

MODÉLISATION DE L'AMBIANCE CLIMATIQUE D'UNE ZONE URBAINE À DIFFÉRENTES ÉCHELLES : CAS DE LA VILLE DE STRASBOURG

Nathalia PHILIPPS^{1,3}, Marine GORET², Pierre KASTENDEUCH¹, Georges NAJJAR¹

¹ Laboratoire Icube (UMR 7357), Université de Strasbourg, France (nathalia.philipps@etu.unistra.fr)

² Direction des Services Météorologiques, Météo France, France

³ Eurométropole de Strasbourg, France

Résumé : Selon les échelles, différents modèles météorologiques sont régulièrement utilisés pour simuler le climat urbain, sans forcément établir de connexion entre eux. C'est notamment le cas entre les modèles de méso-échelle et de micro-échelle. Une démarche visant à mettre en place une chaîne de simulation reliant la méso-échelle à la micro-échelle est ici proposée. Deux modèles microclimatiques (ENVI-Met et LASER/F) et un système méso-climatique (Mésos-NH et SURFEX) sont utilisés en ce sens. Chacun des modèles a bénéficié préalablement d'une phase de validation basée sur les données d'une campagne de mesures. Les premiers résultats confirment la faisabilité et l'intérêt de la démarche tout en soulignant l'apport des différents modèles.

Mots-Clés : chaîne de simulation climatique, changement d'échelle, géométrie urbaine, résolution spatiale.

Abstract : several meteorological models at multiple spatial scales are commonly used in urban climate studies. However, it doesn't necessarily involve a combination of such models, in particular meso and microscale models. A methodology aiming to acquire a climatic simulation sequence coupling meso and microscale modeling is proposed here. Two microclimatic models (ENVI-Met and LASER/F) and a mesoclimatic system (Mésos-NH with SURFEX) are used. Each of these models has been previously validated using meteorological measurements. The first results confirm the interest and workability of the developed procedure and highlight the specific contribution of the different models.

Keywords : climatic simulation sequence, scale change, urban geometry, spatial resolution.

Introduction

L'augmentation prévue des vagues de chaleur en termes de fréquence, de durée et d'intensité dans les décennies à venir sera associée à de lourdes conséquences environnementales et sanitaires, en particulier en milieu urbain du fait du couplage entre le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) nocturne et l'occurrence d'un important stress thermique diurne (Fenner *et al.*, 2019). Dans ce contexte, les leviers d'action des villes dans la prise en compte de ces problématiques au sein des projets urbains relèvent principalement de la forme urbaine, la végétalisation et l'aménagement. La modélisation climatique présente ainsi un atout considérable pour les urbanistes et aménageurs puisqu'elle permet de quantifier l'impact d'aménagements urbains sur l'ICU et le confort thermique. L'utilisation de nombreux modèles à diverses échelles a permis de démontrer la pertinence des différentes méthodologies employées (Lemonsu *et al.*, 2012 ; Wang *et al.*, 2013 ; Hénon *et al.*, 2012 ; Kastendeuch *et al.*, 2017). Les modèles méso-climatiques sont ainsi très plébiscités, notamment du fait qu'ils parviennent à simuler la ville dans son entièreté, ainsi que les zones rurales à proximité. Or un tel domaine de simulation impliquant nécessairement une résolution spatiale limitée, la ville ne peut y être simulée dans toute sa complexité sous-jacente. Les modèles microclimatiques parviennent quant à eux à un niveau de détails élevé, mais au prix d'une réduction considérable de la taille de la zone modélisée. Une combinaison des atouts respectifs de chacune de ces échelles à travers une chaîne de simulation permettrait de modéliser l'ensemble d'une ville tout en ayant la possibilité d'obtenir des informations détaillées sur les processus opérant à l'échelle d'un quartier ou d'une rue donnée. Cette étude vient compléter les travaux de Kastendeuch *et al.* (2015), son objectif étant de démontrer non seulement la faisabilité, mais aussi l'intérêt d'une telle chaîne de simulation. La présentation des données et outils numériques utilisés pour la mise en place de la procédure est suivie de celle d'une

phase de validation des trois modèles utilisés, à savoir le couple Méso NH - SURFEX (Masson, 2000), ENVI-Met (Bruse et Fler, 1998) et LASER/F (Kastendeuch et Najjar, 2009). Quelques-uns de leurs résultats sont ensuite comparés afin de souligner à la fois la cohérence inter-échelles et surtout l'apport d'informations permis par une chaîne de simulation solide et cohérente.

1. Zone d'étude et données

Composée de 33 communes regroupant plus de 500 000 habitants sur une surface de 339,6 km², l'Eurométropole de Strasbourg (EMS) présente un urbanisme concentrique typique des villes européennes de taille moyenne, avec un centre-ville dense et compact entouré de zones moins densément bâties. Située à proximité de l'hypercentre strasbourgeois, la zone Malraux affiche une importante diversité morphologique, son aménagement très minéral coexistant avec une importante surface en eau et quelques espaces davantage végétalisés (Figure 1b). Très fréquentée de par ses nombreuses activités commerciales et culturelles, son choix en tant que site d'études a été décidé conjointement avec les services d'urbanisme de l'EMS qui veulent adapter leurs projets d'aménagement concernant cette zone aux enjeux d'amélioration du confort thermique et de mitigation de l'ICU.

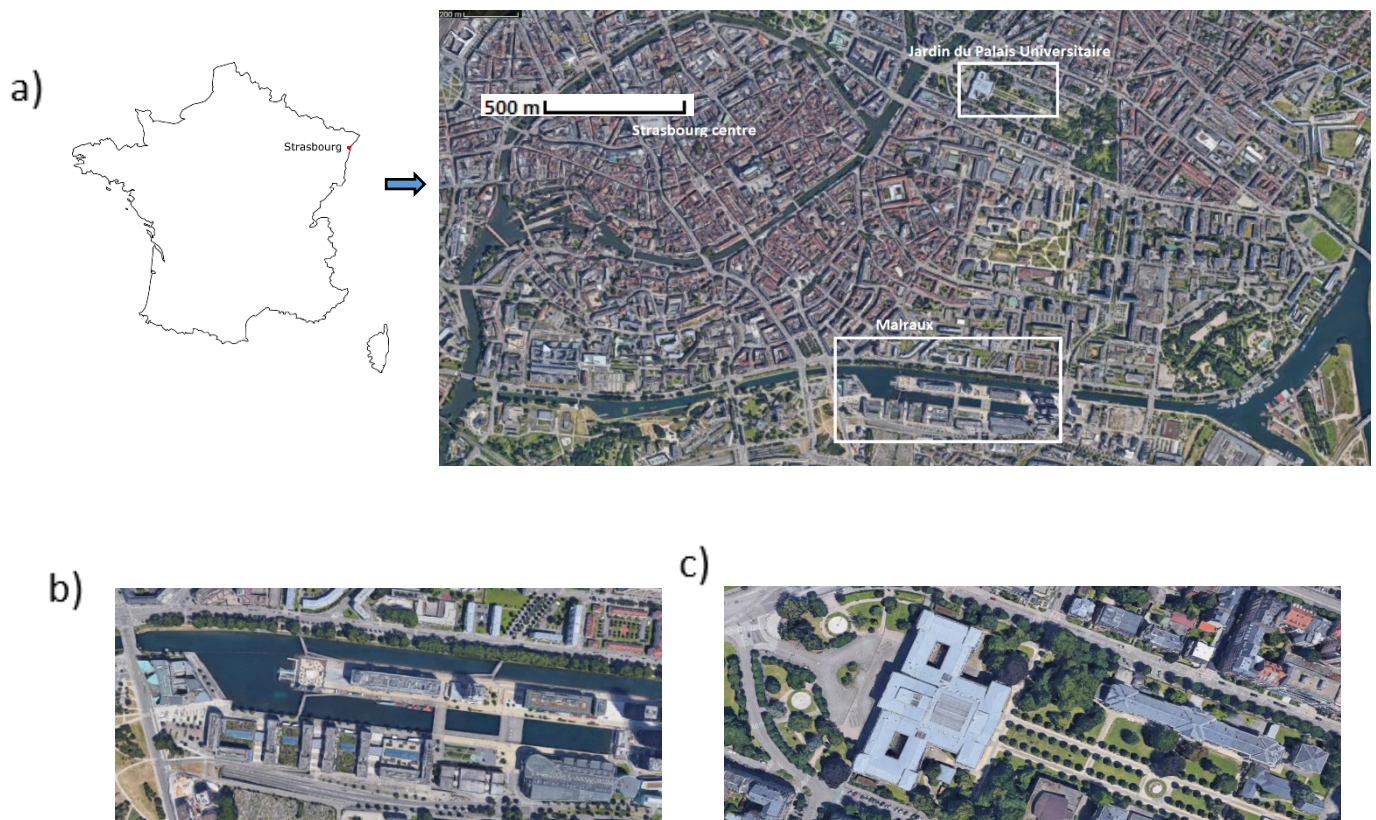


figure 1. (a) Carte de la ville de Strasbourg et localisation des sites d'études : b) la zone Malraux et c) le Jardin du Palais universitaire.

Les données d'occupation du sol nécessaires aux modèles microclimatiques sont issues de la chaîne Geoclimate, produites à partir de la BD Topo® V2, ainsi que de la base de données en open data des services géomatiques de l'EMS (www.data.strasbourg.eu), qui a également fourni l'ensemble des données de géométrie 3D. Le forçage atmosphérique fourni à Méso NH est obtenu via le modèle de prévision numérique du temps IFS, du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT).

Les données d'observation servant à la validation des différents modèles proviennent d'un réseau de stations météorologiques composé d'une vingtaine de sites urbains répartis sur l'ensemble du territoire, ainsi que d'une station rurale de référence située à proximité de l'aéroport d'Entzheim (Philipps *et al.*, 2020).

2. Présentation des modèles numériques

Trois modèles différents représentant deux échelles de modélisation distinctes sont utilisés au sein de notre étude. Les simulations à méso-échelle sont ainsi réalisées avec le système de modélisation constitué du couplage entre Méso-NH et SURFEX, pour simuler les échanges entre la surface et l'atmosphère de toute la ville, y compris la zone Malraux. ENVI-Met et LASER/F sont quant à eux des modèles numériques de micro-échelle qui simulent uniquement la zone Malraux, mais qui fonctionnent sur des logiques de calcul différentes. Le premier est non hydrostatique et intègre de ce fait les équations de la mécanique des fluides afin de simuler les écoulements de l'air autour du bâti. Le second est un modèle thermo-radiatif qui recourt à des algorithmes simplifiés afin d'obtenir une approximation des variables climatiques dans les rues, ce qui permet une forte diminution des temps de calcul. Toutes les surfaces du domaine simulé peuvent être fragmentées en triangles (appelés également meshes) dont la superficie peut être choisie. Le bilan d'énergie est calculé en détails pour chacun d'entre eux. (Kastendeuch *et al.*, 2015).



figure 2. La zone d'étude strasbourgeoise Malraux modélisée par LASER/F (a) et ENVI-Met (b). Les bâtiments sont en rouge (pour LASER/F) et beige (pour ENVI-Met), les routes en gris foncé (pour LASER/F) et noir (pour ENVI-Met), la végétation en vert et l'eau en bleu.

Le système Méso-NH et SURFEX fonctionne très bien jusqu'à l'échelle hectométrique, mais atteint ses limites lorsqu'on cherche à simuler des résolutions plus fines, la ville y étant représentée de manière trop simplifiée pour permettre d'accéder aux détails de la rue ou du quartier. La chaîne de simulation proposée repose sur une connexion entre méso-échelle et micro-échelle via l'utilisation des résultats de Méso-NH comme conditions aux limites de LASER/F et ENVI-Met. D'une résolution de l'ordre de 10 km, le premier modèle Méso-NH (le modèle-père) fonctionnant à l'échelle synoptique est forcé toutes les six heures par les champs météorologiques d'IFS. Le deuxième modèle Méso NH prend alors le relais à l'échelle mésoclimatique, aboutissant à une résolution atteignant 1 km toutes les cinq minutes. SURFEX, LASER/F et ENVI-Met sont ainsi tous trois directement forcés par les sorties de Méso-NH.

3. Phase de validation des modèles

Avant d'être employés sur la zone Malraux, chacun des modèles microclimatiques est passé par une phase de validation. Celle-ci a été réalisée au sein de la zone du Jardin du Palais Universitaire, site dont la configuration se rapproche de celle d'un parc urbain et pour lequel des données issues d'une campagne de mesures réalisée entre 2013 et 2017 sont disponibles (Najjar *et al.*, 2015). L'originalité de cette phase de validation réside dans le fait qu'elle ne repose pas uniquement sur les variables traditionnelles d'évaluation de la performance des modèles numériques que sont la température de l'air et l'humidité relative. Elle s'étend en effet aux données de flux, notamment aux flux de chaleur sensible et latente, ce qui permet d'évaluer pleinement la fiabilité des modèles à travers certaines de leurs variables de sortie et non via une variable de base présente dans les fichiers de forçage comme la température de l'air. Les résultats de la phase de validation sont présentés pour les flux de chaleur sensible et latente lors de la journée du 7 juillet 2016 (Figure 2), choisie car étant une journée estivale de beau temps (vent faible couplé à un fort ensoleillement).

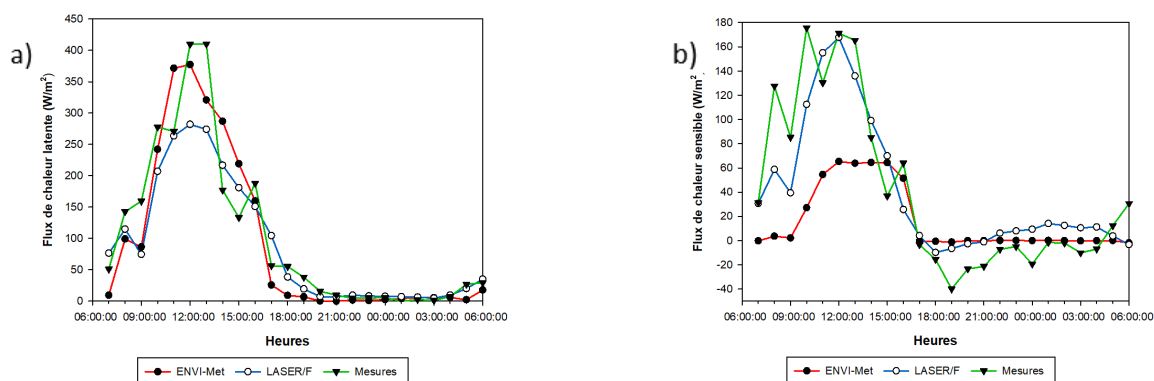


figure 3. Comparaison entre les sorties de LASER/F et ENVI-Met avec les mesures de terrain effectuées au Jardin du Palais U du 7 juillet 2016 à 7h au 8 juillet 2016 à 6h (TU) pour a) le flux de chaleur latente et b) le flux de chaleur sensible.

Les résultats soulignent de nettes différences entre les deux modèles microclimatiques. Les courbes du flux de chaleur latente (Figure 3a), ainsi que les indicateurs statistiques (Tableau 1), mettent en évidence une bonne corrélation avec les mesures, aussi bien pour LASER/F que pour ENVI-Met. En revanche, ce dernier a davantage de difficultés à simuler le flux de chaleur sensible (Figure 3b). La courbe ENVI-Met diffère aussi bien de celle des mesures que de celle de LASER/F, et les indicateurs statistiques ne font que confirmer ce manque de précision notable. Au vu de l'importance des variables du bilan d'énergie dans la mise en place de l'ICU, la difficulté d'un modèle à réussir à les modéliser incite à la prudence quant à l'interprétation de ses sorties. LASER/F quant à lui présente des résultats nettement plus convaincants, tant sur le comportement des variables de flux (Figure 3) que sur leurs valeurs (Tableau 1).

Tableau 1. Indicateurs statistiques évaluant la validation du flux de chaleur sensible (FS) et du flux de chaleur latente (FLE). Les variables utilisées correspondent au coefficient de corrélation (R^2), à l'erreur quadratique moyenne (RMSE), à l'erreur absolue moyenne (MAE), à l'erreur de biais moyenne (MBE) et au degré de liberté (dr).

	R^2		RMSE		MAE		MBE		dr	
	FLE	FS	FLE	FS	FLE	FS	FLE	FS	FLE	FS
ENVI-Met	0,87	0,49	47,82	57,21	34,73	38,73	-9,05	-23,7	0,84	0,57
LASER/F	0,89	0,82	48,71	29,42	30,74	23,99	-14,71	-0,4	0,84	0,76

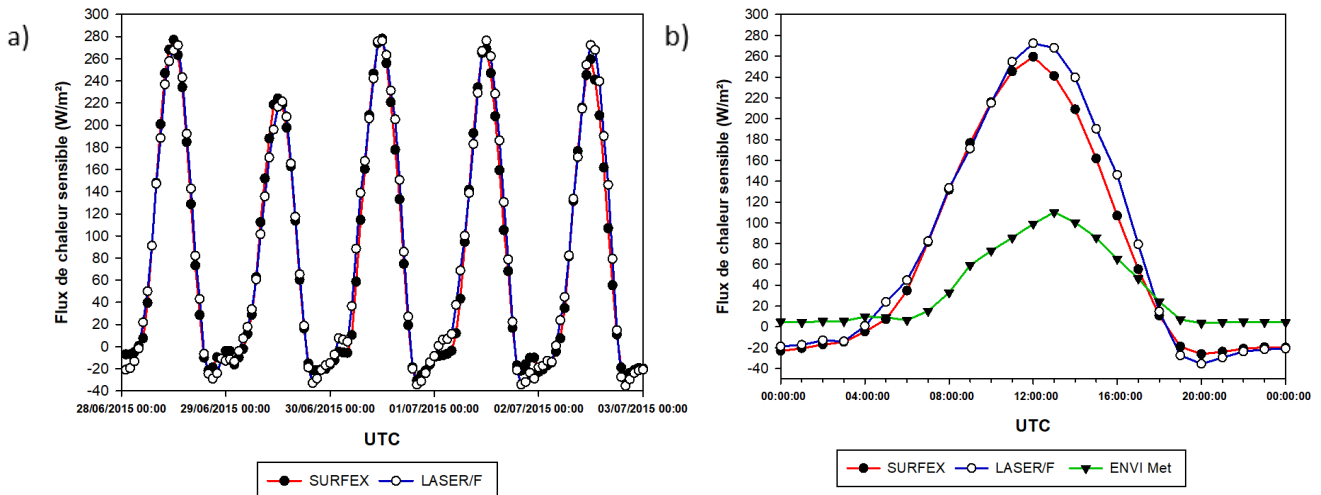


figure 5. (a) Flux de chaleur sensible modélisé par SURFEX et LASER/F sur la période du 28 juin 2015 à 00h à 3 juillet 2015 à 00h (TU) pour la zone Malraux. (b) Flux de chaleur sensible modélisé par SURFEX, LASER/F et ENVI-Met du 2 juillet 2015 à 00h à 3 juillet 2015 à 00h (TU) pour la zone Malraux.

La zone Malraux présente une forte hétérogénéité en termes de géométrie urbaine, ce qui la rend idéale pour mettre en évidence l'intérêt d'une chaîne de simulation puisqu'une telle diversité du tissu urbain ne peut être reproduite à méso-échelle. L'ajout d'un modèle fonctionnant à micro-échelle apporte ainsi un degré de précision supplémentaire, nécessaire lors de l'analyse des variations d'un paramètre à une échelle plus fine que celle du quartier. Afin d'illustrer la diversité comportementale d'une variable à l'échelle microclimatique, plusieurs triangles individuels LASER/F de type « route » et issus de divers sites de Malraux (bord de la Presqu'île, intérieur d'un canyon situé entre deux bâtiments du centre commercial Rivétoile, proximité du bâtiment de l'UGC) voient leur flux de chaleur sensible respectif comparé avec le flux de chaleur sensible moyen de l'ensemble de la route (Figure 6). La courbe bleue, pourtant supposée être représentative de la route sur la totalité de la zone Malraux, se distingue nettement des trois autres, celles-ci exposant des valeurs diurnes beaucoup plus élevées. Les courbes issues des sites particuliers de Malraux (en orange, vert et mauve) présentent des disparités notables au niveau de leur motif, notamment en période matinale, même si une homogénéisation des maxima survient à partir de la troisième journée simulée. Ces résultats s'expliquent essentiellement par la diversité de la géométrie des bâtiments, qui entraîne des alternances complexes de zones ensoleillées et de zones d'ombre. Impossibles à obtenir à méso-échelle, ils mettent en évidence l'apport d'informations inédites fourni par un modèle microclimatique.

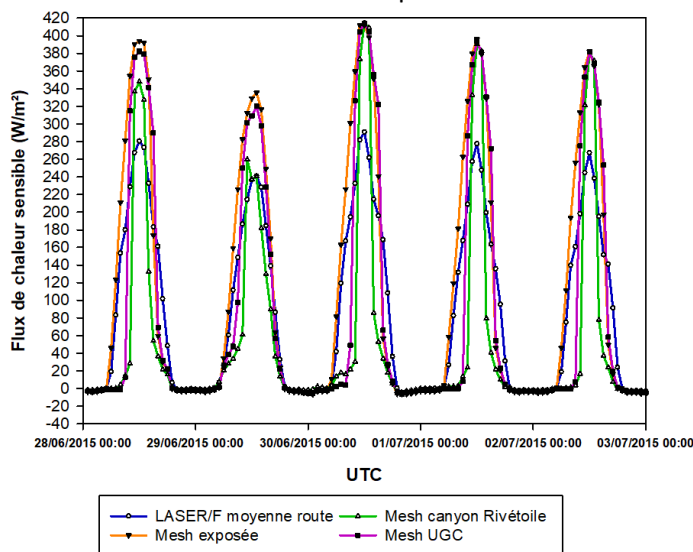


figure 6. Flux de chaleur sensible LASER/F « route » issu de plusieurs sites de la zone Malraux sur la période du 28 juin 2015 à 00h à 3 juillet 2015 à 00h (TU).

Conclusion

Au terme de cette étude, il y a lieu de retenir la faisabilité et l'intérêt de la mise en place d'une chaîne de simulation reliant les échelles mésoclimatique et microclimatique. Cette dernière, testée sur une zone urbaine à enjeux de Strasbourg, a souligné pour la variable du flux de chaleur sensible à la fois la cohérence entre SURFEX et LASER/F à l'échelle de la maille et l'existence d'importantes variations au sein de cette dernière par rapport à la moyenne, justifiant l'intérêt d'un focus ne pouvant être apporté que par les modèles microclimatiques. Les résultats apparaissent pertinents et encourageants pour LASER/F, mais ne sont guère convaincants concernant ENVI-Met. Dès la phase de validation, les difficultés du modèle à simuler la variable considérée au sein de cette analyse ont été mises en évidence. Les résultats n'étant guère restreints au seul flux de chaleur sensible, il conviendra de poursuivre ces analyses avec d'autres variables de manière plus approfondie, afin de se prononcer définitivement sur la pertinence de l'utilisation d'ENVI-Met au sein de cette étude, mais aussi et surtout de continuer à exploiter tout le potentiel de cette chaîne de simulation.

Remerciements : les auteurs tiennent à remercier Météo France et ATMO Grand Est, ainsi que le service géomatique de l'Eurométropole de Strasbourg pour l'accès aux diverses données ayant servi à la réalisation de cette étude.

Bibliographie

- Bruse M., Flerer H., 1998 : Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, **13**, 3-4, 373-384.
- Fenner D., Holtmann A., Meier F., Langer I., Scherer D., 2019. Contrasting changes of urban heat island intensity during hot weather episodes. *Environmental Research Letters*, **14**, 12p.
- Goret M., 2021. Diagnostic de surchauffe Eurométropole de Strasbourg. Rapport d'étude, Météo France, 37p.
- Hénon A., Mestayer P., Lagouarde J.-P., Voogt J., 2012 : An urban neighborhood temperature and energy study from the CAPITOUL experiment with the SOLENE model – Part 1 : analysis of flux contributions. *Theoretical and Applied Climatology*, **110**, 177-196.
- Kastendeuch P.P., Najjar G., 2009 : Simulation and validation of radiative transfers in urbanised areas. *Solar Energy*, **83**, 333-341.
- Kastendeuch P.P., Najjar G., 2015 : Une simulation des interactions ville-atmosphère à différentes échelles : application sur Strasbourg. *Climatologie*, **12**, 44-64.
- Kastendeuch P.P., Najjar G., Colin J., 2017 : Thermo-radiative simulation of an urban district with LASER/F. *Urban Climate*, **21**, 43-65.
- Lemonsu A., Masson V., Shashua-Bar L., Erell E., Pearlmutter D., 2012 : Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. *Geoscientific Model Development*, **5**, 1377-1393.
- Masson V., 2000 : A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-layer Meteorology*, **118**, 477-501.
- Najjar G., Colin J., Kastendeuch P., Ngao J., Saudreau M., Landes T., Ameglio T., Luhahe R., Guillemin S., Schreiner G., Kleinpeter J., Nerry F., 2015. *A three years long fieldwork experiment to monitor the role of vegetation on the urban climate of the city of Strasbourg, France*. International conference on urban climate, 12th symposium, Toulouse, France, 6p.
- Philipps N., Kastendeuch P.P., Najjar G., 2020. Analyse de la variabilité spatio-temporelle de l'ICU à Strasbourg. *Climatologie*, **17**, 11p.
- Richard Y.,
- Wang Z.-H., Bou-Zeid E., Smith J.A., 2013 : A coupled energy transport and hydrological model for urban canopies evaluated using a wireless sensor network. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **139**, 675, 1643-1657.