

Mise en place d'une méthodologie de construction de benchmarks pour l'évaluation des modèles de microclimat urbain

Teddy GRESSE¹, Julie SORIANO¹, Lucie MERLIER^{1*}, Auline RODLER³, Félix Schmitt², Mathieu GALTIER², Frédéric KUZNIK², Frédéric ANDRE⁴, Jérôme JACOB⁵, Lionel SOULHAC⁶, Jean-Claude KRAPEZ⁷, Jean PIERRO⁷, Laure ROUPIOZ⁸, Xavier BRIOTTET⁸, Françoise NERRY⁹, Marjorie MUSY³

¹ Univ Lyon, UCBL, INSA Lyon, CNRS, CETHIL, UMR5008, Villeurbanne F-69621, France

² Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, CETHIL, UMR5008, Villeurbanne F-69621, France

³ CEREMA BPE/IRSTV, Nantes F-44262, France

⁴ Univ Lyon, CNRS, UCBL, INSA Lyon, CETHIL, UMR5008, Villeurbanne F-69621, France

⁵ Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, M2P2 UMR 7340, 13451 Marseille, France

⁶ Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, University of Lyon, CNRS UMR 5509 Ecole Centrale de Lyon, INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, 69134, Ecully, France

⁷ ONERA, The French Aerospace Lab, DOTA, F-13661 Salon cedex Air, France

⁸ ONERA, The French Aerospace Lab, DOTA, Université de Toulouse, 3100, Toulouse

⁹ ICube, Strasbourg, France

* lucie.merlier@insa-lyon.fr

Résumé - Plusieurs modèles de microclimat urbain ont été développés ces dernières décennies, leur intercomparaison et leur validation restent cependant un enjeu de recherche. Cette contribution propose une méthodologie en deux étapes pour répondre à cet enjeu, basée sur deux cas d'étude : un cas d'étude académique idéal, puis un cas réel disposant des mesures effectuées dans le cadre de la campagne CAMCATT. Cette méthodologie a été appliquée pour quatre modèles de microclimat urbain : MATHIS, SOLENE-Microclimat, SOLENE-SUSHI et TRABOULE-ProLB, et permet d'identifier les capacités des modèles, leur similarités et leurs différences. Elle apporte donc un premier élément de réponse à l'enjeu décrit et sera amenée à être enrichie et appliquée plus largement à l'avenir.

1. Introduction

Dans le contexte actuel où les conséquences du réchauffement climatique et du développement urbain, telles que les surchauffes urbaines, doivent être maîtrisées, la compréhension et la connaissance des phénomènes impactant la thermique urbaine est un prérequis. Par ailleurs, la modélisation et la simulation numériques peuvent fournir une aide à la décision dans l'établissement de stratégies d'adaptation aux surchauffes urbaines et d'atténuation de leurs impacts négatifs. Différents modèles de microclimat urbain sont actuellement développés et améliorés. Cependant, leur qualification ou leur validation reste une tâche très difficile en raison du manque de méthodologie et de données disponibles. La communauté des chercheurs en modélisation énergétique des bâtiments a proposé un cadre de validation complet, le BESTEST [1], mais aucune proposition de ce type n'a été faite pour la modélisation du microclimat urbain. Dans le cadre du projet ANR DIAMS, nous proposons une méthodologie pour engager une telle approche et une première mise à l'épreuve de la démarche suggérée, en nous concentrant sur les modèles dédiés à l'échelle du quartier.

2. Méthodologie

La méthodologie développée a pour but de permettre la comparaison de modèles de microclimat urbain très différents de par leurs objectifs d'utilisation et leurs résolutions temporelle et

spatiale. Pour cela, une démarche de complexification progressive des cas étudiés est adoptée. La première étape considère un cas académique dans des configurations entièrement définies afin de mettre en évidence les différences induites par les approches de modélisation employées, et donc leurs avantages et inconvénients respectifs. La seconde étape consiste à confronter les résultats des simulations microclimatiques avec des mesures et observations faites sur une scène urbaine réelle. Cette comparaison est effectuée sur la base d'un ensemble de données acquis lors de la campagne de mesures CAMCATT-AI4GEO [2] menée dans la ville de Toulouse en juin 2021.

2.1. Cas d'étude académique

La géométrie de la rue canyon idéale présentée Figure 1 se compose de deux bâtiments parallélépipèdes rectangles de 70 m de longueur et de 10 m de hauteur, positionnés sur un sol dégagé et espacés de 10 m afin d'obtenir un rapport d'aspect de 1.

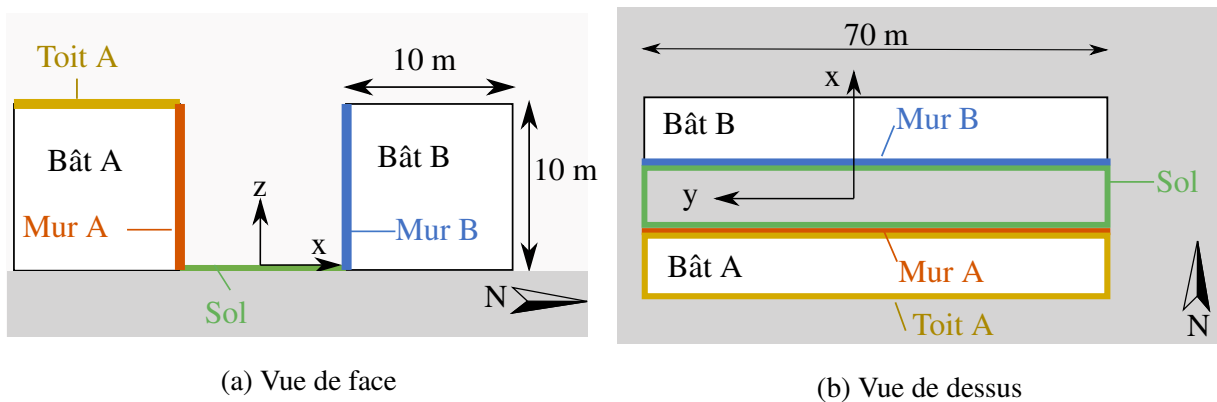


Figure 1 : Géométrie et dimensions de la rue canyon idéale.

Une procédure permettant d'étudier les différents phénomènes physiques mis en jeu, à savoir le rayonnement solaire et infrarouge thermique, l'aérodynamique, et la conduction et le stockage thermique dans les parois/sol, a été élaborée à travers la définition de huit configurations d'étude représentées sur la Figure 2. Pour toutes les configurations, les propriétés optiques et thermiques des parois sont définies selon des valeurs réalistes. Les données météorologiques utilisées proviennent de la station météorologique de Dijon sur la période du 13/07/22 au 18/07/22. Dans les cas où la conduction dans les parois est prise en compte, la température de surface intérieure dans les bâtiments est fixée à 25 °C et la température du sol à 2 m de profondeur est fixée à 25 °C.

Les trois premières étapes de la procédure consistent à étudier indépendamment le rayonnement solaire, le rayonnement infrarouge et l'aérodynamique. Pour le rayonnement solaire, trois instants sont choisis correspondant à des moments types de l'ensoleillement sur la journée du 18/07/22 : le matin à 6h30 (UTC), à la mi-journée à 12h30 (UTC), et en fin de journée à 17h30 (UTC). Pour l'étude du rayonnement infrarouge, les températures de surface sont fixées et un instant d'étude est choisi : le 18/07/22 à 12h30 (UTC). Enfin, l'aérodynamique est considérée isotherme et en régime permanent. Pour chacune de ces trois étapes, deux configurations sont définies, permettant de faire varier un paramètre :

- Pour le rayonnement solaire (A_2) : l'albédo des surfaces
- Pour le rayonnement infrarouge (B_2) : la température de surface
- Pour l'aérodynamique (C_2) : l'orientation et l'intensité du vent en entrée du domaine.

Enfin, la dernière étape tient compte de l'ensemble des phénomènes en considérant dans la configuration D_1 une approche simplifiée pour l'aérodynamique avec l'utilisation d'un coefficient d'échange convectif fixé, et dans la configuration D_2 l'utilisation des modèles complets, faisant notamment intervenir de la CFD (Computational Fluid Dynamics). Une période de sept jours est étudiée (du 13/07/2022 au 19/07/2022), sur laquelle des données météorologiques au pas de temps horaire sont considérées.

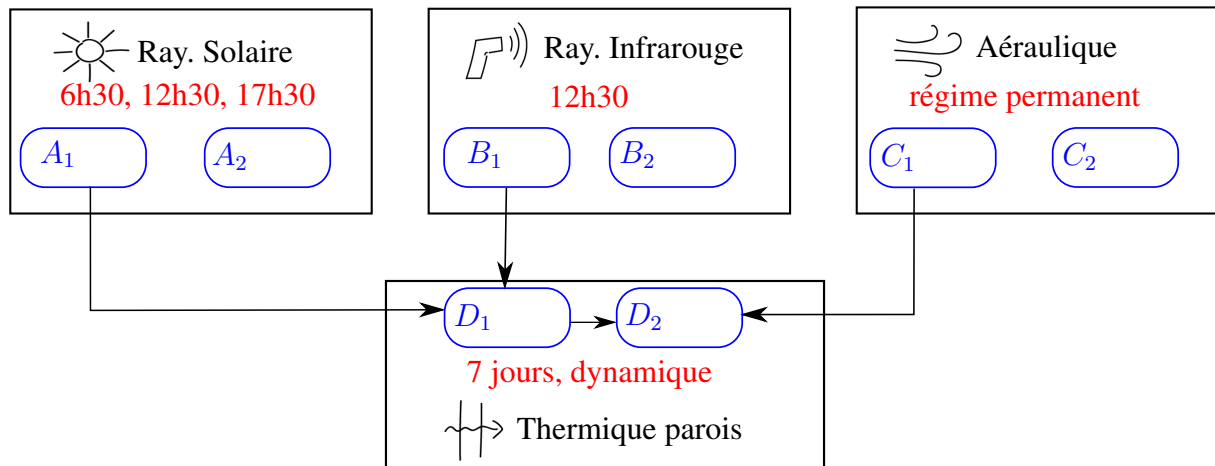


Figure 2 : Huit configurations étudiées (A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 , C_2 , D_1 , D_2) pour l'analyse du rayonnement solaire et infrarouge, de l'aérodynamique et de la thermique du solide. Les heures sont données en UTC et correspondent au 18/07/2022.

2.2. Cas d'étude réel instrumenté : CAMCATT

Dans le cadre de la campagne de mesure CAMCATT-AI4GEO [2], les conditions microclimatiques d'une zone résidentielle située sur le site de l'ONERA à Toulouse ont été mesurées grâce à l'instrumentation de trois bâtiments représentatifs d'une rue canyon (voir Figure 3). 50 iButtons ont été disposés sur les différentes façades et toitures et permettent de mesurer les températures de surface sur la période du 08/06/2021 au 16/06/2021 à une fréquence de 5 min. Egalement, des mesures de LST par caméra infrarouge aéroportée ont été réalisées le 15/06/2021 à 11h30. Par ailleurs, la plupart des propriétés des matériaux ont pu être mesurées lors de cette campagne. Enfin, les données météorologiques de la station météorologique Paul Sabatier, très proche des bâtiments étudiés, sont utilisées pour le rayonnement infrarouge et les températures et vitesses d'air. Les données concernant le rayonnement solaire sont issues de la station météo, située sur le site de MétéoFrance à Toulouse. Dans les bâtiments, une température d'air fixé à $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ est considérée avec un coefficient d'échange convectif de $4\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-1}$, en accord avec les températures intérieures moyennes issues de la campagne de mesure. Dans le sol, la température à 2 m de profondeur est fixée à $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, correspondant à la moyenne de la température du sol mesurée à cette profondeur sur la période d'étude.

Toujours dans une démarche de complexification progressive et à l'image de la dernière étape du cas académique, la procédure d'étude du cas réel consiste à tenir compte de l'ensemble des phénomènes de transfert thermique en considérant dans un premier temps une approche simplifiée pour l'aérodynamique avec l'utilisation de coefficients d'échange convectifs fixés, à savoir $5\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-1}$, $15\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-1}$ et $25\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-1}$, représentatifs de différents régimes de vent. Dans un second temps, les modèles complets, faisant notamment intervenir de la CFD, sont employés.

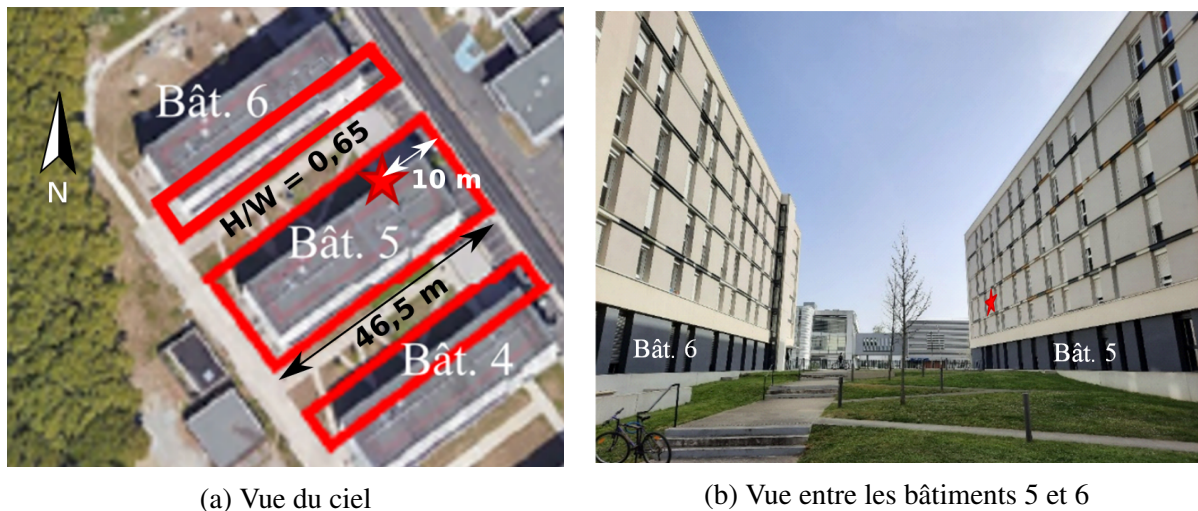


Figure 3 : Bâtiments instrumentés lors de la campagne CAMCATT-AI4GEO [2]. La position du *iButton* sélectionné pour l'étude est indiquée par une étoile rouge.

3. Présentation des modèles

Quatre modèles de microclimat urbain ont été sélectionnés pour une intercomparaison dans le cadre du projet DIAMS. Il s'agit des outils développés ou en cours de développement par les partenaires du projet, rassemblés dans le Tableau 1 : MATHIS [3], SOLENE-Microclimat [4], SOLENE-SUSHI [5] et TRABOULE-ProLB [6].

MATHIS [3] représente la surface urbaine comme un réseau de rues canyon idéales connectées entre elles. Il utilise pour cela une description peu détaillée des phénomènes, et dispose d'un modèle radiatif de surface à surface utilisant la méthode des radiosités, d'un modèle de conduction dans les parois et le sol par discrétisation de l'équation de la chaleur et d'un modèle aéraulique paramétrique. Ces caractéristiques lui permettent de se positionner sur des échelles spatiales et temporelles supérieures aux trois autres modèles.

SOLENE-Microclimat [4] est un modèle issu d'un couplage entre le modèle radiatif de surface à surface SOLENE, utilisant la méthode des radiosités, et le modèle thermo-aéraulique Code-Saturne de type CFD-RANS, incluant une modélisation de la conduction dans les parois et le sol par discrétisation de l'équation de la chaleur. Il intègre également une modélisation des bâtiments, de plusieurs types de végétation ainsi que des phénomènes hydrauliques. Ayant bénéficié de travaux de développement plus nombreux, SOLENE-Microclimat est le plus abouti des quatre modèles étudiés.

SOLENE-SUSHI correspond à un couplage entre SOLENE [7] et SUSHI [5]. Ce dernier modélise le rayonnement infrarouge de surface à surface par la méthode des radiosités et la conduction dans les parois et le sol de manière semi-analytique à l'aide de fonctions de transfert dans l'espace de Fourier. En revanche, aucune modélisation des phénomènes aérauliques n'est incluse à SOLENE-SUSHI.

Enfin, TRABOULE est un modèle radiatif détaillé résolvant l'équation du transfert radiatif dans le volume d'air pouvant tenir compte d'un milieu participant, et incluant une modélisation de la conduction dans les parois et le sol par discrétisation de l'équation de la chaleur. Il peut-être couplé à ProLB [8], un modèle thermo-aéraulique détaillé utilisant une approche CFD-LES avec la méthode de Boltzmann sur réseau.

Modèle	Laboratoires	Niveau de détail		
		Radiatif	Aéraulique	Conduction
MATHIS [3]	CETHIL, LMFA	•	•	•
SOLENE-Microclimat [4]	CEREMA	••	••	••
SOLENE-SUSHI [7, 5]	ONERA, CEREMA	••	/	•••
TRABOULE-ProLB [6]	CETHIL, M2P2	•••	•••	••

Tableau 1 : *Caractéristiques des quatre modèles de microclimat urbain choisis*

4. Résultats

Afin d'illustrer l'utilisation de la méthodologie mise en place pour qualifier les quatre modèles sélectionnés dans l'étude, un résultat caractéristique de chacune des étapes méthodologiques est présenté dans les deux sous-sections suivantes.

4.1. Cas d'étude académique

Les intercomparaisons des modélisations solaire (configurations A_1 , A_2) et infrarouge (configurations B_1 , B_2) ont mis en évidence une bonne concordance des résultats, avec de faibles écarts expliqués par les différentes hypothèses de modélisation (modèle de ciel, méthode de calcul des facteurs de forme). Lors de l'étude des phénomènes aérauliques (configurations C_1 , C_2), des écarts notables ont en revanche été observés, qui ne seront pas approfondis dans cet article. Les résultats obtenus dans la configuration D_1 (modèles radiatif et conductif activés, coefficient convectif fixé à $30 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$) vont être présentés plus en détail.

Les températures de surface moyennes sur chacune des faces sont présentées sur la Figure 4 sur la journée du 18/07/2022. Pour s'assurer que l'initialisation n'influence plus les résultats, cinq jours de simulation ont été ajoutés en amont de la journée étudiée. Afin de mettre en perspective ces résultats, les flux de chaleur solaire, infrarouge, convectif et conductif ont été tracés dans le cas du sol et du mur B sur la Figure 5.

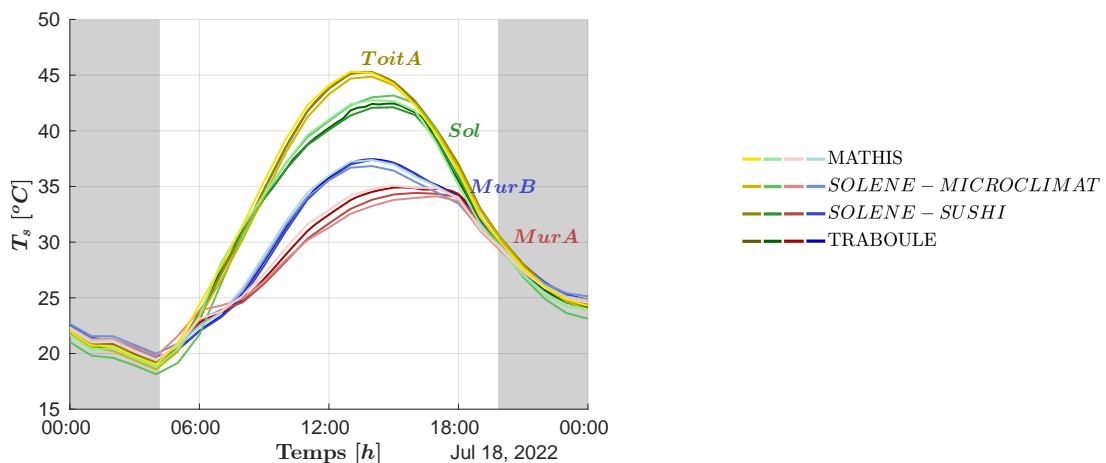


Figure 4 : *Température moyenne de chacune des faces.*

Les quatre modèles simulent des températures de surface aux ordres de grandeurs et dynamiques cohérents pour les quatre faces étudiées, avec des valeurs comprises dans une plage de variations inférieure à 2°C . Ainsi, si SOLENE-Microclimat est considéré comme le modèle

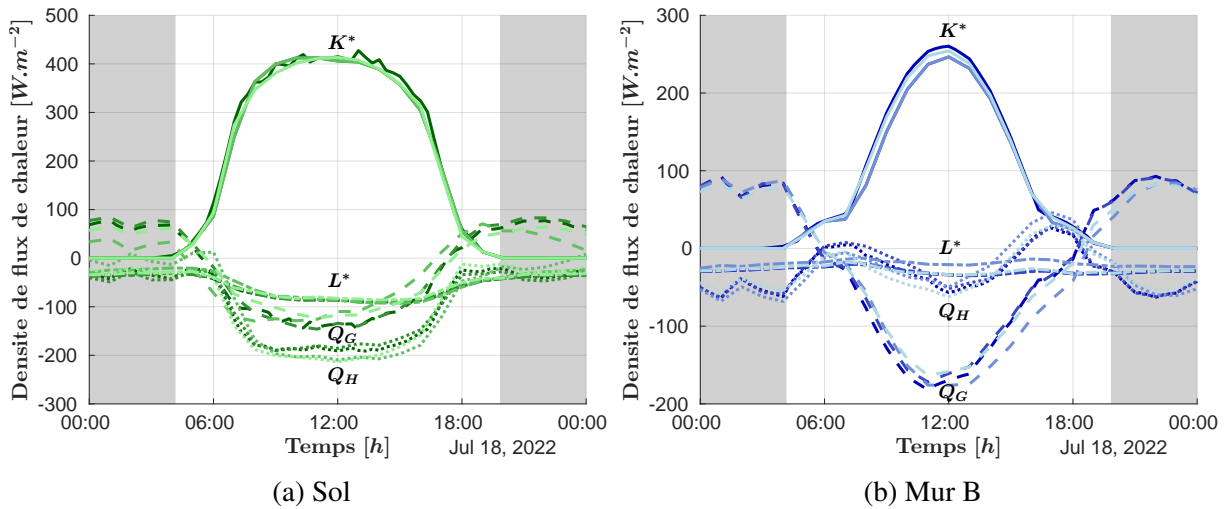


Figure 5 : Flux solaire net K^* , infrarouge net L^* , conductif Q_G et convectif Q_H sur le sol et le mur B. La légende couleur pour les différents modèles est identique à celle de la Figure 4.

de référence, les erreurs quadratiques moyennes pour les modèles TRABOULE, MATHIS et SOLENE-SUSHI ne dépassent pas 1°C . L'analyse des flux (Figure 5) permet toutefois d'observer certaines différences. Notamment, des écarts allant jusqu'à 40 W m^{-2} sont obtenus sur les flux de conduction, découlant des différentes méthodes utilisées par les modèles (voir section 3) et de leur niveau de détail, notamment dans la discrétisation des parois.

4.2. Cas d'étude réel instrumenté : CAMCATT

Les résultats sur le cas d'étude réel sont présentés pour les modèles MATHIS, SOLENE-Microclimat et TRABOULE, au niveau du iButton indiqué sur la Figure 3 par une étoile rouge, et dans le cas où le coefficient convectif est fixé à $h_c = 15\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-1}$. Cette valeur du coefficient convectif a été choisie car elle est cohérente avec la vitesse moyenne du vent sur la période étudiée, d'environ 2 m s^{-1} . Il est à noter que les résultats obtenus au niveau des autres iButtons positionnés sur cette même façade sont similaires et que les conclusions tirées de l'analyse qui suit restent ainsi également valables pour les autres iButtons.

La température de surface simulée par les trois modèles est comparée sur la Figure 6 à celle mesurée par iButton sur la journée du 15/06/2021. Pour s'assurer que l'initialisation n'influence plus les résultats, deux jours de simulation ont été ajoutés en amont de la journée étudiée. MATHIS ne disposant pas de maillage surfacique, la température représentée pour ce modèle correspond à la température moyenne de la façade. Les trois modèles reproduisent correctement la dynamique journalière mesurée, notamment la position du maximum de température autour de 17h et la décroissance nocturne. Concernant les écarts, les erreurs quadratiques moyennes pour les modèles TRABOULE, MATHIS et SOLENE-Microclimat sont respectivement de 2.1°C , 1.2°C et 2.1°C et l'écart sur le maximum de température en journée à environ 17h varie entre 2.8°C pour MATHIS et TRABOULE et 3.5°C pour SOLENE-Microclimat. Cette sous-estimation de la température d'air est en partie due à l'approche simplifiée pour l'aérodynamique par l'utilisation d'un coefficient convectif fixé.

Ensuite, les flux solaire et infrarouge sont comparés à la même localisation (étoile rouge sur la Figure 3) pour les trois modèles sur la Figure 7. Sur ces courbes, des différences notables apparaissent entre les modèles SOLENE-Microclimat et TRABOULE d'une part, et MATHIS

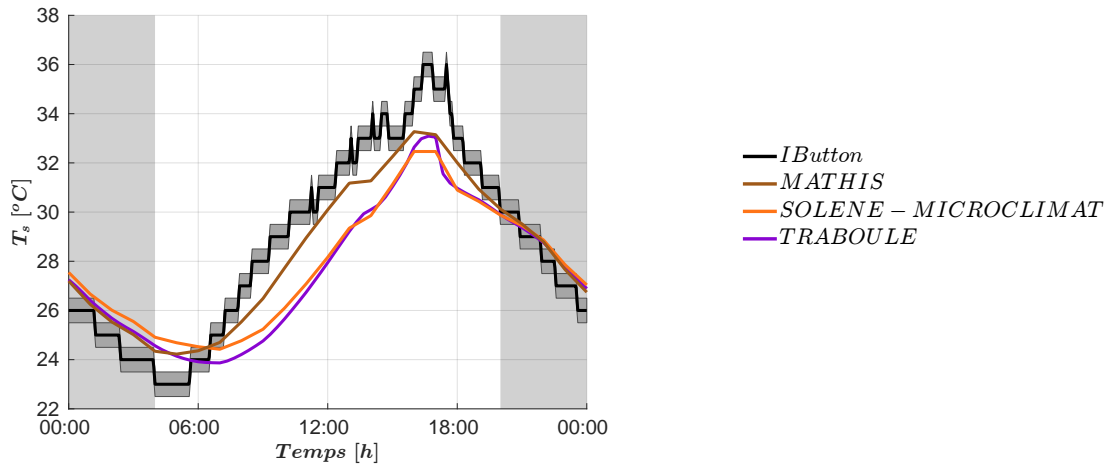
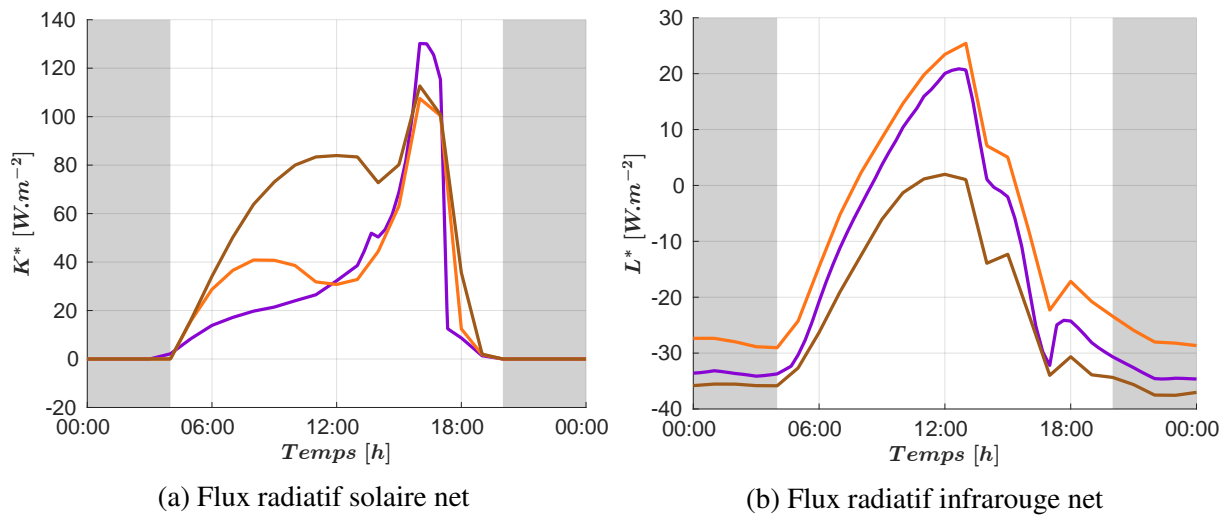


Figure 6 : Température moyenne au niveau du iButton sélectionné.



(a) Flux radiatif solaire net

(b) Flux radiatif infrarouge net

Figure 7 : Flux radiatifs au niveau du iButton sélectionné. La légende couleur pour les différents modèles est identique à celle présentée Figure 6.

d'autre part. Concernant le flux solaire (Figure 6a), MATHIS simule une valeur plus importante que SOLENE-Microclimat et TRABOULE entre 6 h et 15 h. Il s'agit de la période pendant laquelle le point considéré est ombragé, et seul le rayonnement diffus intervient donc. L'hypothèse de rue infinie effectuée dans le modèle radiatif de MATHIS peut expliquer cette surestimation du flux simulé, dû à une surestimation des multiréflexions sur la façade en vis-à-vis. De même, MATHIS simule en journée un flux infrarouge inférieur aux deux autres modèles (Figure 6b). Cela s'explique en partie par le fait que la température de surface simulée par MATHIS est plus élevée que celle de SOLENE-Microclimat et TRABOULE, ce qui engendre des émissions infrarouges plus importantes. L'impact de l'environnement ou le fait que MATHIS simule une moyenne sur la façade peuvent également expliquer en partie cet écart. Pour le calcul des flux radiatifs en ce point, les limites des hypothèses de MATHIS apparaissent donc, ce cas d'étude s'éloignant d'une rue canyon idéale.

5. Conclusion

Une méthodologie d'intercomparaison et de validation de modèles de microclimat urbain a été présentée, et appliquée sur quatre modèles. L'analyse des résultats a montré une bonne concordance sur le premier cas étudié, correspondant à une rue canyon idéale. En revanche, des écarts significatifs ont été obtenus sur le deuxième cas étudié, correspondant à un cas réel dans une zone résidentielle. En effet, les flux radiatifs simulés avec MATHIS s'éloignent de ceux calculés par les autres modèles, mettant en évidence l'impact des hypothèses de MATHIS, qui bénéficie néanmoins d'un coût de calcul très inférieur aux autres modèles étudiés.

Ces résultats mettent donc en évidence la capacité de la méthodologie développée à comparer des modèles de microclimat urbain très différents, et d'en faire ressortir les capacités et les limites. Celle-ci correspond à un premier pas vers la mise en place d'une démarche progressive, complète et structurée d'intercomparaison et de validation des modèles de microclimat urbain. Elle a pour vocation d'être enrichie et appliquée à d'autres modèles. Notamment, l'ajout d'un cas d'étude disposant de mesures plus complètes (différents flux, écoulement) permettrait une validation plus globale.

Références

- [1] R. Judkoff and J. Neymark., International Energy Agency building energy simulation test(BESTEST) and diagnostic method, *Technical report* (United States, 1995).
- [2] L. Roupioz, X. Briottet, K. Adeline, A. Al Bitar, D. Barbon-Dubosc, and al., Multi-sourcedatasets acquired over Toulouse (France) in 2021 for urban microclimate studies during theCAM-CATT/AI4GEO field campaign, *Data in Brief* (2023).
- [3] J. Soriano, L. Merlier, D. David, and L. Soulhac., Development of an urban microclimate model to assess the air temperature field during the summer period, *International Building Performance Simulation Association* (Bruges, 2021).
- [4] M. Musy, M.-H. Azam, S. Guernouti, B. Morille, and A. Rodler., The SOLENE-MicroclimatModel : Potentiality for Comfort and Energy Studies, *Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies*, pages 265–291 (2021).
- [5] N. Lalanne, J.-C. Krapez, C. Le Niliot, X. Briottet, J. Pierro, and L. Labarre., Developmentand validation of a numerical tool for simulating the surface temperature field and the infrared radiance rendering in an urban scene, *Quantitative InfraRed Thermography Journal* (2015).
- [6] F. Schmitt, F. André, M. Galtier, and E. Vergnault., A CFD solver based on the lattice Boltzmann method to solve three-dimensional thermally driven flows and coupled molecular gas radiation : comparison and validation against a benchmark solution, *7th Thermal and Fluids Engineering Conference(TFEC)* (Las Vegas, 2022).
- [7] F. Miguet and D. Groleau., A daylight simulation tool for urban and architectural spaces-application to transmitted direct and diffuse light through glazing. *Building and Environment* (2002).
- [8] J. Jacob, L. Merlier, F. Marlow, and P. Sagaut., Lattice Boltzmann Method-Based Simulations of Pollutant Dispersion and Urban Physics. *Atmosphere* (2021).

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet ANR DIAMS soutenu par l'Agence Nationale de Recherche ANR-21-CE22-0010.