

Inter-comparaison d'outils de simulation du microclimat urbain et confrontation à de la mesure.

Intercomparison of urban microclimate simulation tools and comparison with measurements.

Marie-Hélène AZAM^{1*}, Hugo MATRY², Chaimaa DELASSE³, Auline RODLER⁴, Matthieu LABAT², Marion BONHOMME², Pierre KASTENDEUCH⁵, Stéphane GINESTET², Marjorie MUSY⁴

¹Université de Strasbourg, INSA Strasbourg, CNRS, ICube Laboratory UMR 7357, Équipe GCE, Strasbourg, France

24, bd Victoire, 67000 Strasbourg

²LMDC, Université de Toulouse, UPS, INSA, Toulouse, France

³Ecole des Sciences Géomatiques et de l'Ingénierie Topographique, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Madinat Al Irfane, 6202 Rabat, Maroc

⁴CEREMA BPE, Nantes F-44262, France

⁵Université de Strasbourg, CNRS, Faculté de Géographie et d'Aménagement, ICube Laboratory UMR 7357, Equipe TRIO, Strasbourg, France

3 Rue de l'Argonne, 67000 Strasbourg

^{*}(auteur correspondant : marie-helene.azam@insa-strasbourg.fr)

Résumé - Plusieurs outils de simulation microclimatique ont été développés afin de quantifier l'impact de solutions constructives et d'aménagements sur le microclimat urbain et sur le confort extérieur tels que SOLENE-Microclimat, LASER/F et COMSOL Multiphysics. Ces outils diffèrent par leurs méthodes de résolution et leurs niveaux de détails dans la modélisation des phénomènes physiques. Ces différentes approches sont ici comparées sur un cas simple de rue canyon basé sur la plateforme expérimentale ClimaBat à La Rochelle. Les résultats des simulations sont confrontés aux mesures in situ avec l'objectif d'identifier les forces et limites de chaque modèle.

Abstract - Several microclimatic simulation tools have been developed to quantify the impact of urban design solutions on urban microclimate and outdoor comfort. Due to the complexity of the problem and current computational limits, each tool adopts a different approach. This study compares three tools—SOLENE-Microclimat, LASER/F, and COMSOL Multiphysics—on a simplified street canyon case under realistic climatic conditions. The experimental platform ClimaBat in La Rochelle, provides measurement data for validation. Simulated results are compared with in situ measurements of meteorological data, surface temperatures, and air temperature. The study discusses the strengths and limitations of each model.

1. Introduction

Plusieurs outils de simulation microclimatique ont été développés en France afin de quantifier l'impact de solutions constructives et d'aménagements, telles que la végétalisation ou la modification des revêtements, sur le microclimat urbain et le confort extérieur des piétons. Face à la complexité du problème à résoudre et aux capacités de calcul actuelles, chaque outil propose des approches différentes. Plusieurs états de l'art ont permis de classer et comparer ces outils, sans qu'ils aient été encore intercomparé sur un même cas d'étude.

L'approche la plus répandue est basée sur l'utilisation de modèles physiques permettant d'évaluer le comportement dynamique d'un système. Afin de résoudre le bilan des flux, les modèles physiques nécessitent des données d'entrées comme la géométrie, les caractéristiques des matériaux ou les conditions météo pour calculer les différents transferts de chaleur et de masse. Sur les éléments de surface d'une scène urbaine, plusieurs flux doivent être calculés : les flux sensibles et latents, les flux radiatifs courtes longueurs d'ondes (CLO), et grandes longueurs d'ondes (GLO), la conduction dans les parois. Le niveau de détail de la représentation de chacun de ces phénomènes physiques, les données d'entrées utilisées, les méthodes de résolution employées et l'architecture varient d'un outil à l'autre.

Ce papier propose de comparer les approches fournies par trois outils de simulation qui fonctionnent à l'échelle locale allant de la rue avec COMSOL Multiphysics à celle d'un quartier avec SOLENE-Microclimat et LASER/F. Les approches et résultats sont comparés sur un même cas d'étude, une géométrie simple de rue canyon (bâtiments élevés et rapprochés formant un corridor étroit) exposée à des conditions climatiques réalistes. Le cas d'étude en question est celui de la plateforme expérimentale ClimaBat située à La Rochelle. Cette plateforme est composée de plusieurs bâtiments à échelle réduite formant trois rues canyons de rapport d'aspect 1/1. Elle fournit un jeu de données de mesures permettant de confronter les modèles : données météorologiques du site, températures de surface des différentes parois et température de l'air.

Après une présentation des différents modèles, et du cas d'étude, les résultats des simulations sont comparés aux mesures in situ. Enfin, les avantages et limites de chacun des modèles sont analysés et discutés.

2. Outils de simulation microclimatique

2.1 SOLENE-Microclimat

SOLENE-Microclimat [1] est le résultat du couplage de deux outils, Code-Saturne un modèle aéraulique de dynamique des fluides CFD RANS (Computational Fluid Dynamics Reynolds-Averaged Navier–Stokes) et SOLENE (modèle thermo-radiatif de surface à surface), auxquels ont été ajoutés différents modules pour représenter des éléments bâtis conventionnels (conduction dans un sol pavé, modèles de thermiques du bâtiment) et des solutions d'adaptation d'amélioration du confort urbain : arbres, sol naturel, toits et murs végétalisés, arrosage des chaussées et 'cool materials'. Grâce à une représentation géométrique 3D flexible et maillée, toutes les formes urbaines peuvent être traitées à l'échelle d'un quartier. Les différents modèles numériques proposent des niveaux de détails différents de représentation des phénomènes physiques ou de résolution.

2.2 LASER/F

LASER/F (LAtent, SEnsible, Radiation / Fluxes) est un logiciel de simulation destiné aux scientifiques et aux urbanistes pour simuler le microclimat urbain à l'échelle d'un quartier [2]. Il est basé sur une représentation 3D des éléments urbains avec un important niveau de détails. Les capacités de modélisation le rendent capable de simuler tout type d'infrastructure : bâtiment, sol artificiel ou naturel, végétation, eau. Le bilan d'énergie de tous ces éléments est simulé grâce à des modèles numériques qui tiennent compte des échanges radiatifs dans toutes les longueurs d'onde (GLO et CLO) et des transferts de chaleur par conduction dans le sol et par convection avec l'atmosphère.

2.3 COMSOL Multiphysics

Le modèle de microclimat urbain sur COMSOL Multiphysics résout un couplage thermo-aéro-radiatif à partir d'un code aux éléments finis. Le modèle représente une rue canyon 2D composée de deux parois représentant les façades de chaque bâtiment ainsi qu'une chaussée. Le bilan radiatif en CLO et en GLO est calculé sur chaque maille en utilisant la méthode de radiosité. Les rayonnements provenant du ciel et du soleil sont supposés isotropes et les réflexions sur les surfaces de la rue en CLO et GLO sont supposées être diffuses (lambertiennes). L'équation de la chaleur est résolue en 2D sur plusieurs couches dans les parois de la rue. Enfin, les champs de vitesse et de température sont calculés à la fois dans la rue canyon et dans la couche d'air au-dessus de la rue à partir d'un modèle CFD RANS. De plus, les phénomènes de flottabilité de l'air sont pris en compte grâce à l'hypothèse de Boussinesq.

2.4 Comparaison des outils

Les tableaux suivants donnent une vision synthétique des principaux points communs et différences entre les outils comparés.

	<i>SOLENE-Microclimat</i>	<i>LASER/F</i>	<i>COMSOL</i>
Echelle	Quartier 3D	Rue 2D	
Rayonnement GLO	Rayonnement du ciel, émission des surfaces, avec une seule réflexion avec les autres mailles.	Rayonnement du ciel diffus, émission des surfaces, inter-réflexions entre éléments de surface.	
Rayonnement CLO	Rayonnement solaire direct, diffus. Inter-réflexions avec les autres mailles.		
Modèle de ciel	Anisotrope Modèle "All Weather" de Perez		Isotrope
Conduction	1D modèles RC ou différences finies	1D différences finies	2D Éléments finis
Température d'air dans le bâtiment	Soit imposée Soit calculée pour un bâtiment	Calculée pour l'ensemble des bâtiments	Imposée
Température du sol	Imposée à une profondeur de 2 m	Imposée à une profondeur définie par l'utilisateur	
Température, vitesse de l'air et transferts de chaleur aux parois	CFD méthode RANS, modèle de turbulence k- ε standard en régime permanent.	Estimée à mi-hauteur des rues et à 2m par paramétrisation	CFD méthode RANS modèle de turbulence k- ε standard en régime instationnaire, flottabilité.

Tableau 1 : *Comparaison des modèles*

Les modèles présentent des similitudes en ce qui concerne les transferts par conduction et par rayonnement. Les principales différences concernent la taille du domaine simulé, la prise en compte des transferts convectifs entre les parois et l'air dans la rue, la possibilité d'effectuer un bilan thermique sur le volume d'air à l'intérieur des bâtiments.

En ce sens, LASER/F apparaît comme un modèle qui permet le calcul rapide d'un grand nombre d'éléments urbains, au prix d'une représentation simplifiée de la dynamique atmosphérique. La représentation la plus fine des transferts convectifs est obtenue avec COMSOL, au prix d'une géométrie simplifiée (2D) et réduite. Sur le plan aéraulique, SOLENE-Microclimat ressort comme une approche intermédiaire entre les deux autres outils. Enfin, le

modèle COMSOL ne permet pas de faire un bilan sur l'air intérieur du bâtiment dans sa version actuelle, à la différence de LASER/F et SOLENE-Microclimat.

3. Présentation du cas d'étude

Afin de comparer les trois modèles sur un même cas d'étude, nous avons fait le choix d'une géométrie simple et compatible avec tous les modèles, soit une rue canyon dont les conditions sont représentatives d'un environnement urbain. Plutôt qu'un cas d'étude théorique, la disponibilité de résultats expérimentaux était également un critère pour obtenir une solution de référence. Notre choix s'est porté sur la plate-forme expérimentale mise en place à l'Université de La Rochelle appelée ClimaBat [3]. Après une brève description de la campagne de mesures, nous détaillerons les paramétrages employés dans chaque modèle pour représenter ce cas d'étude.

3.1 Description de la campagne de mesure utilisée

La plateforme ClimaBat [3] est composée d'une terrasse (10×20 m) en dalles de béton, sur laquelle des réservoirs vides en béton ont été disposés en plusieurs rangées. Ils représentent des bâtiments à échelle réduite composant plusieurs rangées de bâtiments et de rues. La géométrie est l'équivalent d'une version réduite au 1/10 d'une maquette de bâtiments de type bureau en structure légère (i. e. maçonnerie en parpaing) composée de 3 étages entourés d'une aire piétonne. Chaque rangée de bâtiments mesure 5,06 m de long, 1,24 m de haut (H) et 1,12 m de large. La largeur (W) de la rue a été fixée à 1,2 m avec un rapport d'aspect $W/H = 1,10$. Les rues sont orientées Nord-Sud dans le but de les protéger des vents dominants venant de l'Ouest principalement.

Les cuves sont composées de parois en béton de 5 cm d'épaisseur. Le sol est composé de dalles en béton de 4 cm d'épaisseur posées sur le sol du site. La composition du sol n'est pas connue mais supposée constituée d'un lit de sable et graviers de 80 cm et en profondeur le sol naturel. Les caractéristiques thermiques des cuves et des dalles de béton ont été mesurées durant les travaux de Doya et al. [4].

L'ensemble de la plate-forme a été instrumenté pour évaluer les performances de solutions d'atténuation de l'îlot de chaleur urbain appliquées au bâtiment (parois végétales, peintures réfléchissantes). Seules les mesures exploitées par la suite sont présentées sur la Figure 1. Notre modélisation se concentre sur la rangée centrale de bâtiments et les deux rues latérales. Cela nous permet de nous affranchir des parois végétales présentes sur les autres bâtiments.

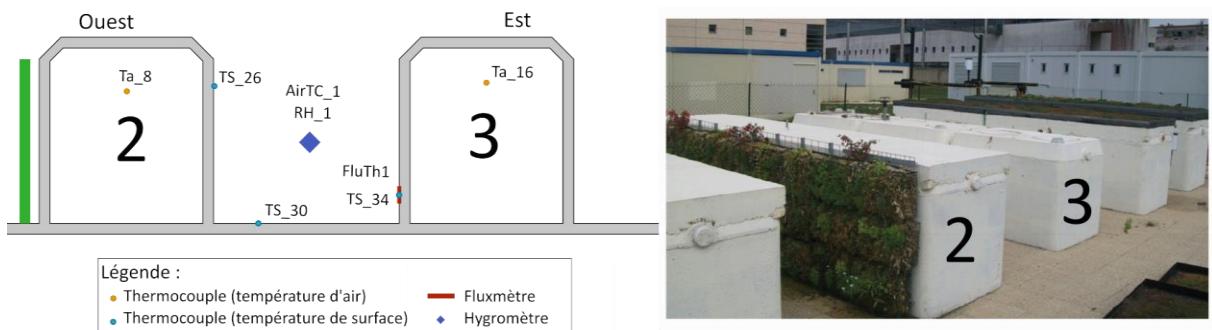


Figure 1 : Représentation schématique à gauche (le trait vert représente la façade végétale) et photographie extraite de Djedjig et al. [2] à droite de la plateforme expérimentale

Les flux radiatifs incidents CLO et GLO sont mesurés sur le toit d'un bâtiment de l'université (à une hauteur de 16m). Les conditions locales de vent (vitesse et direction) sont mesurées par un anémomètre sonique 2D au-dessus des toits du bâtiment de la plateforme à une hauteur de 28 cm. Les cuves et les dalles de sol sont équipées de thermocouples de type K permettant de

mesurer les températures de surface en différents points. Dans les rues, des thermo-hygromètres permettent de mesurer les températures d'air. Enfin, à l'intérieur de la cuve centrale de chaque rangée un thermocouple permet de mesurer la température d'air intérieur.

3.2 Paramétrage des modèles

3.1.1. Caractéristiques thermiques

Les propriétés thermiques des matériaux proposées par Djedjig et al. [3] ont été utilisées dans cet article. Lorsqu'elles n'étaient pas disponibles, et notamment pour le sol en profondeur, des propriétés usuelles ont été choisies. Les trois modèles utilisent les mêmes propriétés.

3.1.2. Conditions aux limites

Les trois modèles utilisent les mêmes conditions aux limites en rayonnement CLO : il s'agit de mesures faites sur le toit d'un bâtiment de l'université (à une hauteur de 16 m) et utilisées comme données d'entrée du modèle radiatif. Pour cela les composantes directe et diffuse sont calculées à partir du modèle de Miguel et al. [5] divisant l'irradiation globale mesurée par le pyranomètre. Les flux GLO sont évalués dans les trois modèles grâce à la mesure d'un pyrégomètre placé sur le toit de l'université.

La température d'air, la vitesse et la direction du vent sont des données locales. Dans le cas de SOLENE-Microclimat, les vitesses de vent locales sont calculées à l'aide du code de calcul CFD Code-Saturne. Seule la diffusion ainsi que le transport de la chaleur et de l'humidité de l'air sont considérés et les effets de la convection naturelle sont négligés. Comme les vitesses sont faibles, le coefficient de convection est calculé à partir d'une loi linéaire [6].

Dans le cas de COMSOL, l'écoulement de l'air dans la rue canyon est calculé à chaque pas de temps par CFD, méthode RANS en 2D. Du fait de la géométrie 2D, la direction du vent dans le modèle COMSOL est constante et transversale à la rue (vent provenant de l'Ouest) tout au long de la simulation. Le modèle de turbulence k- ϵ standard est utilisé avec une résolution à la paroi en Bas Reynolds. Un couplage fort entre le modèle CFD et le modèle thermique permet de calculer les transferts de chaleur aux parois et de prendre en compte les phénomènes de flottabilité.

Dans le cas de LASER/F, les vitesses de vent à mi-hauteur entre le niveau de la rue et les toits sont paramétrées à partir de la vitesse d'entrée du modèle qui est imposée au-dessus des toits (voir [2] pour plus de détails sur les équations). La direction du vent ne joue aucun rôle dans ce modèle. En ce qui concerne les transferts par convection, les coefficients de transfert sont calculés en fonction de la stabilité de l'air et de la rugosité des surfaces. Avec la version standard, la température de l'air ainsi que l'humidité à l'intérieur des bâtiments sont calculées pour chaque étage dans LASER/F; cependant pour ce test, ces algorithmes ont été neutralisés et remplacés par une température constante tout au long de la simulation.

Pour les trois modèles, la température d'air à l'intérieur des bâtiments est fixée constante et égale à la moyenne des valeurs mesurées à l'intérieur du bâtiment 3 pendant la période simulée (Ta_16 dans la Figure 1). En profondeur dans le sol, la température est fixée à 17,7°C à une distance de 2 m.

3.1.3. Périodes de simulation

Les données de la première campagne expérimentale d'août 2012 sont ici exploitées du 01/08 00 :00 au 24/08 23 :45 avec un pas de temps de 15 minutes. Dans le cas de COMSOL-Multiphysics, comme la configuration du modèle est dédiée à des directions de vents perpendiculaire à la rue, la période du 19/08 00 :00 au 23/08 23 :45 a été identifiée comme

favorable car les vitesses de vents sont alors principalement Ouest sur ces jours. Les résultats des trois modèles seront donc comparés sur les journées du 20/08 au 23/08. L'outil LASER/F est initialisé sur les 19 jours précédents et les modèles COMSOL et SOLENE-Microclimat sont initialisés sur la journée du 19/08 (pour limiter les temps de calculs).

3.1.4. Maquettes et maillage

La plateforme est représentée géométriquement par une maquette numérique différente par chaque outil. Dans le cas de SOLENE-Microclimat, la maquette se compose des trois rangées centrales de bâtiments. Le maillage est composé d'un maillage tétraédrique volumique pour la partie CFD, triangulaire pour les surfaces et des points nodaux pour la conduction dans les parois. Pour LASER/F, la plate-forme est introduite sous forme d'un maillage surfacique 3D de l'ensemble du site. Dans le cas de COMSOL les parois composants la rue (murs et sol) et la veine numérique sont représentées en 2D et maillés en quadrangles structurés.

4. Résultats des différentes simulations

Du fait des hypothèses sur la température intérieure des bâtiments ainsi que sur les propriétés physiques du sol, les conditions réelles ne sont pas totalement respectées. L'analyse porte donc sur la comparaison des résultats des modèles entre eux plutôt qu'avec la mesure.

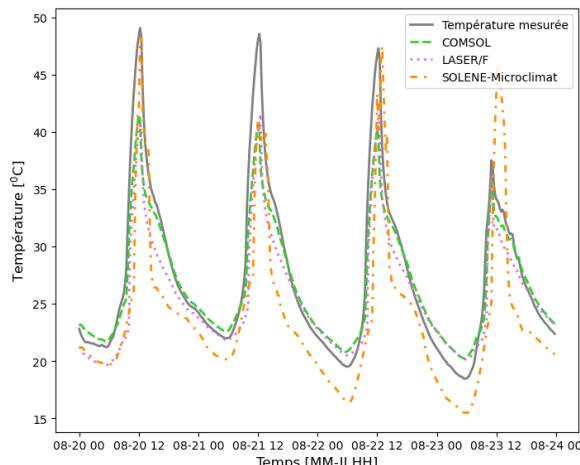


Figure 2 : Température de surface du sol capteur TS_30

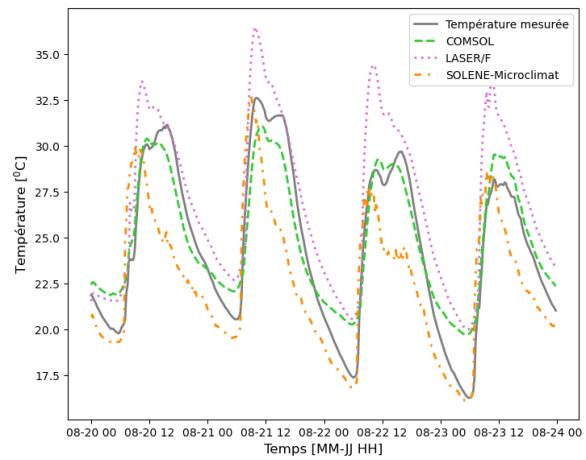


Figure 3 : Température de surface du haut du mur exposé Est (capteur TS_26)

La Figure 2 présente l'évolution de la température de surface du sol à l'intérieur de la rue pour les trois modèles. On observe une concordance des résultats pour les outils LASER/F et COMSOL. En particulier, les écarts entre les deux modèles sont très faibles la nuit. Les écarts sont plus importants pour l'outil SOLENE-Microclimat. Cet écart peut s'expliquer par l'usage du modèle de sol originel de l'outil basé sur un modèle RC à 4 nœuds. L'inertie du sol est donc modélisée moins finement qu'avec les autres outils.

Les figures 3 et 4 présentent l'évolution des températures de surface sur les murs exposés Ouest et Est de la rue. La Figure 5 présente la comparaison des flux conduits dans le mur. Les écarts entre les différents modèles sont cette fois plus marqués. Ils résultent d'une combinaison de plusieurs transferts de chaleur et l'origine de ces écarts n'est pas évidente à interpréter. Sur la paroi Ouest toutefois, on remarque que l'amplitude journalière du flux conductif obtenue avec LASER/F est la plus importante, et celle avec SOLENE est la plus faible. La conséquence logique est que les températures maximales sont aussi observées avec LASER/F. L'évolution

de la température de surface a une forme comparable entre les trois modèles, cependant on constate un décalage persistant entre les résultats obtenus avec SOLENE-Microclimat et les deux autres modèles, qui vaut environ 3 à 4°C pendant la nuit. Des conclusions similaires peuvent être effectuées sur la face Est.

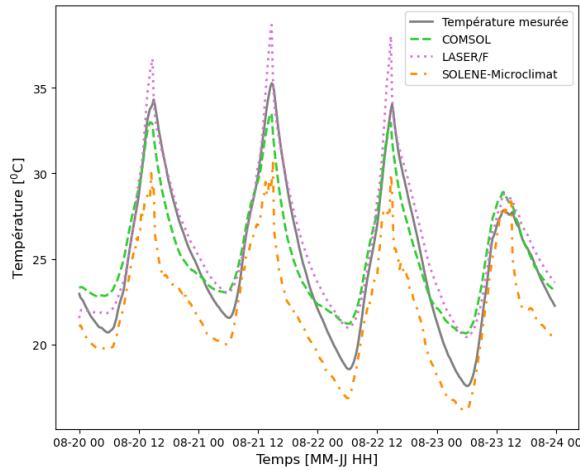


Figure 4 : Température de surface du haut du mur exposé Ouest (capeur TS_34)

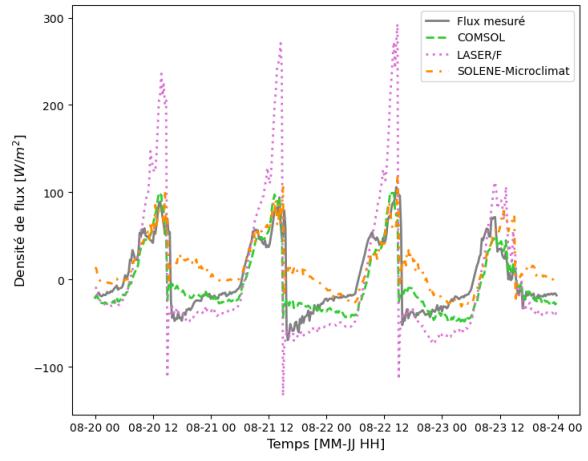


Figure 5 : Flux conduit dans le mur exposé Ouest (capteur FluTh1)

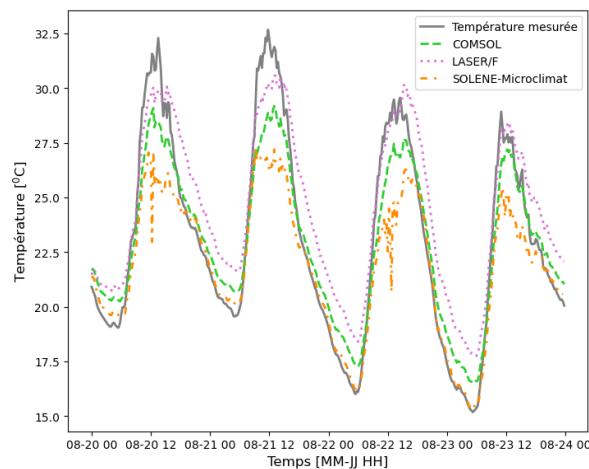


Figure 6 : Température d'air au centre de la rue

Enfin, les trois modèles permettent de calculer une température d'air dans la rue, présentée dans la Figure 6. Les dynamiques sont cette fois-ci tout à fait similaires, mais contrairement aux observations faites sur les températures de surface, les écarts entre COMSOL et LASER\|F se maintiennent pendant la nuit (en moyenne de $1,5^{\circ}\text{C}$).

Compte tenu des choix de conditions aux limites, la plus grande différence entre les trois approches réside dans leur modélisation des transferts convectifs. L'estimation la plus fine est proposée dans COMSOL, grâce à une CFD prenant en compte les phénomènes de flottabilité. Dans le cas de SOLENE-Microclimat, la CFD permet de calculer les caractéristiques locales de l'écoulement (température d'air et vitesse). Cependant l'estimation du flux convectif est réalisée à l'aide d'une corrélation empirique. Il s'agit de la principale limite de cette méthode. Cette différence de modélisation peut expliquer une partie des écarts, notamment la nuit. L'approche retenue dans LASER\F est la plus simple, ce qui conduit à des valeurs systématiquement plus importantes qu'avec les deux autres modèles.

Il faut cependant souligner que les approches utilisant la CFD nécessitent un coût de calcul beaucoup plus élevé : environ 1 journée de calcul pour 5 jours simulés. A contrario le temps de calcul avec LASER\F n'est que de 30 minutes.

Le cas d'étude choisi a permis de confronter les 3 modèles dans une configuration commune. Elle ne permet cependant pas de tirer pleinement parti des capacités de SOLENE-Microclimat et LASER\F prévus pour travailler à des échelles supérieures.

5. Conclusion

Les trois outils présentés se distinguent principalement par la modélisation des transferts aérauliques à l'extérieur avec trois niveaux de détails différents allant d'un modèle paramétrique à une CFD prenant en compte les phénomènes de flottabilité. Utiliser le modèle le plus détaillé permet d'obtenir une estimation fiable des transferts de chaleur par convection dans la rue et par conséquent des températures d'air et de surface. Les autres approches se confrontent à la difficulté de choisir une relation empirique dans la littérature. Cependant, ces choix de modélisation ont un impact sur la taille du domaine d'étude allant d'un quartier à une rue et sur les temps de calculs. En fonction des cas d'étude et configurations étudiées, l'usage de certains de ces outils est donc à privilégier. Les comparer sur un même cas d'étude permet d'en faire ressortir les capacités, les limites dans une démarche d'amélioration.

Ces premiers résultats démontrent également les difficultés de comparer des modèles différents et le besoin d'une démarche commune. Pour développer cette analyse, la poursuite des travaux pourra s'appuyer sur la démarche développée dans le cadre du projet DIAMS et les travaux démarrant sur l'Annexe 97 'Sustainable Cooling in Cities'.

Références

- [1] Musy, M., Azam, M.-H., Guernouti, S., Morille, B., and Rodler., A. (2021). The SOLENE-MicroclimatModel : Potentiality for Comfort and Energy Studies, Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies, pages 265–29.
- [2] Kastendeuch, P., Najjar, G., Colin, J. (2017). Thermo-radiative simulation of an urban district with LASER/F. *Urban Climate*, 21, 43-65. <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2017.05.003>
- [3] Djedjig, R., Bozonnet, E., & Belarbi, R. (2015). Experimental study of the urban microclimate mitigation potential of green roofs and green walls in street canyons. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 10(1), 34–44. <https://doi.org/10.1093/IJLCT/CTT019>
- [4] Doya, M., Bozonnet, E., & Allard, F. (2012). Experimental measurement of cool facades' performance in a dense urban environment. *Energy and Buildings*, 55, 42–50. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2011.11.001>
- [5] De Miguel, A. B. J. A. R. K. H., Bilbao, J., Aguiar, R., Kambezidis, H., & Negro, E. (2001). Diffuse solar irradiation model evaluation in the north Mediterranean belt area. *Solar energy*, 70(2), 143-153. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00135-3](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00135-3)
- [6] Palyvos, J. A. (2008). A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling. *Applied thermal engineering*, 28(8-9), 801-808. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.12.005>

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Emmanuel Bozonnet (LaSIE, La Rochelle Université) pour le partage des données mesurées sur la plateforme ClimaBat.