèse de doctorat, INSA de Lyon



Paramètre	SV (sous le vent)	FV (face au vent)
T_c ($^{\circ}\text{C}$)	120,0	118,5
T_f ($^{\circ}\text{C}$)	25,0	25,0
Ri_H (-)	1,245	1,226
U_0 (m s^{-1})		0,65
Re_H (-)		7×10^3
T_0 ($^{\circ}\text{C}$)		24,0

Paramètres des cas SV et FV

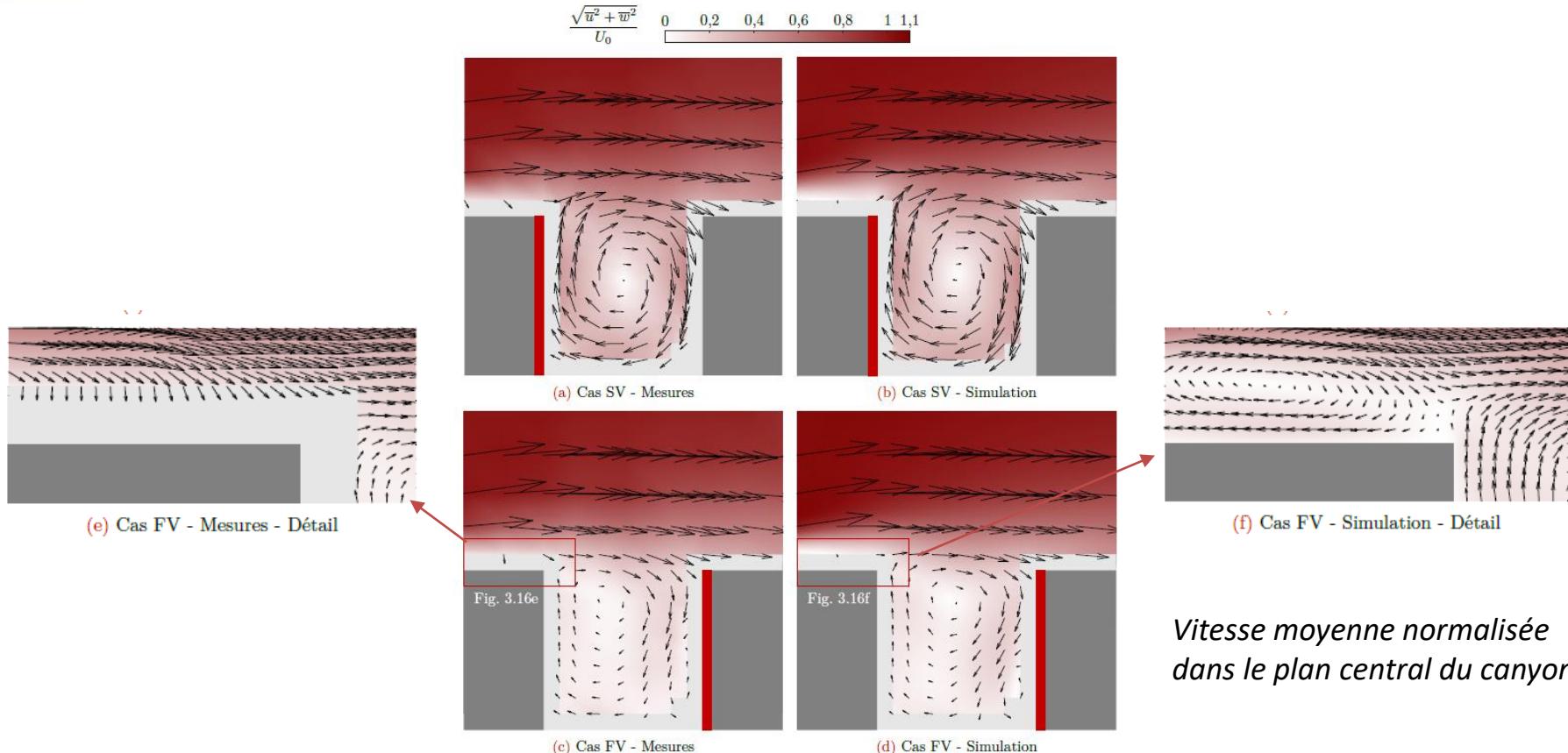
Remarque : Ajustement du $Pr_{t,w}$ dans la loi de paroi thermique en fonction du R_i local

Mesures en soufflerie (Marucci et Carpentieri, 2019)

Ecoulement de convection mixte en rue canyon

15

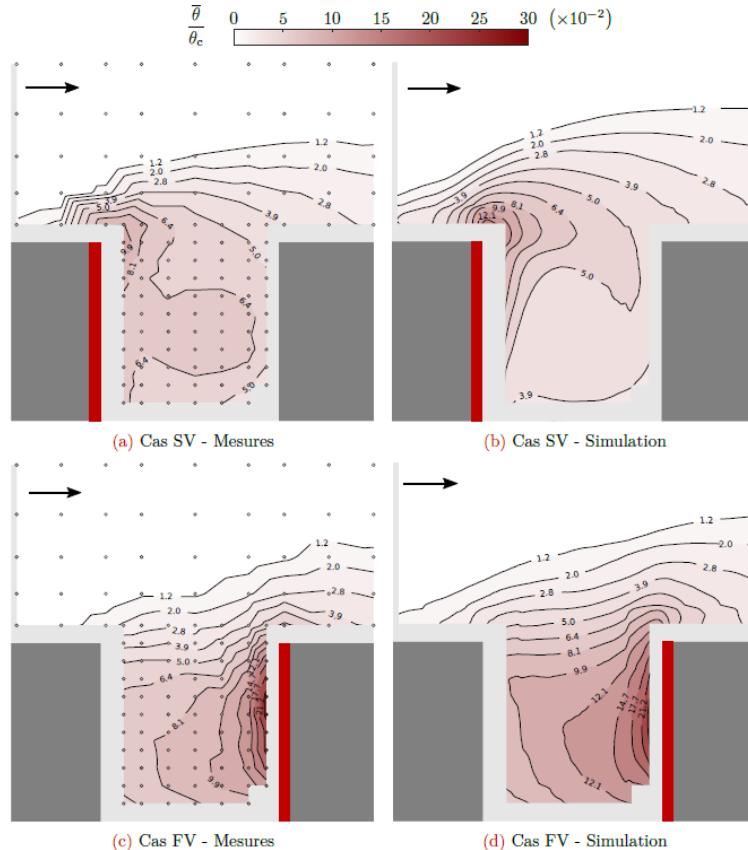
Etude 1 : conditions stationnaires - résultats



Ecoulement de convection mixte en rue canyon

16

Etude 1 : conditions stationnaires - résultats



Contour de la température moyenne normalisée dans le plan central du canyon

Ecoulement de convection mixte en rue canyon

17

Etude 2 : conditions dynamiques



DIagnostic, Modélisation & gestion de la Surchauffe urbaine en période de canicule : apports croisés des outils de simulation microclimatique et de l'imagerie IRT

Partenaires



	MATHIS	SOLENE-Microclimat	SOLENE-SUSHI	TRABOULE-ProLB
Radiation	Isotropic sky Radiosity method Form factors : analytical Multiple reflections One node for each face (wall, ground, roof)	Solene Perez' sky model [28] Radiosity method Form factors : contour integration 3 reflections (0 for LW from walls) Unstructured surface mesh (triangle)	LW: multiple reflections	Isotropic sky Radiative transfer equation resolution Structured surface and volume meshes
Detail level	•	••	••	•••
Thermo-aeraulics	Parametric model Zonal mesh	Code_Saturne CFD RANS $k - \varepsilon$ Unstructured volume mesh	-	ProLB CFD LBM-LES Structured volume mesh
Detail level	•	••	-	•••
Convective exchange	Empirical correlations [34]	Empirical correlations [37]	Empirical correlations [38]	CFD fluxes computation
Detail level	•	•	•	•••
Conduction	Finite volume Multi-layers 1D 3 layers	Electrical analogy (RC) Multi-layers 1D Soil : 3 layers Walls : 1 layer	Transfer functions (Fourier domain) Multi-layers 1D No mesh	Finite volume Multi-layers 1D Refined
Detail level	••	••	•••	••

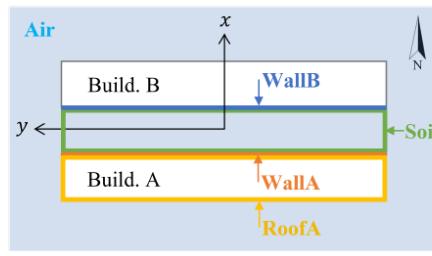
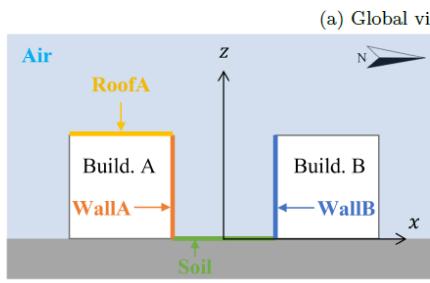
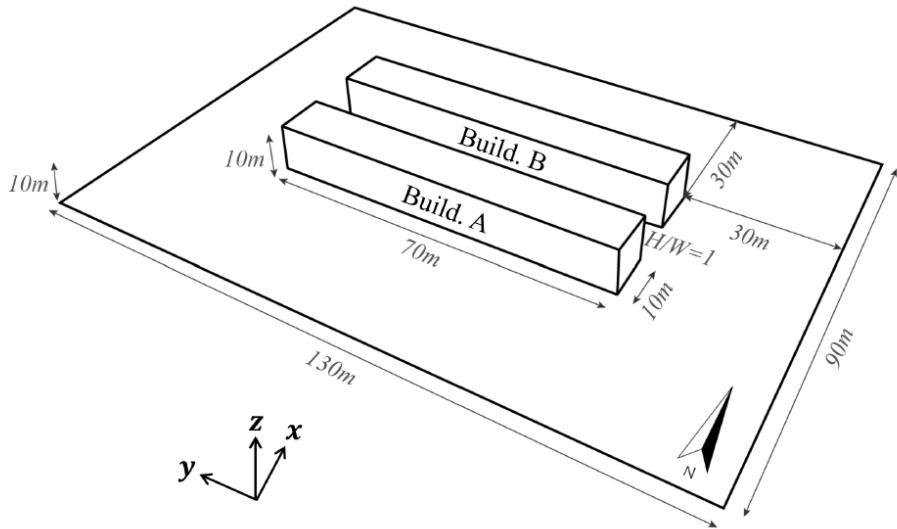
⇒ **Benchmark académique**

Remarque : dans ProLB,
loi de paroi thermique
non ajustée ($Pr_{t,w} = 0.85$ valeur standard)

Ecoulement de convection mixte en rue canyon

18

Etude 2 : conditions dynamiques - configuration



Météo :

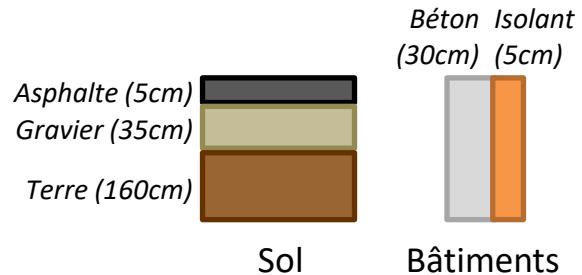
- Station Dijon



Date :

- 13-19/07/2022

Composition parois :



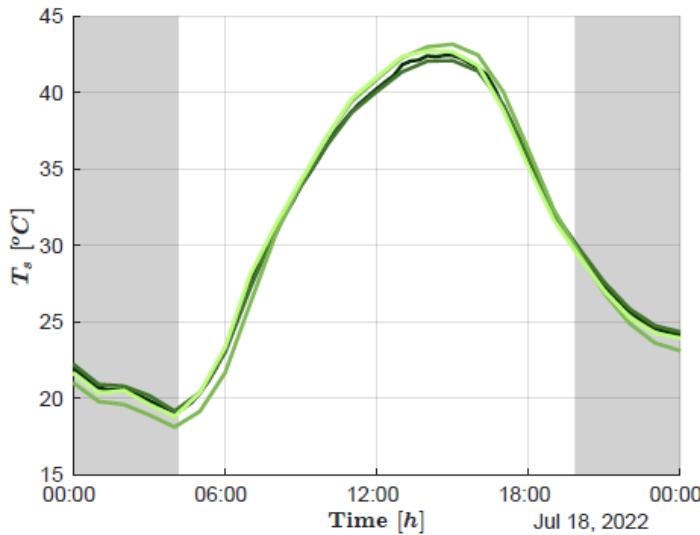
Ecoulement de convection mixte en rue canyon

19

Etude 2 : conditions dynamiques - résultats

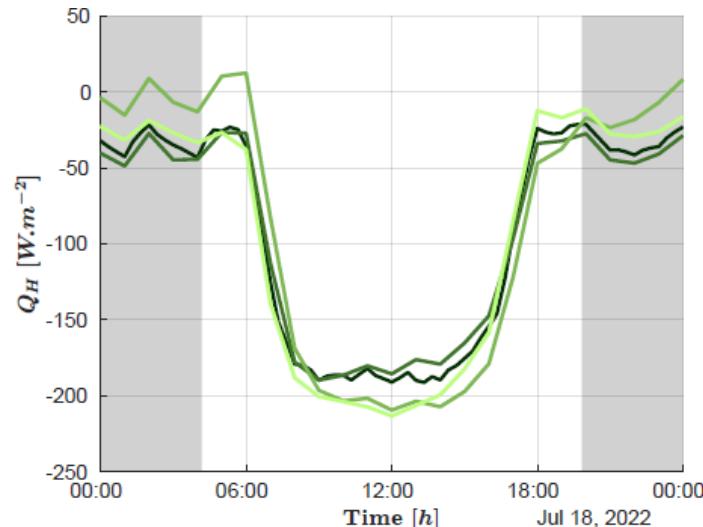
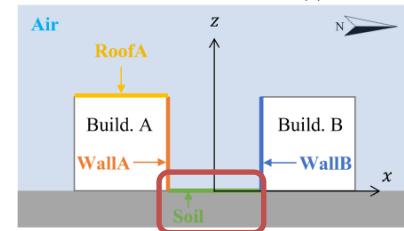
Sol - 18/07

$$h_c = 30 \text{ W/m}^2/\text{K}$$



Température de surface

- MATHIS
- SOLENE - MICROCLIMAT
- SOLENE - SUSHI
- TRABOULE



Flux convectif

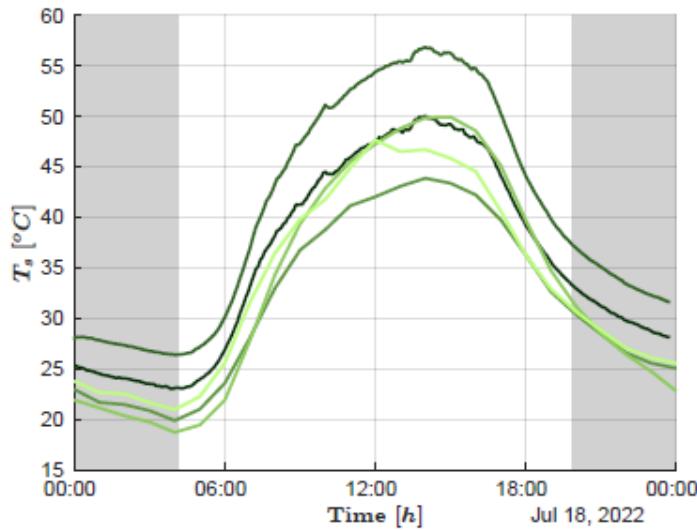
Ecoulement de convection mixte en rue canyon

20

Etude 2 : conditions dynamiques - résultats

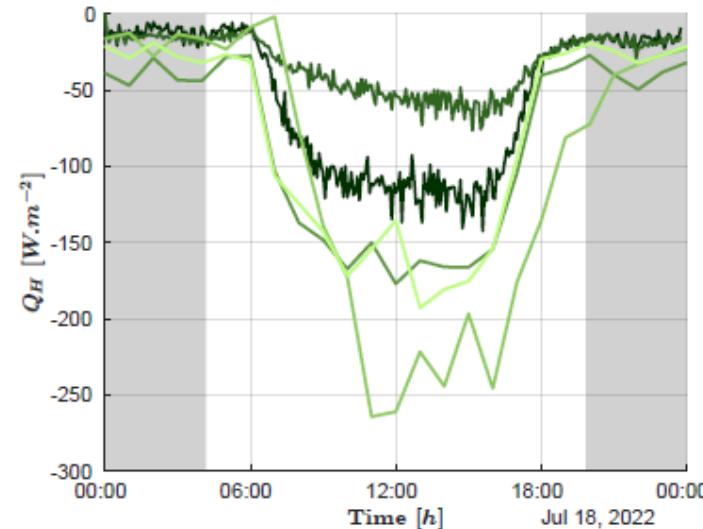
Sol - 18/07

Modèles couplés

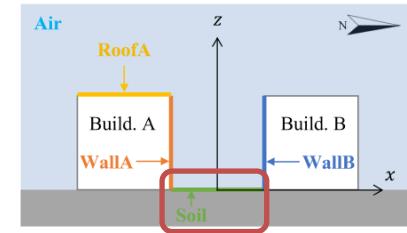


Température de surface

- MATHIS
- SOLENE - MICROCLIMAT
- SOLENE - SUSHI
- TRABOULE - PROLB_{TWF}
- TRABOULE - PROLB_{CAL}



Flux convectif



Conclusions et perspectives

Conclusions et perspectives

Conclusions

- Variété des approches de modélisation de q_c dans les modèles de microclimat urbain
 - Utilisation de corrélations empiriques
 - Modélisation directe par CFD
- Modélisation directe de q_c par CFD-LES dans TRABOULE-ProLB
 - Tendance à la surestimation par la loi de paroi thermique ajustée vs mesures (conditions stationnaires)
 - Estimation plus faible avec la loi de paroi non ajustée vs corrélations (conditions dynamiques)

⇒ Limites de l'utilisation de la loi de paroi thermique standard même avec ajustement ([Iousef et al, 2023](#))

Perspectives

- Adaptation des lois de paroi pour simuler des écoulements de convection mixte urbains
- Besoin de données expérimentales pour discriminer les performances de la modélisation par loi de paroi vs corrélations dans des cas complexes
- Etude de l'impact du niveau de détail de la modélisation sur q_c : géométrie des façades (balcons)

Références

- [F. Schmitt, 2024](#) : F. Schmitt (2024). Interactions rayonnement-atmosphère en milieu urbain : modélisation avancée et analyse de leurs effets sur le rafraîchissement, *Thèse de doctorat*, INSA de Lyon
- [Buffa et al., 2021](#) : Buffa, E., Jacob, J. et Sagaut, P. (2021). Lattice-Boltzmann-based large eddy simulation of high-rise building aerodynamics with inlet turbulence reconstruction. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*
- [Jacob et Sagaut, 2018](#) : Jacob, J. et Sagaut, P. (2018). Wind comfort assessment by means of large eddy simulation with lattice Boltzmann method in full scale city area. *Building and Environment*
- [Merlier et al., 2019](#) : Merlier, L., Jacob, J. et Sagaut, P. (2019). Lattice-Boltzmann large eddy simulation of pollutant dispersion in complex urban environment with dense gas effect: Model evaluation and flow analysis. *Building and Environment*
- [Marucci et Carpentieri, 2019](#) : Marucci, D. et Carpentieri, M. (2019). Effect of local and upwind stratification on flow and dispersion inside and above a bi-dimensional street canyon. *Building and Environment*
- [Defraeye et al., 2011](#) : Defraeye, T., Blocken, B. et Carmeliet, J. (2011). An adjusted temperature wall function for turbulent forced convective heat transfer for bluff bodies in the atmospheric boundary layer. *Building and Environment*
- [Allegrini et al., 2012](#) : Allegrini, J., Dorer, V., Defraeye, T. et Carmeliet, J. (2012b). An adaptive temperature wall function for mixed convective flows at exterior surfaces of buildings in street canyons. *Building and Environment*
- [Cai et Sagaut, 2021](#) : Cai, S.-G. et Sagaut, P. (2021). Explicit wall models for large eddy simulation. *Physics of Fluids*
- [Kader, 1981](#) : Kader, B. A. (1981). Temperature and concentration profiles in fully turbulent boundary layers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*
- [Iousef, 2023](#) : Iousef, S. (2023). Computational modeling of convective heat transfer at building surfaces. Phd Thesis 1 (Research TU/e / Graduation TU/e), Built Environment]. Eindhoven University of Technology.

Merci pour votre attention !



Modélisation par CFD des échanges convectifs en milieu urbain : apports et enjeux

T. Gresse, L. Merlier, J. Jacob (M2P2 UMR 7340)
05/12/2024

Remerciements à F. Schmitt, A. Rodler et à toute l'équipe du projet DIAMS !

Annexes

TRABOULE-ProLB

26

Détail solveur ProLB



Thermal LBM

- LBM-BGK equation (velocity and density)

$$f_i(x + c_i \delta t, t + \delta t) = f_i^{eq}(x, t) + \left(1 - \frac{1}{\tau}\right) f_i^{neq}(x, t)$$

With $\tau = \frac{\nu}{c_s^2} + \frac{\Delta t}{2}$ the relaxation time

f_i^{eq} : 3rd order equilibrium distribution function

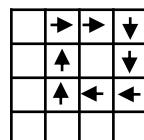
f_i^{neq} : Hybrid Recursive Reconstruction procedure ([Jacob and al. 2018](#))

- Energy equation (temperature)
→ FV method

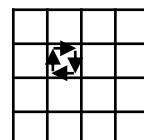
- Boussinesq source term

LES

- Principle:



Resolved



Modeled

- Eddy viscosity paradigm:

$$R_{ij} = \overline{u'_i u'_j} \cong -2\nu_t S_{ij} + R_{kk} \delta_{ij}$$

- $\nu = \nu_{mol} + \nu_t$ in the relaxation time

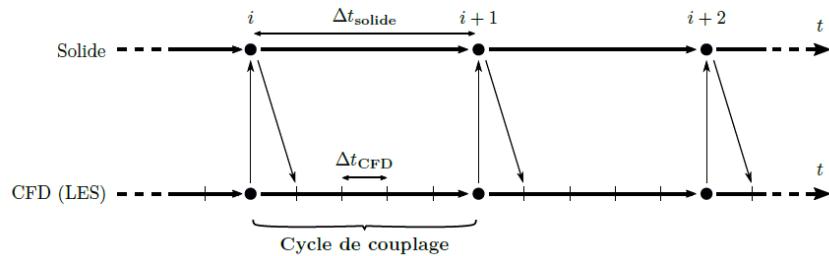
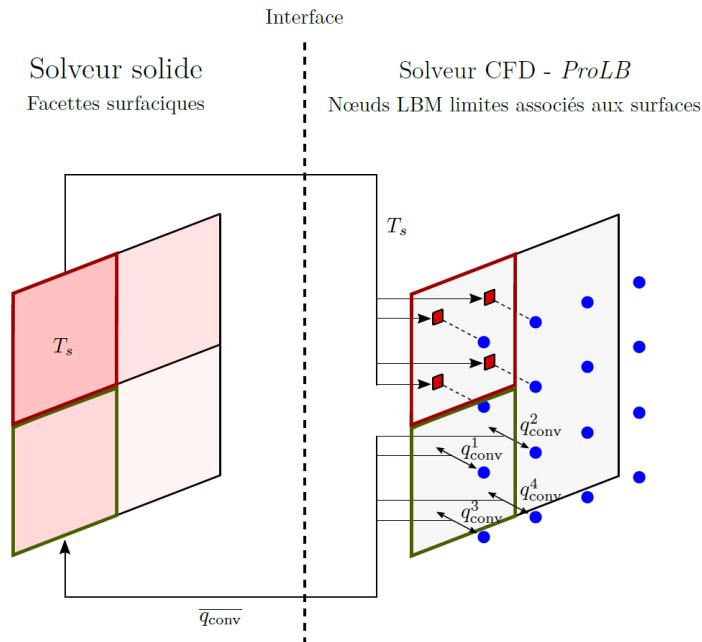
Boundary conditions

- Immersed boundary approach
- Macroscopic quantities at boundary nodes:
 - Dirichlet: interpolation
 - Neumann: extrapolation
 - Wall functions
- Computation of the velocity gradients on boundary nodes
- Reconstruction of the distribution functions

TRABOULE-ProLB

27

Principe du couplage



Ecoulement de convection mixte en rue canyon

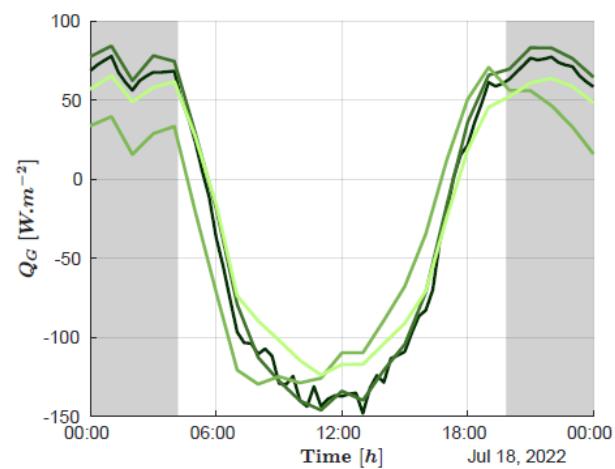
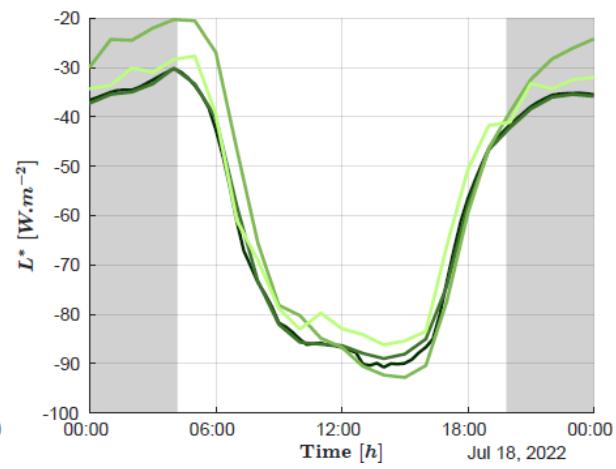
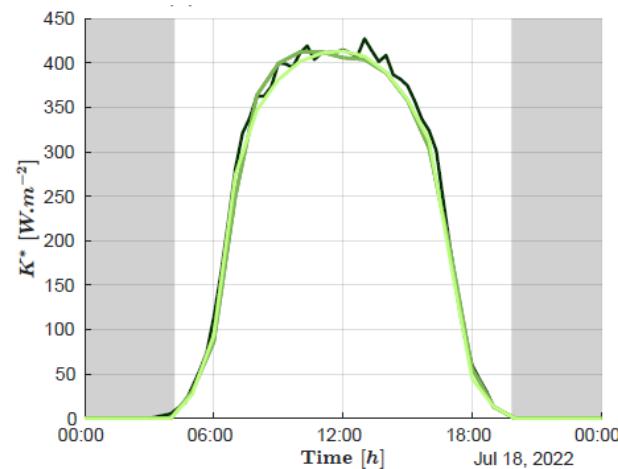
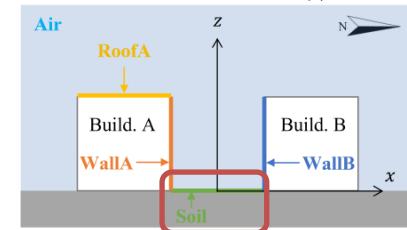
28

Etude 2 : conditions dynamiques - résultats

Sol - 18/07

$$h_c = 30 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

- MATHIS
- SOLENE - MICROCLIMAT
- SOLENE - SUSHI
- TRABOULE - PROLB_{TWF}
- TRABOULE - PROLB_{CAL}



Ecoulement de convection mixte en rue canyon

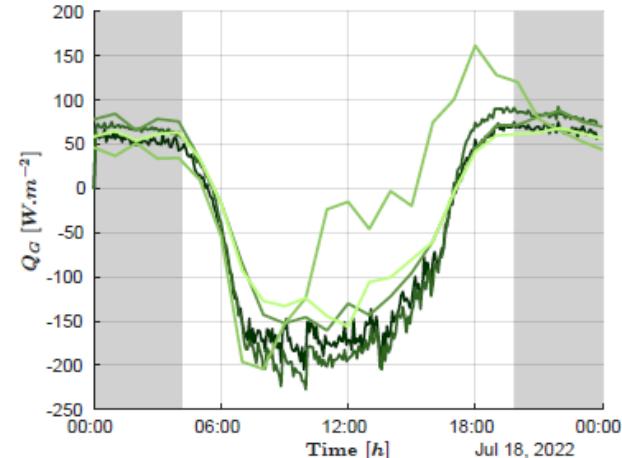
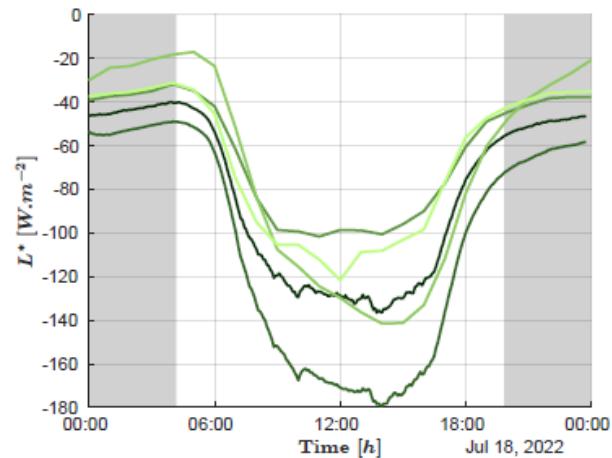
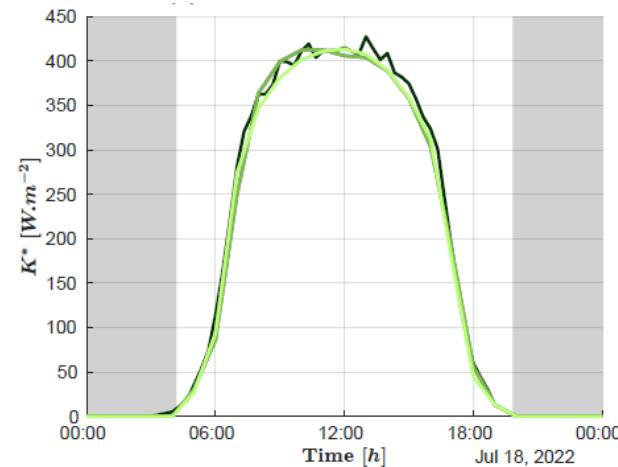
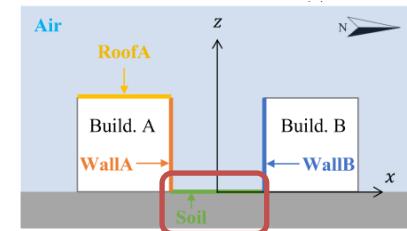
29

Etude 2 : conditions dynamiques - résultats

Sol - 18/07

Modèles couplés

- MATHIS
- SOLENE - MICROCLIMAT
- SOLENE - SUSHI
- TRABOULE - PROLB_{TWF}
- TRABOULE - PROLB_{CAL}



Flux radiatif CLO

Flux radiatif GLO

Flux conductif