

UNE SIMULATION DES INTERACTIONS VILLE-ATMOSPHÈRE À DIFFÉRENTES ÉCHELLES : APPLICATION SUR STRASBOURG

Pierre P. KASTENDEUCH & Georges NAJJAR

Laboratoire Icube (UMR 7357) – Université de Strasbourg
300 bd Sébastien Brant, CS 10413
F-67412 Illkirch Cedex – France
kasten@unistra.fr

Résumé :

Plusieurs modèles météorologiques ont été utilisés pour simuler les interactions ville-atmosphère à différentes échelles. Cette chaîne de simulation implique l'utilisation de réanalyses globales d'une résolution de 16 km comme données de forçage météorologique. Ce forçage est utilisé pour contraindre un modèle de méso-échelle qui permet d'atteindre une résolution de 250 m sur la ville grâce à la technique du grid-nesting. Finalement les champs du modèle à 250 m ont été utilisés comme forçage météorologique pour un modèle de simulation de canopée urbaine en 3D qui fonctionne avec une résolution de quelques mètres. Les outils utilisés pour atteindre cet objectif sont : les réanalyses du CEPMMT, le modèle Meso-NH & SURFEX (de Météo-France et du Laboratoire d'Aérodynamique) et le modèle de canopée urbaine LASER/F (Icube). Une simulation a été réalisée sur Strasbourg pour tester cette chaîne sur une période qui va du 13 au 17 août 2002. Les validations montrent que les processus de surface et atmosphériques simulés par Meso-NH & SURFEX pour la résolution de 250 m sont en accord avec les mesures de terrain. Pour s'assurer que le modèle de canopée urbaine en 3D s'intègre bien dans la chaîne de simulation, ses résultats sont comparés à ceux de SURFEX pour un quartier. Les analyses montrent que les résultats obtenus par ce modèle sont en accord avec ceux de SURFEX. L'introduction de la géométrie réelle du quartier en 3D permet même un gain appréciable pour certaines variables. Vu la cohérence des résultats obtenus, l'adjonction du modèle de canopée urbaine se justifie dans cette chaîne. Et ceci d'autant plus que ce type de modèle permet l'accès à de nouvelles informations avec un haut niveau de détails.

Mots-clés : villes, canopée urbaine, modélisation, géométrie 3D, changements d'échelles.

Abstract:

A procedure to simulate the town-atmosphere interactions at multiple scales: application on Strasbourg

Several meteorological models are used in this article to achieve the simulation of city-atmosphere interactions down to a resolution of a few meters. The simulation sequence involves the use of information obtained at global scale to force a mesoscale model. The mesoscale model gives in turn the forcing for a local urban canopy model. The three tools used in the study are the global reanalysis of the CEPMMT, the mesoscale system Meso-NH & SURFEX (Météo-France and Laboratoire d'Aérodynamique) and the urban canopy scheme LASER/F (Icube). A simulation has been done on Strasbourg for a period from August 13 to 17, 2002. Due to the grid-nesting technique, the Meso-NH & SURFEX simulation reaches a resolution of 250 m over the city. Validations have shown that atmospheric and surface processes simulated at this stage were in agreement with the field measurements. To go a step further towards the high resolution and to increase the accuracy of the results, an additional simulation level was added to the mesoscale simulation to focus on a neighborhood. Analyses show that the results obtained by this model are of the same quality as those of SURFEX. The introduction of the actual geometry of the area in 3D allows a significant gain for some variables. Given the consistency of the results, we can consider that this new level of simulation fits perfectly with the other models, and provides a good level of quality. The use of high resolution models like LASER/F is justified, especially as they allow access to new types of more detailed information.

Keywords: towns, urban canopy, modelling, 3D geometry, scale changes.

Introduction

Il existe actuellement toute une panoplie de modèles météorologiques ou climatiques, plus ou moins spécialisés et complémentaires, qui couvrent une vaste gamme d'étendues allant de

la planète (on les appelle des modèles globaux) à l'échelle synoptique (les modèles méso), jusqu'à la parcelle (les modèles micro). Certains de ces modèles sont capables de simuler l'impact d'une ville complète sur l'atmosphère, tandis que d'autres parviennent à reproduire avec beaucoup de détails les processus qui se déroulent au sein même des quartiers. Tous ces modèles constituent potentiellement une véritable chaîne de simulations permettant de modéliser l'atmosphère à différentes échelles et résolutions. Encore faut-il réussir à les faire dialoguer correctement.

Comme les modèles globaux fonctionnent avec des résolutions trop grossières pour discerner correctement les villes, ils peuvent surtout fournir les conditions aux limites pour le niveau de modélisation suivant. La simulation des zones urbaines repose donc actuellement essentiellement sur l'utilisation de modèles méso-météorologiques. Le domaine de simulation de ces modèles permet d'englober toute la ville, ses zones rurales voisines, ainsi que l'atmosphère régionale qui coiffe le tout. L'inconvénient est que le domaine étudié est si vaste (des milliers de kilomètres carrés) qu'il faut se contenter d'une résolution spatiale raisonnable (kilométrique ou hectométrique) pour réussir à tout simuler. Ce niveau de simulation est intéressant car il atteint des résolutions qui sont largement suffisantes pour étudier l'impact du milieu urbain sur la couche limite atmosphérique (Rozoff *et al.*, 2003 ; Hidalgo *et al.*, 2008a, 2008b, 2010). Il permet même de différencier le comportement des différents types de quartiers qui composent la ville (Masson *et al.*, 2013a).

Les performances de ces modèles reposent sur l'utilisation de schémas numériques de plus en plus efficaces, qui savent résoudre au mieux les équations de la dynamique des fluides et qui tiennent compte des interactions qui existent entre la surface terrestre et l'atmosphère (Coiffier, 2009). Il s'avère, en effet, que les échanges de quantité de mouvement, de chaleur et de masse entre l'atmosphère et la surface terrestre influencent au plus haut point le système climatique à toutes les échelles. Ces processus font évoluer les masses d'air et modulent l'ambiance climatique locale. Ils ont donc été progressivement introduits dans tous les modèles météorologiques. Cette intégration a conduit à la création de ce que l'on appelle des « schémas de surface », dont le rôle consiste à simuler les contraintes exercées par la surface terrestre sur la partie inférieure de l'atmosphère (cette dernière étant simulée par le modèle atmosphérique). Avec les années, ces schémas de surface ont eux-mêmes énormément progressé, au point de devenir à leur tour de véritables modèles. Etant donné l'importance prise par le climat urbain ces dernières décennies, la ville a fait l'objet d'attentions particulières et les schémas de surface de dernière génération comme ceux de Masson (2000), Kusaka *et al.* (2001) ou Dupont et Mestayer (2006) possèdent des jeux d'équations à bases physiques très sophistiqués pour la ville (*cf.* l'article de Masson, 2006, pour une revue détaillée de ces schémas). Ils possèdent cependant deux limitations majeures : (i) comme ils sont conçus à l'origine pour pouvoir être intégrés dans des modèles méso-météorologiques, ils sont contraints de travailler avec la même résolution spatiale que ceux-ci ; (ii) vu la résolution spatiale, la ville y est représentée de manière simplifiée *via* des indices. On dit que la ville est « paramétrisée ». Tout ceci ne permet pas d'accéder aux détails de ce qui se déroule à l'échelon sous-maille.

Pour accéder à un niveau de détail plus élevé, il faut utiliser une catégorie de modèles supplémentaire dans lesquels la géométrie de la zone simulée est représentée explicitement en 3D. Cette technique permet réellement de représenter la ville avec des blocs ou des formes qui reproduisent les bâtiments. Les modèles micro-météorologiques (Bruse et Fleer, 1998) reposent sur cette technique. Comme ils utilisent aussi les équations de la dynamique des fluides pour modéliser l'atmosphère, ils sont capables de simuler des effets aérodynamiques très fins comme ceux induits par les bâtiments (Huang *et al.*, 2009) ainsi que les mouvements de l'air à l'intérieur des rues (Gallagher *et al.*, 2012). Le seul inconvénient est qu'ils sont

plutôt difficiles à mettre en œuvre et qu'ils ne simulent pas forcément les processus de surface (comme les échanges radiatifs entre les éléments urbains). Dans certains cas, ils ne possèdent même pas de schémas numériques capables de leur donner les conditions réelles de la surface (comme la température des objets). Leur intérêt est donc limité aux applications aérologiques mentionnées ci-dessus et ils ne conviennent pas forcément à tous les besoins de la climatologie urbaine. Dans cette catégorie, il existe d'autres types de modèles qui se focalisent plus sur les interactions entre la surface urbaine et son atmosphère. Ce sont des modèles comme SOLENE (Miguet et Groleau, 2002), RayMan (Matzarakis *et al.*, 2007) ou LASER/F (Kastendeuch et Najjar, 2009). Ils fonctionnent dans un environnement urbain décrit explicitement en 3D, mais sans utiliser les équations de la dynamique des fluides. Ils offrent une finesse de résultats très élevée tout en résolvant les processus fondamentaux du bilan d'énergie qui donnent naissance aux caractéristiques du climat urbain. Ces modèles constituent une bonne alternative pour tous ceux qui s'intéressent au microclimat urbain sans ses aspects aérologiques détaillés.

En se basant sur les aptitudes des différents outils disponibles, force est de constater que le segment de la chaîne de simulation qui va du niveau global au modèle méso-météorologique est bien maîtrisé. Tout est déjà prévu pour lier numériquement ces deux échelles et la procédure est couramment mise en pratique en climatologie urbaine (Ooka, 2007). De leur côté, les modèles de canopée urbaine en 3D comme LASER/F arrivent à un très bon niveau de maturité et commencent à prouver leur fiabilité (voir par exemple Kastendeuch et Najjar, 2009). Or, le lien entre cette catégorie de modèle et la précédente, n'est pas forcément facile à établir. Ils n'ont pas forcément été prévus pour fonctionner ensemble. Il manque la liaison avec la méso-échelle. Dans son travail, Ooka (2007) mentionne les différentes catégories de modèles qui lui semblent utiles dans le domaine de la climatologie urbaine, mais il les utilise chacun séparément. A notre connaissance, aucune équipe n'a encore vraiment réussi à combiner tous ces outils numériques pour constituer une chaîne de simulation cohérente et complète pour simuler le climat urbain. Une chaîne de ce type pourrait pourtant rendre d'énormes services en recherche fondamentale et appliquée (Ooka, 2007). En cas de succès, elle permettrait, en principe, de donner une vue d'ensemble d'une ville et de ses processus à toutes les échelles spatiales et avec toutes les résolutions souhaitables. L'objectif principal de cet article consiste donc à tenter cette démarche, à en prouver la faisabilité ainsi que son intérêt. Les modèles numériques utilisés et la procédure de simulation sont brièvement décrits dans la section 1. La crédibilité de la démarche est évaluée en validant les simulations par des mesures de terrain dans la section 2. L'apport de la 3D est abordé à l'aide de quelques exemples dans la section 3.

1. Méthodologie : présentation des outils numériques et de la procédure

Nous avons utilisé les réanalyses du CEPMMT (Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme) pour initier la chaîne de simulation. Ce sont des champs atmosphériques qui couvrent la planète avec une précision de 16 km sur l'Europe. Ces données s'obtiennent facilement auprès des organismes météorologiques appropriés. Comme la résolution de ces champs s'avère évidemment insuffisante pour étudier le climat urbain, ils sont utilisés pour forcer à intervalles réguliers un modèle de méso-échelle capable d'atteindre des résolutions spatiales plus appropriées. C'est le modèle Méso-NH de Météo-France et du Laboratoire d'Aérodynamique que nous avons choisi d'utiliser pour franchir cette étape. Ce modèle a donc été appliqué sur la ville de Strasbourg pour obtenir une résolution de 250 m. Pour parachever cette chaîne, les sorties atmosphériques obtenues par Méso-NH ont été mises à profit pour forcer le modèle de canopée urbaine en 3D, LASER/F. Cette dernière étape permet de simuler un quartier de la ville avec une résolution métrique.

1.1. Le système Méso-NH & SURFEX

C'est sur le modèle de méso-échelle que repose en grande partie le succès de la démarche. Il est chargé de réaliser la transition spatiale entre les réanalyses globales et le niveau local. C'est aussi dans ce modèle que le rôle de la ville sur l'atmosphère commence aussi à s'affirmer. Les résolutions qu'il est capable d'atteindre le rendent apte à simuler : (i) la zone rurale autour de la ville, puisque son rôle sur l'atmosphère est tout aussi important que celui de la ville elle-même, surtout lorsque le site présente d'importantes particularités (c'est ce que démontre l'expérience menée sur la ville de Marseille par Lemonsu *et al.*, 2006) ; (ii) les rétroactions qui se déroulent entre l'atmosphère et la ville, puisque la ville subit l'influence des masses d'air qui circulent sur son territoire, et qu'en retour, elle influence la masse d'air qui se situe à son contact. Le système de modélisation Méso-NH & SURFEX convient parfaitement pour ce genre d'exercice. Il est capable de simuler le climat urbain pour des situations météorologiques qui s'étendent sur quelques jours avec une très bonne résolution spatiale (jusqu'à 250 m dans notre cas).

1.1.1. Le rôle primordial du schéma de surface

Méso-NH est un modèle de recherche météorologique (Lafore *et al.*, 1998) qui est couplé avec un module de chimie atmosphérique (Crassier *et al.*, 2000) et avec un schéma de surface dont le nom est SURFEX (Masson *et al.*, 2013b). Dans un système de simulation de ce type, le schéma de surface joue un rôle non négligeable, puisqu'il est chargé de simuler l'influence de la surface terrestre sur l'atmosphère. C'est un rôle complexe, dans lequel il faut tenir compte des nombreux milieux existants, de leur état et de tous les processus qui se déroulent au sol, comme les transferts d'eau ou de chaleur. Ensuite, il doit fournir au modèle atmosphérique les valeurs correctes d'un certain nombre de flux d'énergie (radiatifs et thermiques), de masse (eau, poussières, gaz) ou de mouvement (vitesse et direction du vent) qui proviennent de la surface et qui intègrent la basse atmosphère (et sont susceptibles de l'influencer). La contrepartie de ce couplage, c'est que le schéma de surface doit travailler sur le même domaine de simulation et avec la même résolution spatiale que le modèle atmosphérique. Cela signifie que la surface terrestre est découpée suivant un quadrillage dont la résolution horizontale peut varier de quelques centaines de kilomètres à quelques dizaines de mètres selon les objectifs. Or, dans chacune de ces mailles se trouve potentiellement un nombre et une variété différente de milieux naturels. Dans le cas où une maille contient un certain pourcentage de milieu urbain, il faut décrire correctement toutes les surfaces artificielles, les bâtiments, les rues, mais aussi les éventuels espaces verts qui composent ce milieu (jardins, parcs). Heureusement, SURFEX est couplé à une base de donnée, qui recense tous les descripteurs concernant les principaux écosystèmes mondiaux (Masson *et al.*, 2003) et qui a été réactualisée sur l'Europe par Faroux *et al.* (2013).

1.1.2. Les limites induites par les paramétrisations

Du fait de la résolution spatiale à laquelle le schéma de surface travaille, la ville est « paramétrisée » dans chaque maille. Cela signifie que la géométrie urbaine y est introduite sous forme d'indices qui fournissent le pourcentage de zones bâties, la hauteur moyenne des bâtiments, la largeur moyenne des rues... Les processus urbains sont simulés par des routines de calcul spéciales contenues dans le sous-programme Town Energy Budget (TEB) dont le fonctionnement est décrit en détail dans l'article publié par Masson (2000). Pour résumer, TEB tient compte des processus à l'échelle des quartiers et des bâtiments. C'est l'un des seuls schémas de surface de ce type à considérer les processus urbains liés au cycle de l'eau et à la neige. Il tient compte de la géométrie de la ville, simule les ombres et le piégeage radiatif dans le canyon, conduit la chaleur dans les bâtiments, gère l'eau de pluie, l'évaporation et le

ruissellement, calcule les échanges turbulents et le microclimat dans les rues... Tous ces processus physiques permettent des simulations numériques fiables et rapides sur des zones étendues.

Malheureusement, le système Méso-NH & SURFEX atteint les limites de ses possibilités lorsque les résolutions atteignent quelques dizaines de mètres sur la ville. Les concepts et paramétrisations qui sont utilisés dans TEB deviennent de moins en moins valables. Ils supposent l'existence d'un nombre minimum de rues, l'équiprobabilité des orientations, l'homogénéité des bâtiments. Or, que signifierait, par exemple, la hauteur moyenne d'un bâtiment ou la largeur moyenne d'une rue dans une maille qui ne ferait plus que 10 m de côté ? La validité de ces paramétrisations suppose une taille de maille qui autorise la présence de rues et de bâtiments. Pour gagner en résolution, il faut manipuler des modèles qui s'affranchissent de ces paramétrisations géométriques.

1.2. Le modèle de canopée urbaine 3D : LASER/F

LASER/F (Latent Sensible Radiation Fluxes) est un modèle de canopée urbaine qui a été développé dans notre équipe dans le but de répondre spécifiquement aux besoins de la climatologie urbaine lorsque de hautes résolutions sont requises (Kastendeuch *et al.*, 2006 ; Kastendeuch et Najjar, 2009 ; Kastendeuch, 2012). Il est applicable aussi bien sur des quartiers hautement urbanisés et artificiels de centre-ville, que sur des quartiers plus pavillonnaires qui contiennent des espaces verts.

1.2.1. La géométrie urbaine en 3D

Le fonctionnement de LASER/F s'apparente à celui d'un modèle de bilan d'énergie à très haute résolution. Toute l'originalité de ce type de modèle réside dans le domaine de simulation qui contient une description géométrique détaillée en 3D de la ville. C'est le seul mode de représentation géométrique qui permette d'atteindre un bon réalisme et de très hautes résolutions. En conséquence, le domaine de simulation de LASER/F est constitué d'un certain nombre d'objets en 3D qui décrivent la ville en détail : arbre, bâtiment, route, pelouse. Cette description géométrique de la ville s'accompagne d'un inventaire des propriétés physiques des objets et notamment le type d'objet et les caractéristiques des matériaux.

Toutes les composantes du bilan d'énergie peuvent être obtenues pour n'importe quel objet ou partie d'un objet. Ce peut être une fenêtre, un élément de toiture ou une façade, avec des orientations, des pentes et des matériaux quelconques. LASER/F calcule : (i) les transferts de chaleur avec l'atmosphère ainsi que la conduction de chaleur dans les matériaux ; (ii) les échanges radiatifs pour les longueurs d'onde qui correspondent au rayonnement émis par le soleil, l'atmosphère et la surface terrestre (en réflexion, émission, transmission). En plus du bilan d'énergie des surfaces, des algorithmes sont chargés de calculer les valeurs de certaines variables atmosphériques dans les rues (comme la température de l'air, l'humidité et la vitesse du vent). Ces calculs sont basés sur des paramétrisations qui évitent l'emploi des équations complexes de la dynamique des fluides.

1.2.2. Stratégie de couplage avec Méso-NH

Pour parachever notre chaîne de simulation, il reste encore à trouver comment combiner astucieusement LASER/F avec le système Méso-NH & SURFEX. Cette opération s'avère finalement assez simple, pour deux raisons. D'abord, LASER/F a été conçu dès le départ pour fonctionner sur un domaine de simulation scindé en voxels. Ce stratagème revient à imiter la façon dont les modèles de méso-échelle gèrent leur propre domaine de simulation. Il est même possible de s'arranger pour que la taille des voxels de LASER/F corresponde

parfaitement à celle de la grille du domaine de simulation de Méso-NH & SURFEX. De la sorte, il est permis d'établir un lien direct entre les grilles de ces différents modèles. La seconde raison tient à la façon dont les conditions aux limites s'appliquent à LASER/F. On parle de contrainte ou de forçage météorologique. Comme pour n'importe quel modèle, LASER/F a besoin de connaître l'évolution de la situation météo. Or ce forçage peut se faire individuellement, pour chaque voxel de LASER/F. Il consiste à imposer régulièrement les valeurs de certaines variables météorologiques juste au-dessus de la canopée urbaine (cf. tableau 1 pour la liste des variables de forçage). Aussi, il suffit d'extraire les résultats atmosphériques obtenus par Méso-NH au-dessus de la zone, puis de fournir les valeurs adéquates aux voxels de LASER/F. La contrainte technique du couplage entre LASER/F et Meso-NH étant résolue, il reste à prouver que cette chaîne de simulation fonctionne et donne des résultats corrects.

Direct solaire (W/m ²)	Diffus solaire (W/m ²)	IR atmosphérique (W/m ²)	Temp. Air (°C)	HR air (%)
Vitesse du vent (m/s)	Direction du vent (deg)	Précipitation liquide (mm)	Précipitation solide (mm)	Pression (hPa)

Tableau 1 : Liste complète des variables qui font office de forçage dans la simulation LASER/F. Les valeurs qui correspondent à ces variables sont imposées au-dessus du niveau des toits de chaque voxel. Elles peuvent être obtenues par une station météo installée sur les toits ou par une simulation météorologique de méso-échelle. *Complete list of the forcing variables necessary for a LASER/F simulation. These variables are imposed over the roof level of every voxel. They can be acquired from meteorological measurements or from a mesoscale model.*

1.3. La procédure de simulation

Ce sont les belles journées d'été qui permettent l'apparition de l'îlot de chaleur urbain nocturne. La chaîne de simulation a donc été appliquée pour modéliser l'agglomération de Strasbourg et sa région pendant cinq journées d'été, du 13 au 17 août 2002. Durant cette période, l'Alsace est sous l'emprise d'un anticyclone qui s'accompagne d'un temps ensoleillé et chaud, et d'un vent de nord-est faible. Les champs météorologiques issus des réanalyses du CEPMMT ont été acquis pour cette période toutes les six heures. Leur résolution maximale est de 16 km sur la région. Ces données ont servi à initialiser et à forcer le modèle de méso-échelle à intervalles réguliers.

Pour obtenir les meilleurs résultats possibles sur la ville de Strasbourg, le système Méso-NH & SURFEX a été employé selon la technique des modèles emboîtés (technique connue sous le nom de « grid-nesting » en anglais). Cette technique permet de cerner progressivement l'agglomération par des simulations de plus en plus précises : en partant d'une simulation large et grossière, on focalise sur la ville par paliers successifs en utilisant trois modèles. Cette technique est une réponse des modélisateurs aux problèmes posés par les changements trop brutaux de résolution spatiale. Chaque modèle est chargé d'améliorer graduellement la résolution en passant de 10 km à 2 km, puis à 250 m.

Le premier modèle Méso-NH, d'une résolution horizontale de 10 km (matrice de 90 x 90 points centrée sur Strasbourg (48,59°N ; 7,75°E), soit un domaine de 900 x 900 km) fournit la situation météorologique à l'échelle synoptique (figure 1). Ce premier modèle Méso-NH sert donc d'interface avec le niveau global des réanalyses du CEPMMT. Le second modèle Méso-NH fonctionne avec une résolution horizontale de 2 km (matrice de 80 x 80 points, soit un domaine de 160 x 160 km). Enfin, le troisième modèle Méso-NH permet d'atteindre la résolution finale de 250 m sur la ville (matrice de 120 x 120 points, soit un domaine de 30 x 30 km, figure 2). Ces trois modèles Méso-NH qui travaillent avec des résolutions différentes au cours de la simulation fonctionnent simultanément, s'influencent et s'échangent leurs

informations en temps réel. Cet emboîtement de modèles nous permet de passer du niveau atmosphérique global au niveau local, en gagnant un facteur 64 au point de vue de la résolution (de 16 km pour les réanalyses à 250 m avec Méso-NH).

Figure 1 : Domaine de simulation du premier modèle. Il s'agit ici du relief. La résolution horizontale est de 10 km, la matrice est de 90 x 90 points, centrée sur Strasbourg (48,59°N ; 7,75°E), soit un domaine de 900 x 900 km. Le domaine du second modèle est délimité par le carré noir. *Simulation domain of the first model. Topographic map of 10 km resolution, 90*90 points, centred over Strasbourg (48.59°N; 7.75°E). The black square represents the simulation domain of the second model.* Source : Kastendeuch *et al.*, 2010.

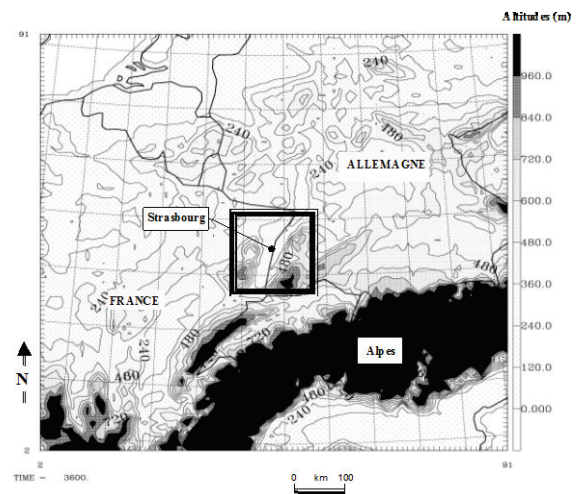
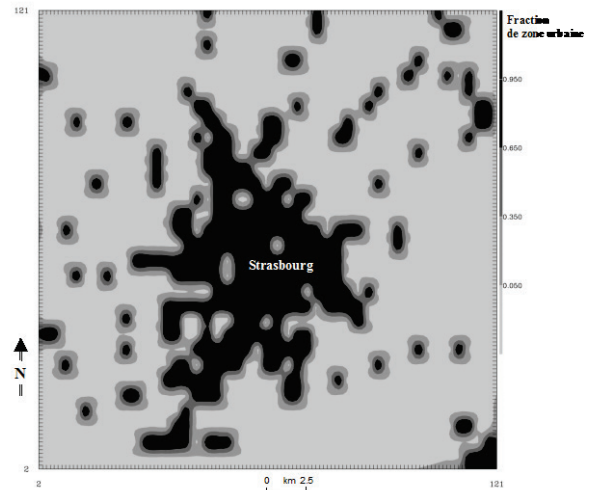
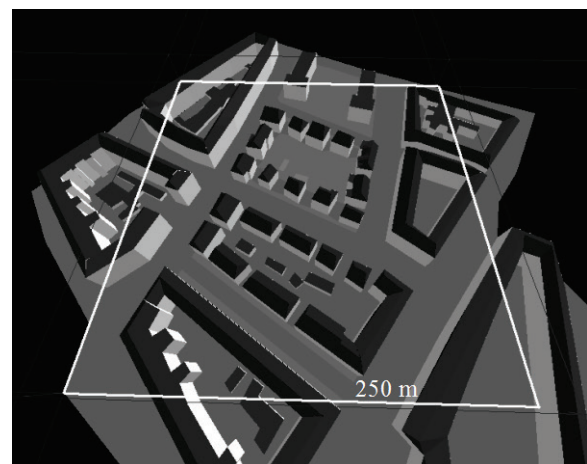


Figure 2 : Domaine de simulation du troisième modèle. Il s'agit ici de la fraction de zone urbaine (exprimée entre 0 et 1). La ville apparaît en noir. La résolution horizontale est de 250 m, la matrice est de 120 x 120 points, centrée sur Strasbourg (48,59°N ; 7,75°E), soit un domaine de 30 x 30 km. *Simulation domain of the third model. The map represents the urban fraction. 250 m of horizontal resolution, 120*120 points, centred over Strasbourg (48.59°N; 7.75°E).* Source : Kastendeuch *et al.*, 2010.



Pour parfaire la simulation, les données de forçage adéquates ont été extraites du modèle Méso-NH à 250 m, afin de forcer le modèle LASER/F sur un quartier résidentiel de Strasbourg (figure 3).

Figure 3 : Géométrie 3D d'un quartier de Strasbourg pour la simulation de LASER/F. La zone de 250 m de côté, délimitée en blanc, représente le voxel de référence de la simulation dont les résultats sont comparés à ceux de SURFEX. *3D geometry of the LASER/F simulation domain. The white square (250 m width) shows the main voxel for which the results will be compared to SURFEX.*



2. Vérification, validation et comparaison des simulations

Une simulation Mésos-NH similaire avait déjà été tentée par notre équipe il y a plusieurs années pour reproduire l'îlot de chaleur urbain de Strasbourg. Cette simulation avait même fait l'objet d'une validation assez poussée à l'époque, grâce à des comparaisons avec des mesures de terrain (Kastendeuch *et al.*, 2010). Cette validation avait démontré qu'il était possible de faire confiance aux résultats obtenus sur la ville, et notamment pour les résolutions les plus fines de 2 km et 250 m. En partant de ces acquis, il nous a paru inutile de refaire ce travail de validation avec Mésos-NH (la période utilisée étant ici la même). En revanche, il reste à démontrer que l'adjonction de LASER/F se fait avec un bon niveau de performances et de cohérence.

Dans un premier temps, l'idée consiste à comparer les résultats du schéma de ville contenu dans SURFEX avec celui de LASER/F. SURFEX-TEB étant considéré comme une référence en matière de modélisation climatologique urbaine, il semble logique de vouloir comparer les capacités de LASER/F avec celles de ces modèles. Cependant, comme LASER/F a été appliqué sur un petit quartier de la ville, la comparaison doit se faire sur la même zone. Les résultats obtenus par SURFEX ont donc été extraits pour le quartier représenté dans LASER/F. Pour renforcer encore ces validations, la qualité respective des simulations pourra aussi être jugée par rapport à des mesures faites sur le terrain et à proximité immédiate de la zone. Ces mesures proviennent d'une campagne expérimentale organisée à Strasbourg en 2002 par Najjar *et al.* (2004) et qui couvre l'ensemble de la période de simulation. Le dispositif de mesures installé sur le terrain à l'époque, doit permettre de valider les deux modèles pour un très grand nombre de processus fondamentaux. Notons que pour faire ressortir au maximum les contrastes entre les différents éléments et pour obtenir des signatures claires dans les résultats, seules les journées les plus ensoleillées des 15 et 16 août seront exploitées pour la comparaison. Cela évite de créer des différences artificielles dans les données de rayonnement lorsque le passage des nuages n'est pas simulé exactement au bon moment.

Puisque SURFEX travaille en découpant la ville suivant un maillage de 250 m et que LASER/F découpe le quartier en voxels de même taille, les résultats de ces deux modèles peuvent être comparés directement sur cette base spatiale. C'est donc à l'échelle du voxel que la comparaison va s'effectuer. Ces données sont faciles à obtenir numériquement puisque les deux modèles ont été codés pour fournir des valeurs moyennes sur ces entités. Par contre, pour les mesures de terrain, il est beaucoup plus difficile d'obtenir des données moyennes représentatives de ce genre de territoire. Cela suppose de multiplier les capteurs.

Il est possible de contourner partiellement cette difficulté en installant certains appareils de mesures en hauteur. Le raisonnement est le suivant : plus un capteur est haut, plus son aire contributive est grande et plus il couvre une zone importante. Ce raisonnement est valable pour les capteurs de rayonnement et partiellement pour les capteurs de flux de chaleur (latente et sensible). Pour d'autres variables, on peut faire l'hypothèse que si le capteur n'est pas trop influencé par des éléments proches (comme un mur ou un arbre), et que le quartier est homogène par rapport à son agencement urbain, alors ce qui est mesuré ponctuellement peut être transposé spatialement (sur une distance raisonnable). Ces problèmes démontrent toute la difficulté d'obtenir une bonne représentativité spatiale des mesures en ville. En fonction des variables analysées, on utilisera l'un ou l'autre de ces raisonnements pour obtenir les mesures qui serviront de référence. Dans certains cas, il s'agira de données obtenues au-dessus des toits, sur des mâts, ou de mesures dans les rues (Najjar *et al.*, 2004). Lorsque c'est possible, les mesures seront des moyennes obtenues à l'aide de données de plusieurs capteurs.

La première comparaison entre SURFEX et LASER/F concerne le rayonnement net moyen de la zone (figure 4). Ce rayonnement net (RN) représente le solde entre le rayonnement qui arrive à la surface et celui qui en repart dans toutes les longueurs d'onde (figure 4a). Les différences entre les simulations et les mesures de terrain sont présentées sur la figure 4b. On constate d'emblée que les deux modèles s'écartent des mesures, notamment en période diurne et particulièrement pendant les phases de transition du matin et de fin d'après-midi. Cela prouve que ce sont deux moments de la journée particulièrement difficiles à modéliser. Le rayonnement solaire y est en évolution rapide et la variation angulaire du soleil dans le ciel est énorme. De petites erreurs sur les angles ou sur la synchronisation des données peuvent expliquer ces écarts. La surestimation systématique du rayonnement net par SURFEX est problématique car elle révèle un biais dans certains algorithmes radiatifs, notamment du point de vue des pertes. Globalement, c'est LASER/F qui obtient les meilleurs résultats pour l'ensemble de deux journées avec une erreur-type de seulement 16 W m^{-2} contre $46,6$ pour SURFEX.

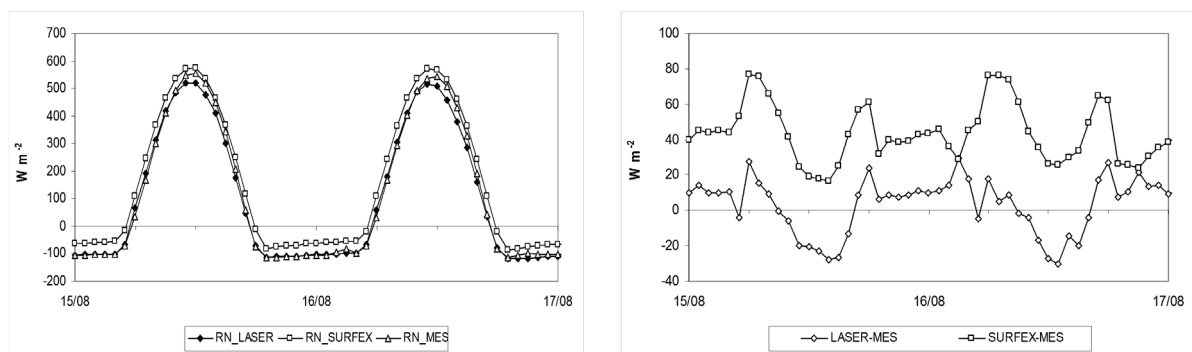


Figure 4 : Graphique de gauche : rayonnement net simulé par les modèles (RN_LASER , RN_SURFEX) comparé à celui mesuré (RN_MES). Graphique de droite : écarts constatés entre le rayonnement net simulé et mesuré ($LASER-MES$, $SURFEX-MES$). *Graph on the left: simulated net radiation (RN_LASER , RN_SURFEX) compared to the measurements (RN_MES). Graph on the right: differences between the simulated and measured net radiation ($LASER-MES$, $SURFEX-MES$).*

Grâce au dispositif de mesures installé sur le terrain, il est possible de comparer certaines des composantes du rayonnement net et en premier lieu le rayonnement solaire réfléchi. Ce rayonnement réfléchi est un peu mieux simulé par SURFEX que par LASER/F (figure 5), mais la différence ne se joue qu'à quelques watts près (erreur-type de 2 et 4 W m^{-2} respectivement). Cette composante n'explique pas le biais trouvé dans le rayonnement net.

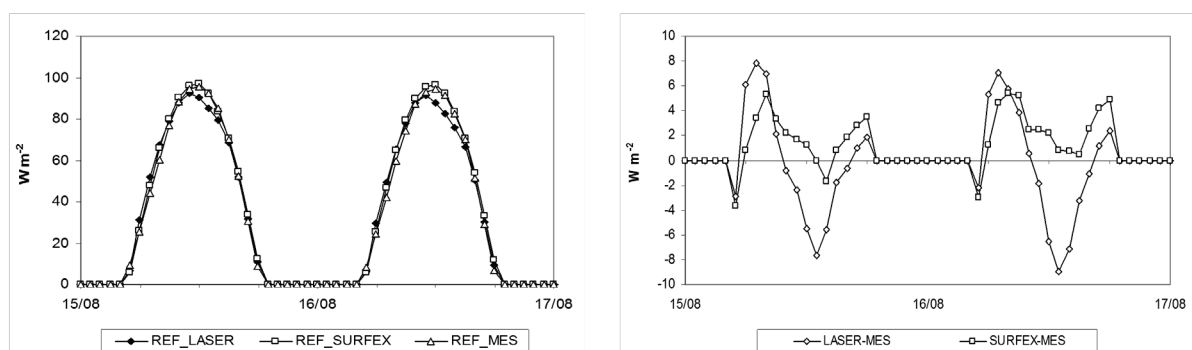


Figure 5 : Graphique de gauche : rayonnement solaire réfléchi simulé par les modèles (REF_LASER , REF_SURFEX) comparé à celui mesuré (REF_MES). Graphique de droite : écarts constatés entre le rayonnement réfléchi simulé et mesuré ($LASER-MES$, $SURFEX-MES$). *Graph on the left: simulated reflected radiation (REF_LASER , REF_SURFEX) compared to the measurements (REF_MES). Graph on the right: differences between the simulated and measured reflected radiation ($LASER-MES$, $SURFEX-MES$).*

Le rayonnement infrarouge terrestre offre un début d'explication (figure 6). Il est nettement mieux simulé par LASER/F (qui obtient une erreur-type de l'ordre de 14 W m^{-2}) que par SURFEX (erreur-type de 48 W m^{-2}). Il est intéressant de noter que les deux modèles sous-estiment constamment l'infrarouge terrestre. Étonnement, SURFEX sous-estime considérablement cette composante la nuit. Ce problème vient-il des températures de surfaces ? Aucune mesure expérimentale ne nous permet de le savoir pour le moment. Des investigations complémentaires seront nécessaires.

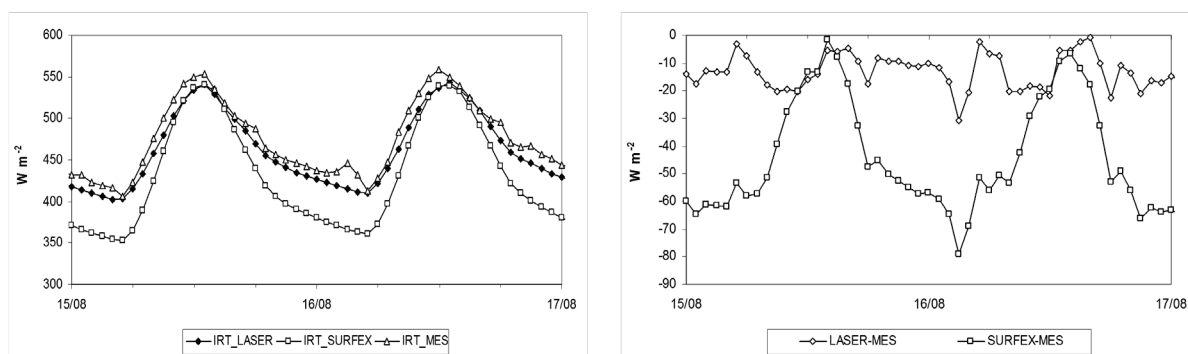


Figure 6 : Graphique de gauche : infrarouge terrestre simulé par les modèles (IRT_LASER, IRT_SURFEX) comparé à celui qui a été mesuré (IRT_MES). Graphique de droite : écarts constatés entre l'infrarouge terrestre simulé et mesuré (LASER-MES, SURFEX-MES). *Graph on the left: simulated terrestrial infrared radiation (IRT_LASER, IRT_SURFEX) compared to the measurements (IRT_MES). Graph on the right: differences between the simulated and measured terrestrial radiation (LASER-MES, SURFEX-MES).*

Étant donné les résultats obtenus pour l'infrarouge terrestre, il n'est pas surprenant de constater que LASER/F surclasse SURFEX au niveau du bilan de l'infrarouge (figure 7). C'est particulièrement vrai en période nocturne, tandis que les deux modèles font quasiment jeu égal en milieu de journée (erreur-type de 8 et 31 W m^{-2} respectivement). Cet important biais constaté pour l'infrarouge terrestre et pour le bilan de l'infrarouge explique une grande partie de l'anomalie obtenue dans le rayonnement net de SURFEX.

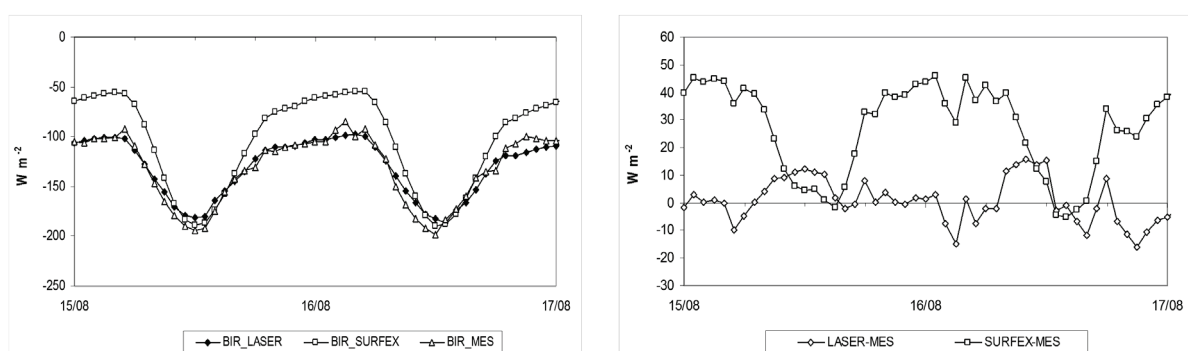


Figure 7 : Graphique de gauche : bilan de l'infrarouge simulé par les modèles (BIR_LASER, BIR_SURFEX) comparé à celui qui a été mesuré (BIR_MES). Graphique de droite : écarts constatés entre le bilan de l'infrarouge simulé et mesuré (LASER-MES, SURFEX-MES). *Graph on the left: simulated infrared radiation balance (BIR_LASER, BIR_SURFEX) compared to the measurements (BIR_MES). Graph on the right: differences between the simulated and measured infrared radiation balance (LASER-MES, SURFEX-MES).*

Le flux de chaleur sensible montre aussi un comportement différent de la part des deux modèles. Il est largement surestimé en journée par SURFEX de plusieurs centaines de watts (figure 8). C'est beaucoup moins le cas avec LASER/F qui colle mieux aux mesures. Pour ce modèle, l'écart ne devient significatif qu'en toute fin d'après-midi (les différences atteignent tout de même 50 et parfois 100 watts par rapport aux mesures). Les erreurs-types sont sans

appel : 30 et 116 W m^{-2} respectivement. Le problème pour SURFEX est que ce flux de chaleur sensible consomme énormément d'énergie. Or, l'équation générale du bilan d'énergie nous enseigne que la surestimation d'une composante doit forcément être compensée par les autres termes. Comme le RN est correct, il faut s'attendre à des erreurs significatives sur d'autres flux. Ensuite, il ne faut pas oublier non plus que ce flux de chaleur sensible est transmis par SURFEX à Méso-NH, ce qui signifie que la couche d'air qui se situe au-dessus de la ville voit arriver un flux de chaleur sensible excessif, qui doit forcément avoir un impact sur la couche limite atmosphérique.

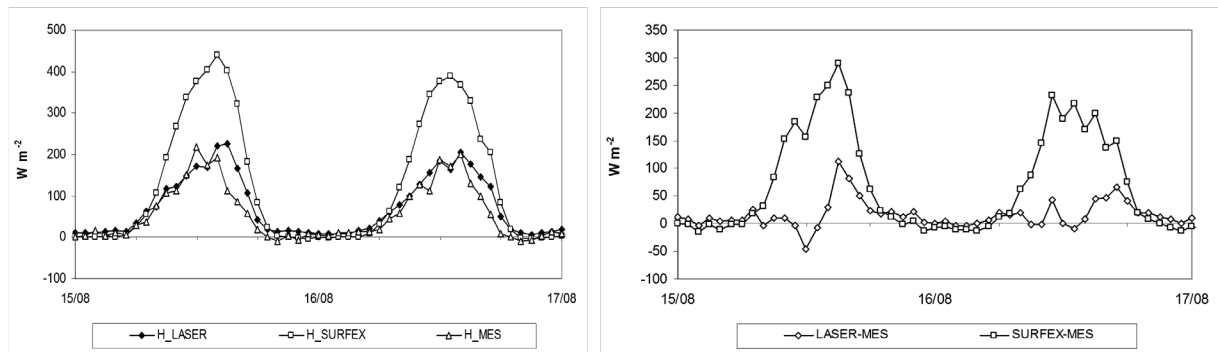


Figure 8 : Graphique de gauche : flux de chaleur sensible simulé par les modèles (H_LASER, H_SURFEX) comparé à celui mesuré (H_MES). Graphique de droite : écarts constatés entre le flux de chaleur sensible simulé et mesuré (LASER-MES, SURFEX-MES). *Graph on the left: simulated sensible heat flux (H_LASER, H_SURFEX) compared to the measurements (H_MES). Graph on the right: differences between the simulated and measured sensible heat fluxes (LASER-MES, SURFEX-MES).*

Le flux de chaleur latente simulé par SURFEX est meilleur que celui de LASER/F (figure 9). Les écarts entre les modèles ne sont pourtant pas très significatifs et tout se joue à une dizaine de watts près. L'ordre de grandeur des mesures est assez bien respecté par les modèles. Le problème c'est que les modèles ne parviennent pas à simuler l'extrême variabilité des valeurs mesurées et encore moins les valeurs négatives (comme celles observées le 16 août). Ces flux négatifs traduisent l'arrivée d'air humide depuis la couche limite urbaine en direction de la canopée urbaine. Si cette hypothèse n'est pas à exclure, il pourrait aussi bien s'agir d'un problème instrumental.

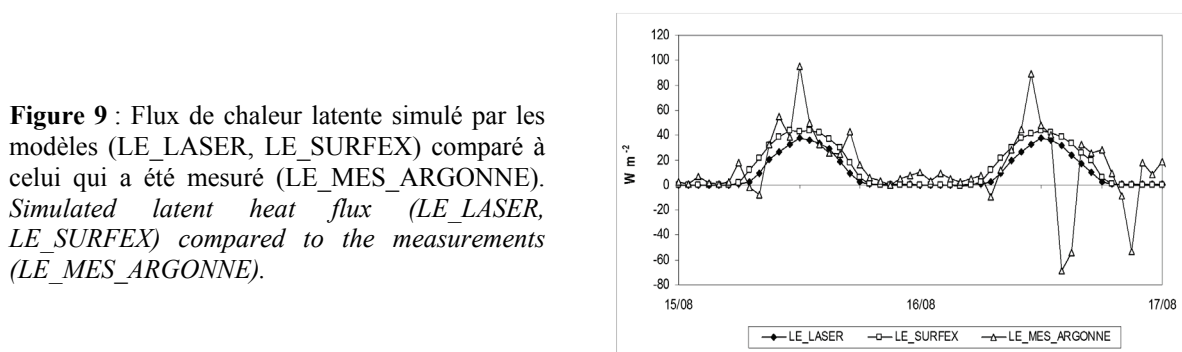


Figure 9 : Flux de chaleur latente simulé par les modèles (LE_LASER, LE_SURFEX) comparé à celui qui a été mesuré (LE_MES_ARGONNE). *Simulated latent heat flux (LE_LASER, LE_SURFEX) compared to the measurements (LE_MES_ARGONNE).*

Aucun des flux analysés jusqu'à présent ne permet vraiment de compenser l'importante quantité d'énergie perdue par SURFEX sous forme de flux de chaleur sensible en journée (ni le RN , ni le flux de chaleur latente). Reste à analyser le flux de chaleur dans le sol. La figure 10 révèle que SURFEX a tendance à sous-estimer de façon très importante ce flux de chaleur (jusqu'à -300 W m^{-2} en période diurne). Le flux de chaleur sensible s'opère donc au détriment de la conduction thermique dans les éléments urbains. Et comme le stockage est faible en journée, cela se traduit par un déstockage nocturne insuffisant. De ce point de vue, LASER/F

s'en sort beaucoup mieux, surtout en période nocturne. Les erreurs-types sont de 51 et 110 $W m^{-2}$ respectivement pour LASER/F et SURFEX.

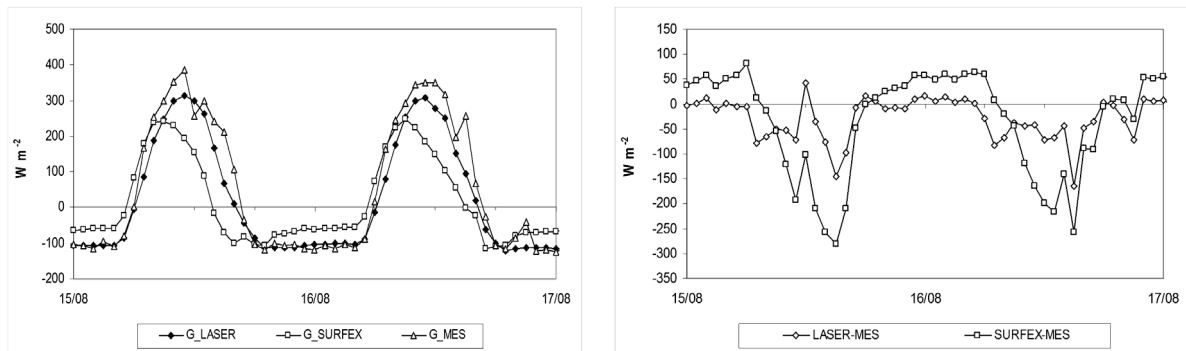


Figure 10 : Graphique de gauche : flux de chaleur dans le sol simulé par les modèles (G_LASER, G_SURFEX) comparé à celui qui a été déduit des mesures (G_MES). Graphique de droite : écarts constatés entre le flux de chaleur dans le sol simulé et mesuré (LASER-MES, SURFEX-MES). *Graph on the left: simulated ground heat flux (G_LASER, G_SURFEX) compared to the measurements (G_MES). Graph on the right: differences between the simulated and measured ground heat fluxes (LASER-MES, SURFEX-MES).*

Tous ces transferts d'énergie reflètent quelques particularités bien connues du climat urbain qui sont : la dominance du flux de chaleur sensible par rapport au flux de chaleur latente, le fort stockage diurne et déstockage nocturne, les échanges radiatifs intenses entre éléments par réflexion ou émission de rayonnement... De ce point de vue, les deux modèles s'en sortent plutôt bien. Il reste à vérifier dans quelle mesure ils sont capables de reproduire aussi l'état de l'atmosphère dans les rues. Certaines mesures de terrain réalisées à proximité de la zone de simulation vont nous permettre de répondre à cette question. L'analyse des écarts de températures sur la figure 11b montre que la température de l'air simulée par LASER/F est légèrement plus proche des mesures que celle de SURFEX (erreur-type de 0,7 et 1,1°C respectivement). Les deux modèles ont tendance à sous-estimer les températures obtenues dans les canyons urbains, particulièrement au moment où le maximum est atteint au cours de l'après-midi (l'écart peut atteindre $-2^{\circ}C$).

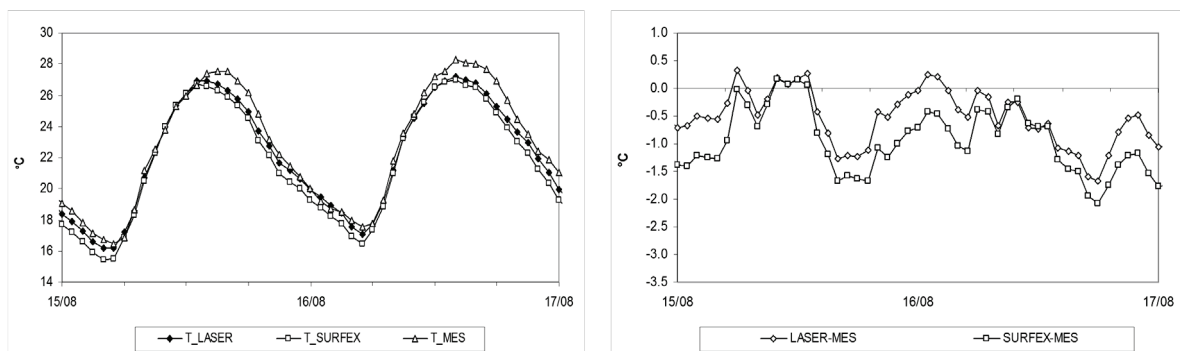


Figure 11 : Graphique de gauche : température de l'air obtenue par les modèles (T_LASER, T_SURFEX) comparée à celle qui a été mesurée (T_MES). Graphique de droite : écarts constatés entre la température simulée et mesurée (LASER-MES, SURFEX-MES). *Graph on the left: simulated air temperature (T_LASER, T_SURFEX) compared to the measurements (T_MES). Graph on the right: differences between the simulated and measured air temperature (LASER-MES, SURFEX-MES).*

Pour ce qui est de la pression partielle en vapeur d'eau de l'air (figure 12), les deux modèles donnent les mêmes résultats. Cela semble logique puisque le contenu en vapeur d'eau de l'air en ville est essentiellement dicté par l'advection. En ville, la production locale de vapeur d'eau est marginale puisqu'elle dépend des processus anthropiques et de quelques

espaces verts. La vapeur d'eau est essentiellement importée par la masse d'air en mouvement, c'est-à-dire qu'elle provient du forçage fourni par Méso-NH. Cela explique largement la similarité des résultats obtenus par les deux schémas de surface. Les erreurs-types sont de 1,39 et 1,34 hPa respectivement.

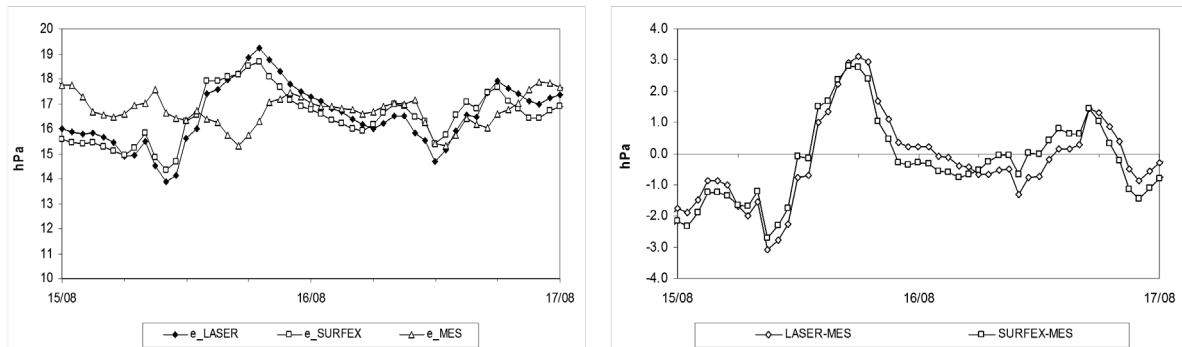
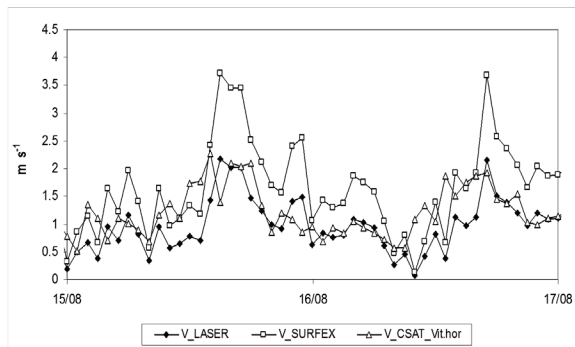


Figure 12 : Graphique de gauche : pression partielle en vapeur d'eau de l'air obtenue par les modèles (e_{LASER} , e_{SURFEX}) comparée à celle qui a été mesurée (e_{MES}). Graphique de droite : écarts constatés entre la pression partielle en vapeur d'eau de l'air simulée et mesurée ($LASER-MES$, $SURFEX-MES$). *Graph on the left: simulated air vapor pressure (e_{LASER} , e_{SURFEX}) compared to the measurements (e_{MES}). Graph on the right: differences between the simulated and measured air vapor pressures ($LASER-MES$, $SURFEX-MES$).*

En ce qui concerne la vitesse du vent simulé dans la rue (figure 13), LASER/F fait un peu mieux que SURFEX qui a tendance à surestimer légèrement la vitesse dans la maille.

Figure 13 : Vitesse du vent obtenue par les modèles (V_{LASER} , V_{SURFEX}) comparée à celle qui a été mesurée ($V_{CSAT_Vit.hor.}$). *Simulated wind speed (V_{LASER} , V_{SURFEX}) compared to the measurements ($V_{CSAT_Vit.hor.}$).*



Les analyses qui viennent d'être réalisées dans cette section démontrent clairement que LASER/F est capable de soutenir la comparaison avec SURFEX. Ces résultats confirment la cohérence et la solidité de la chaîne de simulation. Chaque modèle remplit ses objectifs. LASER/F est aussi bon, voire meilleur que SURFEX dans certains cas. Cet avantage est sans doute dû à l'introduction de la géométrie 3D qui rapproche davantage LASER/F de la réalité du terrain. La forme des objets, leur disposition et les relations avec leur environnement y sont mieux reproduites. C'est un atout quand on cherche à étudier avec précision les processus qui peuvent se produire au sein des quartiers d'une ville. La complexité de la configuration géométrique réelle dépasse les paramétrisations qui sont utilisées dans des modèles comme SURFEX.

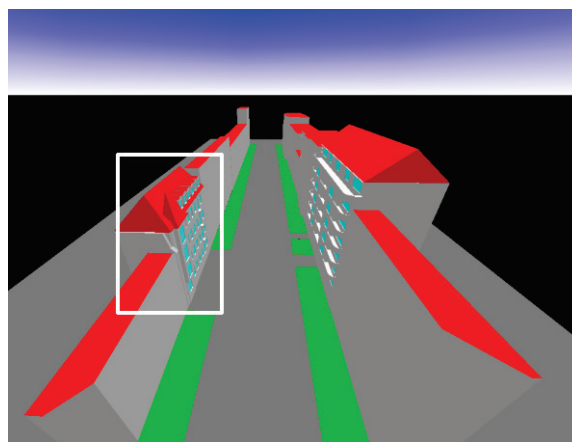
3. L'apport de la simulation à haute résolution en géométrie 3D

Dans la section précédente, nous avons montré que l'intégration de LASER/F dans la chaîne de simulation pouvait se faire assez facilement et sans perte de qualité au niveau du quartier. Ces bonnes performances ne justifient pas pour autant pleinement l'utilisation de ce

type de modèle comme un maillon de modélisation supplémentaire systématique. Si on se contente de données moyennes par quartiers, on peut se satisfaire des informations fournies par le schéma de surface de méso-échelle qui arrive à reproduire correctement les processus urbains. Dans cette optique, il est inutile de s'encombrer avec un modèle supplémentaire. L'intérêt du maillon additionnel réside dans le fait qu'il apporte des informations inédites et des détails à un niveau fin, qui ne sont pas accessibles par la modélisation de méso-échelle. L'originalité de ces informations découle forcément de l'usage de la géométrie en 3D. Grâce à la 3D, le modèle de micro-échelle apporte trois avantages : (i) il est plus précis ; (ii) il respecte mieux la réalité du terrain ; (iii) il permet vraiment de focaliser sur un objet particulier. D'abord, il n'y a que le modèle de micro-échelle qui puisse atteindre des résolutions de quelques mètres (ou moins) en zone urbaine. Or, ce type de précision est nécessaire dans certains cas : par exemple quand on veut étudier l'ambiance climatique d'une place, l'impact des ombres portées des bâtiments ou celui des plantations d'arbres au bord des rues. Ensuite, ce type de modèle reproduit très fidèlement l'agencement urbain, l'orientation des rues, la forme des bâtiments, ce qui lui permet de gagner en réalisme et apporte un gain qualitatif supplémentaire. Du fait de la gestion des éléments de la scène, il est possible de s'intéresser à un élément particulier, comme une toiture, une façade ou une fenêtre et obtenir les résultats pour cet élément.

Grâce à un travail préliminaire réalisé il y a plusieurs années par Ringenbach (2004), notre équipe dispose de la géométrie en 3D schématique d'une rue de Strasbourg (figure 14). Cette scène montre qu'il est tout à fait possible de focaliser la simulation de micro-échelle sur un endroit précis (en l'occurrence une seule rue). Cette configuration géométrique de base présente une combinaison variée de bâtiments jointifs, d'une route et des espaces verts latéraux.

Figure 14 : Modèle 3D simplifié de la rue de l'Argonne à Strasbourg. Deux immeubles ont été reconstitués avec plus de précision (ils possèdent leurs fenêtres, une toiture en pente et des balcons). La chaussée au centre de la rue est encadrée par des bandes d'herbes. *3D simplified model of the Argonne street at Strasbourg. Two buildings are reconstructed more precisely (with windows, inclined roofs and balconies). Grass strips are placed at the foot of buildings.*

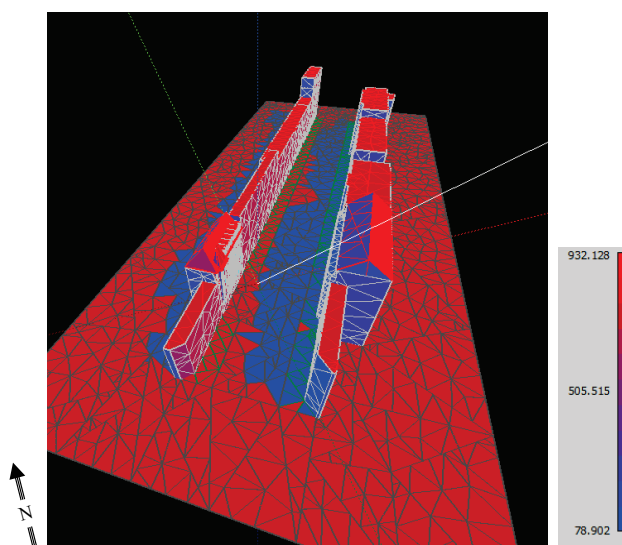


C'est une disposition qui imite le canyon cher à la climatologie urbaine. Dans ce canyon, la plupart des bâtiments sont représentés très schématiquement par des volumes simplifiés (toits plats, pas de vitres, volume géométrique de forme pavée). Cependant, le travail mené par Boeters *et al.* (2012) a permis de compléter cette géométrie en reconstituant plus précisément deux bâtiments (que nous appellerons N°10 et N°13). Ces deux bâtiments possèdent des formes réalistes pour leurs façades principales et leur toit. On note notamment l'ajout de fenêtres et de balcons. Ce domaine de simulation peut être forcé sans problème par les conditions météorologiques obtenues au-dessus du niveau des toits par un modèle méso-météorologique. C'est ce qui a été fait avec les données de la simulation Mésos-NH pour la période du 13 au 19 août 2002.

LASER/F est capable de prédire exactement ce qui se passe en n'importe quel point de son domaine de simulation, avec une résolution inférieure au mètre carré si cela s'avère

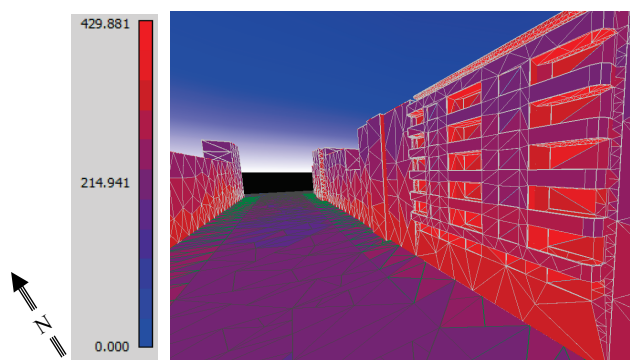
nécessaire. Toutes les surfaces présentes dans le domaine peuvent être fragmentées en petits triangles dont on peut préciser la superficie. Le bilan d'énergie est calculé en détail pour chacun de ces triangles. C'est ce processus de fragmentation qui détermine la résolution spatiale finale. Comme l'ont démontré Kastendeuch *et al.* (2006), ainsi que Kastendeuch et Najjar (2009), cette précision spatiale permet de calculer finement tous les échanges radiatifs à l'œuvre sur tous les éléments de la scène et dans les différentes longueurs d'onde (solaire et infrarouge). Ceci avec d'autant plus de réalisme que les obstacles liés aux infrastructures urbaines (effet de masque) sont pleinement pris en compte. Le module de visualisation intégré à LASER/F permet d'illustrer cette capacité par quelques images. La figure 15 montre le rayonnement solaire incident (direct + diffus) reçu dans le canyon le 16 août 2002 à 9h52 du matin. Les façades qui sont éclairées ou à l'ombre sont facilement identifiables. L'ombre portée des bâtiments s'étend dans la rue (le soleil se situe à l'est).

Figure 15 : Rayonnement solaire incident (direct + diffus, en $W m^{-2}$) dans un canyon urbain. Résultat pour la rue de l'Argonne le 16/08/2002 à 9h52. La position du soleil dans le ciel est indiquée par la ligne blanche (vers la droite). L'ombre portée des bâtiments est nettement visible dans la rue. *Incident solar radiation (direct + diffuse, $W m^{-2}$) into a urban canyon. Result for the Argonne street, the 16th of August 2002 at 9:52. The solar position is shown with the white line. The shadows of the buildings is clearly visible into the street.*



On voit bien que tous les calculs d'éclairement ont été effectués pour une résolution minimale dictée par les petits triangles qui couvrent le domaine de simulation. C'est ce qui donne une limite irrégulière aux ombres sur le sol. La figure 16 illustre les échanges radiatifs qui s'opèrent aux environs de minuit dans l'infrarouge thermique entre les éléments de la rue. Il s'agit du rayonnement infrarouge reçu sur les éléments et qui provient de la surface terrestre par les processus d'inter-réflexion et d'inter-émission (le rayonnement infrarouge atmosphérique est exclu). Comme l'indique l'échelle de couleurs, l'énergie reçue sous cette forme implique des quantités importantes allant jusqu'à $420 W m^{-2}$. Plus les objets sont proches et se font face et plus l'énergie reçue augmente. Cette figure démontre clairement le rôle que peut jouer la géométrie urbaine dans les échanges d'infrarouge en ville et l'intérêt de les simuler à haute résolution.

Figure 16 : Rayonnement infrarouge thermique incident (en $W m^{-2}$) provenant de la surface terrestre par les processus d'inter-réflexion et d'inter-émission entre éléments au sol. Résultat pour la rue de l'Argonne le 16/08/2002 à 23h52. *Infrared thermal radiation ($W m^{-2}$) exchanged into a urban canyon. Result for the Argonne street, the 16th of August 2002 at 23:52.*



Comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, LASER/F possède un module qui simule l'ambiance climatique à l'intérieur de chaque bâtiment. Même si cela reste encore très expérimental et rudimentaire, ce module permet à chaque bâtiment de réagir individuellement par rapport à ses propres contraintes externes, à son isolation thermique, sa structure et sa configuration. C'est un avantage par rapport aux modèles qui simulent le comportement des bâtiments de manière absolument identique. Ici, chaque bâtiment possède sa propre température et son humidité intérieure, en fonction de son usage (habitat, commercial, utilitaire) et de son système de climatisation et de chauffage. Grâce à quoi, on peut s'intéresser à un bâtiment précis. A titre d'exemple, la figure 17 montre les différentes températures simulées pour le bâtiment N°13, ainsi que l'énergie apportée/soustraite par le système de ventilation.

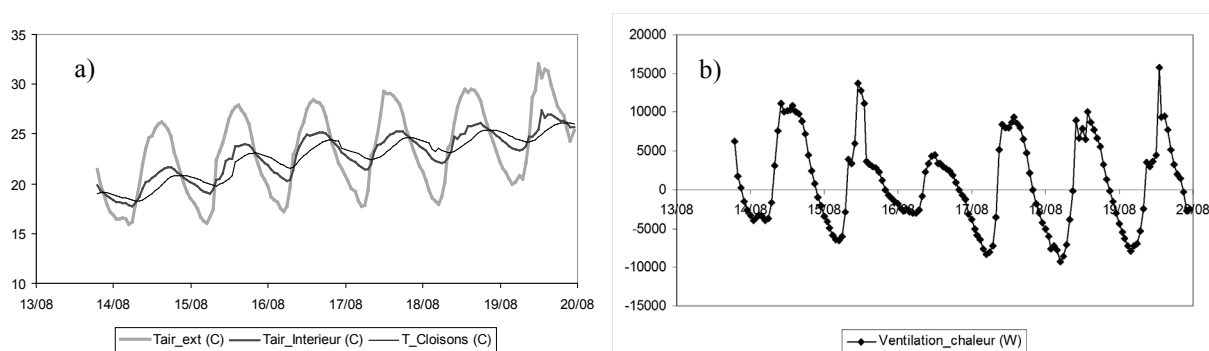


Figure 17 : a) Températures (°C) simulées dans le bâtiment N°13 de la rue de l'Argonne ; b) énergie (W) gagnée (valeurs positives) ou perdue (valeurs négatives) par l'air intérieur du fait de la ventilation (naturelle et mécanique) du bâtiment. *a) Temperatures (°C) simulated for the building N°13 of the Argonne Street ; b) energy (W) gained (positive values) or lost (negative values) by the air inside of the building due to the ventilation (natural or artificial) of the building.*

D'abord, les cloisons qui forment la structure interne du bâtiment possèdent la température qui présente l'inertie la plus élevée (figure 17a). C'est normal, puisque cet élément symbolise les planchers et les cloisons qui séparent les pièces et qu'il possède une masse élevée. Ensuite, on constate que l'évolution de la température de l'air intérieur possède un comportement intermédiaire entre la température de cloisons et celle de l'air extérieur. Cela montre bien le rôle joué par l'ensemble des éléments du bâtiment puisque cette température dépend de celle des cloisons, de celle de l'enveloppe du bâtiment et de celle de l'air extérieur *via* la ventilation. L'impact du système de ventilation sur la température de l'air intérieur peut même être évalué précisément (figure 17b). L'introduction d'air chaud extérieur initie l'augmentation des températures de l'air intérieur en journée, tandis que l'introduction d'air extérieur froid induit une baisse nocturne. Parallèlement aux températures, la quantité de vapeur d'eau présente dans le bâtiment est également évaluée. Dans cette version simpliste, on fait l'hypothèse que les sources internes de vapeur d'eau sont négligeables et que toute l'humidité provient de l'extérieur. Cette hypothèse est critiquable et devra être remplacée par une solution plus réaliste dans le futur. Pour ces quelques journées de simulation, on voit que la vapeur d'eau est en augmentation progressive au fil des jours (figure 18a).

En réalité, elle suit la tendance générale imprimée par l'air extérieur dont le contenu en vapeur augmente. Par contre, il est intéressant de constater que l'humidité relative baisse dans le bâtiment sur la même période (figure 18b). Cela paraît logique puisque la température de l'air intérieur augmente assez fortement au fil des jours. Ce genre de données convient bien pour des études de confort thermique et pourrait être utilisé pour obtenir des indices bioclimatiques.

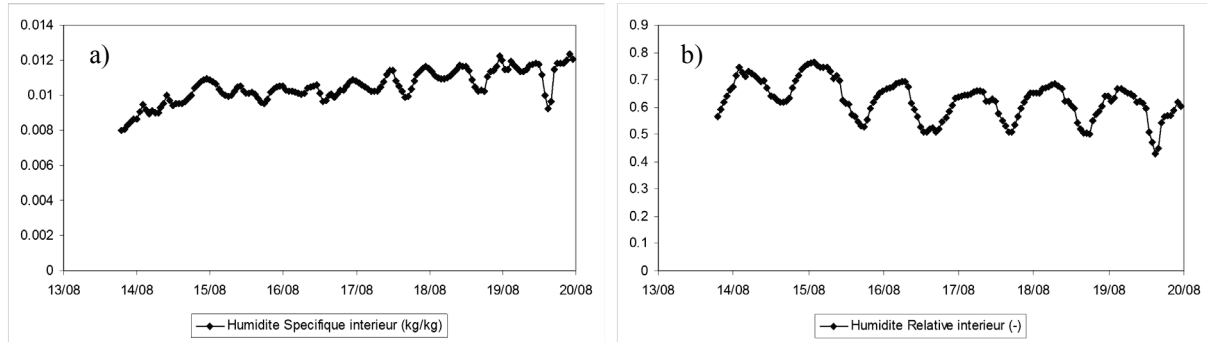
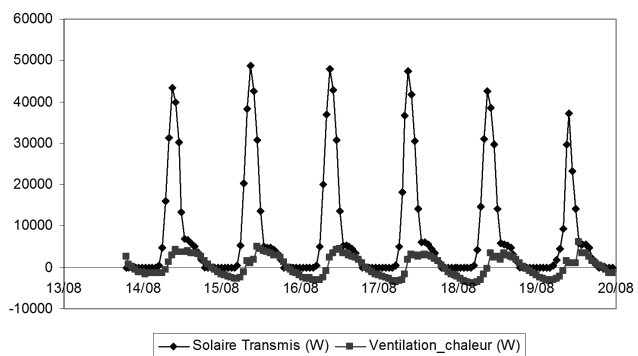


Figure 18 : a) Humidité spécifique (kg kg^{-1}) simulée dans le bâtiment N°13 ; b) Humidité relative correspondante (0-1). a) *Specific humidity (kg kg^{-1}) simulated for the air inside of the building N° 13;* b) *relative humidity (0-1).*

LASER/F sait tenir compte des ouvertures dans les façades des immeubles. C'est très important quand on sait qu'une façade opaque ne peut conduire son énergie que par conduction thermique, ce qui est un processus assez lent. Or la présence des fenêtres change la donne, puisque ces dernières sont capables de transmettre rapidement une quantité non négligeable d'énergie solaire directement dans les pièces. Cela représente un gain thermique important, surtout lorsque la fenêtre reçoit du rayonnement solaire direct. Dans le modèle, l'énergie du rayonnement solaire qui traverse la vitre est transférée intégralement vers les cloisons internes. Cet apport d'énergie sert à chauffer ces cloisons. A titre d'exemple, prenons le cas du bâtiment N°10 (situé dans le rectangle blanc de la figure 14) dont la façade vitrée fait face au sud-est et reçoit du rayonnement solaire direct uniquement le matin. Lorsque cette façade est exposée au soleil (donc le matin), elle laisse passer une très grande quantité de rayonnement solaire (jusqu'à 50000 W, figure 19).

Figure 19 : Energie solaire transmise (en W) à l'intérieur de la structure par les vitres de la façade du bâtiment N°10. L'énergie apportée (soustraite) par la ventilation est représentée à titre de comparaison (W). *Solar energy transmitted (W) into the building by the windows of the building N°10. The energy gained and lost due to the ventilation is presented for comparison.*



Ce rayonnement qui pénètre dans les pièces est composé essentiellement de rayonnement solaire direct, d'un peu de rayonnement atmosphérique diffus et des réflexions dans la rue. La preuve en est que l'après-midi, lorsque la façade ne voit plus le soleil, les vitres continuent à laisser passer du rayonnement (réfléchi et diffus atmosphérique), mais pour une valeur dix fois moindre (soit 5000 W environ). L'énergie qui est apportée par ces seules ouvertures est largement supérieure (le matin) ou éventuellement du même ordre de grandeur (l'après-midi) que ce qu'apporte la ventilation. Cependant, contrairement à la ventilation, cette énergie radiative ne chauffe pas directement l'air intérieur mais est transférée sur les cloisons (donc sert à chauffer la structure interne du bâtiment).

En rajoutant les fenêtres dans les bâtiments, à leur emplacement réel, avec la forme adéquate et en respectant les superficies, on améliore certainement le calcul des températures

internes, mais aussi celle des façades, surtout en journée. Reprenons l'exemple de la façade vitrée du bâtiment N°10. Les températures de surface obtenues le 8 août à 8h52 du matin (le soleil est en face), montrent que la température des vitres est comprise entre 22 et 23 degrés, alors que celle du reste de la façade est comprise entre 25 et 35 degrés et que certains éléments du toit sont à plus de 40 degrés (figure 20, partie gauche).

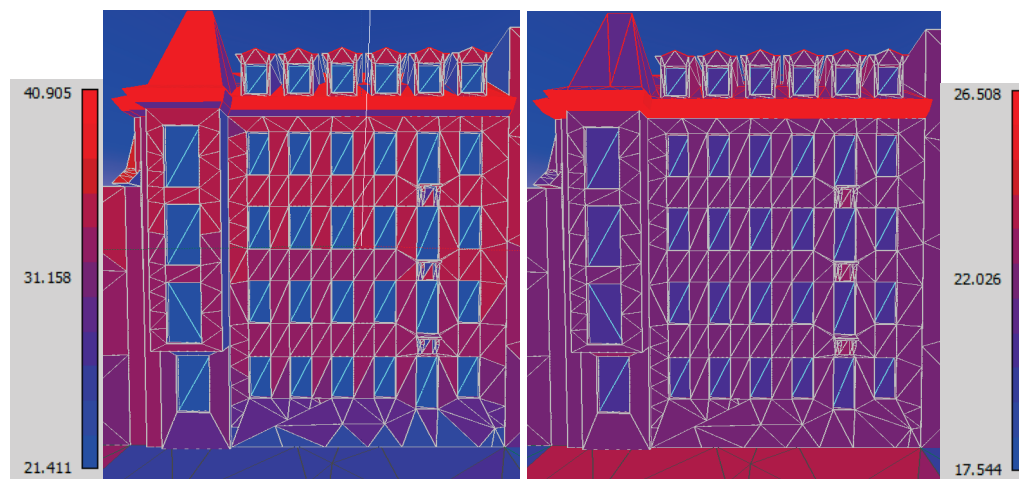
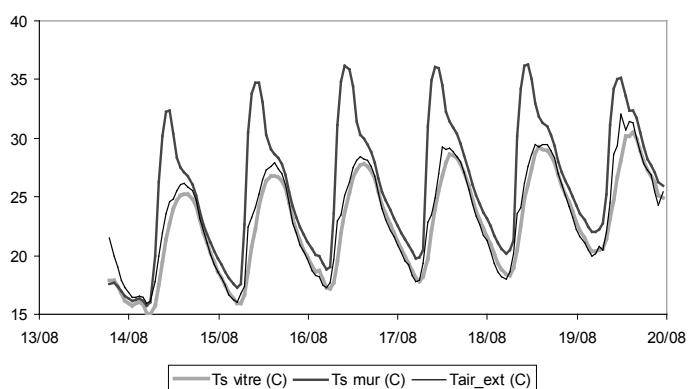


Figure 20 : Températures de surface de la façade du bâtiment N°10 lorsqu'elle est pleinement éclairée par le soleil du matin (18 août à 8h52, à gauche) et durant la nuit (19 août à 3h52 du matin, à droite). *Surface temperature of the building N°10 when it is illuminated by the sun during the morning (8:52, to the left) and during the night (3:52, to the right).*

Les vitres apparaissent comme des zones plus fraîches que le reste de la façade. La nuit, le contraste est moins élevé et les températures de surface du bâtiment s'homogénéisent (figure 20, partie droite). Les vitres sont à 20 ou 21°C et les murs à 22°. Chose intéressante, la température de surface d'une vitre suit à peu près la même cinétique que celle de l'air extérieur (figure 21), alors que ce n'est absolument pas le cas de la température de surface du mur au même niveau. En conséquence logique, le flux de chaleur sensible entre l'air et ces deux types de surfaces est complètement différent et le rôle des vitres devient essentiel. En rajoutant ou en supprimant des ouvertures il devient possible de faire de la prospective.

Figure 21 : Températures de surface de quelques éléments de la façade du bâtiment N°10. *Surface temperature of some facade elements of the building N°10.*



Ces quelques exemples montrent à quel point le modèle de micro-échelle peut apporter des informations précises, concrètes et inédites sur des zones précises d'une ville, voire même concernant certains objets (routes, bâtiments, pelouses). Ces informations peuvent se révéler utiles pour certaines applications spécifiques comme l'énergétique des bâtiments ou l'aménagement urbain : à condition qu'elles se révèlent fiables. C'est pourquoi la validation des modèles abordée en section 2 revêt autant d'importance.

Conclusion

Cet article montre qu'en exploitant les potentialités des différents types de modèles météorologiques existants, il est possible de mettre au point une chaîne de modélisation cohérente pour simuler le milieu urbain. Les réanalyses du CEPMMT d'une résolution de 16 km fournissent les conditions aux limites pour le modèle méso-météorologique qui est capable d'atteindre des résolutions de quelques centaines de mètres (Méso-NH). Les simulations menées par notre équipe et celles de bon nombre d'autres auteurs indiquent que cette résolution est déjà suffisamment correcte pour simuler l'impact de très grandes agglomérations sur les basses couches de l'atmosphère ou pour obtenir l'îlot de chaleur urbain. Avec de telles résolutions, ces modèles sont même capables de différencier les différents quartiers de la ville. Ces performances sont essentiellement dues à l'adjonction d'un schéma de surface qui complète le modèle atmosphérique (dans le cas de Méso-NH il s'agit de SURFEX). Ce schéma de surface est chargé de reproduire les interactions entre le sol et l'atmosphère et tous les processus physiques qui en découlent, pour tous les milieux terrestres.

Cependant, les hypothèses qui sont faites, pour que SURFEX puisse travailler avec la même résolution que Méso-NH, ne lui permettent pas de gagner encore en précision. Pour y parvenir, et pour distinguer ce qui se passe dans le quartier, dans certaines rues ou pour certains bâtiments, il faut utiliser d'autres modèles. C'est pourquoi, cette chaîne de simulation a été complétée par un modèle de micro-échelle capable de calculer le bilan d'énergie à très haute résolution. Les sorties du modèle méso-météorologique fournissent les conditions aux limites pour le modèle LASER/F qui va simuler les interactions sol-atmosphère au sein de la ville avec une résolution de l'ordre du mètre. Cet article a permis de démontrer la faisabilité de l'ensemble de cette démarche. La chaîne de simulation a été testée sur la ville de Strasbourg. Les résultats obtenus à tous les échelons de cette chaîne sont cohérents et ont été validés par rapport à des mesures de terrain. Le modèle de micro-échelle s'intègre pleinement dans ce processus et ses résultats sont encourageants. Le couplage s'avère réalisable et la géométrie 3D apporte des informations détaillées capables d'intéresser une large gamme d'utilisateurs.

Références bibliographiques

- BOETERS R., DONKERS S., LEE D., LIEM V., MONTAZERI S., VAN OOSTVEEN J., PIETRZYK P., 2012 : *The effect of 3D geometry complexity on simulating radiative, conductive and convective fluxes in an urban canyon*. Geomatics Synthesis Project, TU Delft, 146 p.
- BRUSE M., FLEER H., 1998 : Simulating Surface-Plant-Air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Software and Modelling*, 13, 373-384.
- COIFFIER J., 2009 : *Les bases de la prévision numérique du temps*. Météo-France, Cours et manuels n°18, 258 p.
- CRASSIER V., SUHRE K., TULET P., ROSSET R., 2000 : Development of a reduced chemical scheme for use in mesoscale meteorological models. *Atmospheric Environment*, 34, 2633-2644.
- DUPONT S., MESTAYER P., 2006 : Parameterization of the Urban Energy Budget with the Submesoscale Soil Model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45, 1744-1765.

- FAROUX F., KAPTUÉ TCHUENTÉ A.T., ROUJEAN J.-L., MARTIN E., MASSON V., LE MOIGNE P., 2013 : ECOCLIMAP-II/Europe: a twofold database of ecosystems and surface parameters at 1-km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models. *Geoscientific Model Development*, 6, 563-582.
- GALLAGHER J., GILL L.W., MCNABOLA A., 2012 : Numerical modelling of the passive control of air pollution in asymmetrical urban street canyons using refined mesh discretization schemes. *Building and Environment*, 56, 232-240.
- HIDALGO J., PIGEON G., MASSON V., 2008a : Urban-breeze circulation during the CAPITOUL experiment: observational data analysis approach. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102(3-4), 223-241.
- HIDALGO J., MASSON V., PIGEON G., 2008b : Urban-breeze circulation during the CAPITOUL experiment: Numerical approach. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102(3-4), 243-262.
- HIDALGO J., MASSON V., GIMENO-PRESA L., 2010 : Scaling the daytime urban breeze circulation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(5), 889-901.
- HUANG Y., HU X., ZENG N., 2009 : Impact of wedge-shaped roofs on airflow and pollutant dispersion inside urban street canyons. *Building and Environment*, 44, 2335-2347.
- KASTENDEUCH P.P., 2012 : *Local energy balance*. In solar Energy at urban scale (119-138), Benoit Beckers (ed.), Willey-ISTE, 384 p.
- 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., LACARRERE P., COLIN J., 2010 : Modélisation de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg. *Climatologie*, 7, 21-36.
- KASTENDEUCH P.P., NAJJAR G., RINGENBACH N., 2006 : Modélisation du bilan radiatif et d'énergie d'un canyon urbain à Strasbourg, *Climatologie*, 3, 25-42.
- KUSAKA H., KONDO H., KIKEGAWA Y., KIMURA F., 2001 : A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and SLAB models. *Boundary-Layer Meteorology*, 101, 329-358.
- LAFORE J.P., STEIN J., ASENCIO N., BOUGEAULT P., DUCROCQ V., DURON J., FISCHER C., HEREIL P., MASCART P., PINTY J. P., REDELSPERGER J.L., RICHARD E., VILA-GUERAU DE ARELLANO J., 1998 : The Meso-NH Atmospheric Simulation System. Part I: Adiabatic formulation and control simulations. *Annales Geophysicae*, 16, 90-109.
- LEMONSU A., BASTIN S., MASSON V., DROBINSKI P., 2006 : Vertical Structure of the Urban boundary layer over Marseille under sea breeze condition. *Boundary-Layer Meteorology*, 118, 477-501.
- MASSON V., 2000 : A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-layer Meteorology*, 94, 357-397.
- MASSON V., 2006 : Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. *Theoretical and Applied Climatology*, 84, 35-45.
- MASSON V., CHAMPEAUX J.-L., CHAUVIN C., MERIGUET C., LACAZE R., 2003 : A global database of land surface parameters at 1 km resolution for use in meteorological and climate models. *Journal of Climate*, 16, 1261-1282.

- MASSON V., GRIMMOND C.S.B., OKE, T.R., 2002 : Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) scheme with direct measurement from dry districts in two cities. *Journal of Applied Meteorology*, 41, 1011-1026.
- MASSON V., LION Y., PETER A., PIGEON G., BUYCK J., BRUN E., 2013a : Grand Paris: regional landscape change to adapt city to climate warming. *Climate Change*, 117, 769-782.
- MASSON V., LE MOIGNE P., MARTIN E., FAROUX S., ALIAS A., ALKAMA R., BELAMARI S., BARBU A., BOONE A., BOUYSSSEL F., BROUSSEAU P., BRUN E., CALVET J.-C., CARRER D., DECHARME B., DELIRE C., DONIER S., ESSAOUINI K., GIBELIN A.-L., GIORDANI H., HABETS F., JIDANE M., KERDRAON G., KOURZENEVA E., LAFAYSSSE M., LAFONT S., LEBEAUPIN BROSSIER C., LEMONSU A., MAHFOUF J.-F., MARGUINAUD P., MOKHTARI M., MORIN S., PIGEON G., SALGADO R., SEITY Y., TAILLEFER F., TANGUY G., TULET P., VINCENDON B., VIONNET V., VOLDOIRE A., 2013b : The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of Earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development*, 6, 929-960.
- MATZARAKIS A., RUTZ F., MAYER H., 2007 : Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 51, 323-334.
- MIGUET F., GROLEAU D., 2002 : A daylight simulation tool for urban and architectural spaces. An application to transmitted direct and diffuse light through glazing. *Building and Environment*, 37, 8-9, 833-843.
- NAJJAR G., KASTENDEUCH P.P., STOLL M.P., COLIN J.R., NERRY F., RINGENBACH N., BERNARD J., DE HATTEN A., LUHAHE R., VIVILLE D., 2004 : Le projet RECLUS, télédétection, rayonnement et bilan d'énergie en climatologie urbaine à Strasbourg. *La Météorologie*, 46, 44-50.
- OOKA R., 2007 : Recent development of assessment tools for urban climate and heat-island investigation especially based on experiences in Japan. *International Journal of Climatology*, 27, 1919-1930.
- RINGENBACH N., 2004 : *Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur Strasbourg*. Thèse de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 166 p.
- ROZOFF C.M., COTTON W.R., ADEGOKE J.O., 2003 : Simulation of St. Louis, Missouri, land use impacts on thunderstorms. *Journal of Applied Meteorology*, 42, 716-738.