



HAL
open science

Modélisation du bilan radiatif et d'énergie d'un canyon urbain à Strasbourg

Pierre Kastendeuch, Georges Najjar, Nicolas Ringenbach

► **To cite this version:**

Pierre Kastendeuch, Georges Najjar, Nicolas Ringenbach. Modélisation du bilan radiatif et d'énergie d'un canyon urbain à Strasbourg. *Climatologie*, 2006, 3, pp.25-42. 10.4267/climatologie.677. hal-03926481

HAL Id: hal-03926481

<https://hal.science/hal-03926481>

Submitted on 6 Jan 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SOMMAIRE (Summary)

Avant-propos <i>Foreword</i>	5
Hommages <i>Homage</i>	7
Volume 3 (2006)	
Hervé QUENOL et Gérard BELTRANDO	9
IMPACT DES HAIES BRISE-VENT SUR LE GEL PRINTANIER EN ARBORICULTURE. <i>Impact of shelterbelt on spring frost in arboriculture.</i>	
Pierre KASTENDEUCH, Georges NAJJAR et Nicolas RINGENBACH	25
MODELISATION DU BILAN RADIATIF ET D'ENERGIE D'UN CANYON URBAIN A STRASBOURG. <i>Radiation and energy balance simulation of an urban canyon at Strasbourg city.</i>	
Daniel ROUSSEAU	43
SURMORTALITÉ DES ÉTÉS CANICULAIRES ET SURMORTALITÉ HIVERNALE EN FRANCE. <i>Heat waves related mortality and excess winter mortality in France.</i>	
Rémi LHOTELLIER	55
SPATIALISATION DE LA TEMPERATURE MINIMALE DE L'AIR A ECHELLE QUOTIDIENNE SUR QUATRE DEPARTEMENTS ALPINS FRANÇAIS. <i>Spatialization of daily minimum air temperature on four French alpine departments.</i>	
Volume 4 (2007)	
Konstantia TOLIKA, Panagiotis MAHERAS, Margaritis VAFIADIS et Christina ANAGNOSTOPOULOU ...	73
COMPARAISON DE DEUX SCENARIOS (STATISTIQUE ET DYNAMIQUE) CONCERNANT LES PRECIPITATIONS HIVERNALES EN GRECE. <i>Comparison of two scenarios (statistical and dynamical) for the estimation of the future changes of precipitation in Greece.</i>	
Caroline NORRANT	91
RELATIONS ENTRE LE NIVEAU DU GEOPOTENTIEL 500 HPA DE L'HEMISPHERE NORD ET LES PRECIPITATIONS DU BASSIN MEDITERRANEEN (1950-2000). <i>Relationships between the North hemisphere 500hPa geopotential height and the rainfall in the Mediterranean Basin (1950-2000).</i>	
Taoufik El MELKI	105
INVERSIONS THERMIQUES ET CONCENTRATIONS DE POLLUANTS ATMOSPHERIQUES DANS LA BASSE TROPOSPHERE DE TUNIS. <i>Temperature inversions and atmospheric pollution concentrations in the low troposphere of Tunis.</i>	
Florent RENARD et Jacques COMBY	131
CARACTERISATION DE L'ALEA PLUVIOMETRIQUE EN MILIEU URBAIN A PARTIR D'INTERPOLATIONS SPATIALES : LE CAS DU GRAND LYON. <i>Characterisation of rainfall events in urban area by spatial interpolation: the case of the Greater Lyon.</i>	
Jonathan MUSEREAU, Hervé REGNAULD et Olivier PLANCHON	145
VULNERABILITE AUX TEMPETES DES DUNES LITTORALES : DEVELOPPEMENT D'UN MODELE DE PREDICTION DU DOMMAGE A TRAVERS L'EXEMPLE DE SAINT-TROJAN (ILE D'OLERON, FRANCE). <i>The vulnerability of coastal dunes to storms: the case study of Saint-Trojan (Isle of Oléron, France).</i>	
Fernand AVILA	167
CLIMAT LOCAL, CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET IMPACT ECONOMIQUE : TRENTE SIX ANS D'OBSERVATIONS METEOROLOGIQUES A AIRE-SUR-L'ADOUR. <i>Climate, climate change and economic impact : Thirty six years observations weather at Aire-sur-l'Adour.</i>	

MODELISATION DU BILAN RADIATIF ET D'ENERGIE D'UN CANYON URBAIN A STRASBOURG

Pierre KASTENDEUCH¹, Georges NAJJAR², Nicolas RINGENBACH²

¹ Centre de Géochimie de la Surface (UMR 7517 ULP/CNRS),
1 rue Blessig, 67084 Strasbourg CEDEX, France
E-mail: kastendeuch@equinoxe.u-strasbg.fr

² Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection (UMR 7005 ULP/CNRS)
Pole API, B.P. 10413, 67412 Illkirch CEDEX, France

Résumé

Dans un environnement complexe, comme une zone urbaine, le microclimat est essentiellement gouverné par les échanges d'énergie locaux. Ces échanges se font sous forme de rayonnement (dans le domaine des courtes longueurs d'onde et de l'infrarouge essentiellement) ou sous forme de flux de chaleur dans le sol (conduction) ou encore par convection (flux de chaleur sensible) ou évapotranspiration. Cet article présente le modèle LASER/F qui a été mis au point pour simuler les échanges d'énergie dans ces environnements. Les deux premières parties de l'article décrivent les conditions de la simulation, et la façon dont la géométrie et les matériaux sont représentés dans le modèle. Dans les troisièmes et quatrièmes parties, les problèmes liés aux échanges radiatifs sont abordés. Ceux-ci sont légèrement différents en fonction de la longueur d'onde et de la composante considérée. Ainsi le rayonnement solaire nécessite de connaître la position précise du soleil à chaque instant, et l'atmosphère doit être considérée comme une source non isotrope de rayonnement diffus. Les effets de masque, les réflexions multiples sur les objets ou les transparences peuvent aussi intervenir. Les algorithmes radiatifs de l'infrarouge s'inspirent de ceux qui ont été mis au point pour le solaire, avec l'anisotropie du ciel en moins. La principale difficulté pour l'infrarouge est l'obtention de températures de surface réalistes. Cette condition ne peut être satisfaite sans modéliser les autres flux du bilan d'énergie qui sont évoqués dans les deux dernières parties. Ce modèle a été confronté à un jeu de données acquis lors de la campagne expérimentale RECLUS qui s'est déroulée à Strasbourg durant l'été 2002. Ainsi, lorsque cela est possible, les résultats des simulations sont comparés aux mesures de terrain. Ce modèle à base physique donne de très bons résultats dans le domaine radiatif (en courte et grande longueur d'onde).

Mots clés : bilan radiatif, bilan d'énergie, climatologie urbaine, canyon urbain, modèle.

Abstract

Radiation and energy balance simulation of an urban canyon at Strasbourg city

Into a complex environment, like an urban area, the microclimate is essentially driven by the local energy exchanges. These exchanges happen by radiation (in the solar or infrared wavelength domain), under the form of soil heat flux (conduction) or by convection (sensible heat flux) or evapotranspiration. This article presents the LASER/F model designed to simulate the energy exchanges into this type of environment. The two first chapters of the article describe the simulation and how the geometry and the materials are taken into account in the model. In the third and fourth parts, the problems with the radiation exchanges are described. They are slightly different with regard to the considered wavelength. The solar radiation needs to know the exact position of the sun at each time step, and the atmosphere must be considered as an anisotropic source of diffuse radiation. The mask effect, the multiple reflections on the objects, or the transparency can also have an importance. The infrared radiation algorithms looks like the solar, except the anisotropy of the sky. For the infrared, the most important difficulty is to obtain realistic surface temperatures. This condition can only be satisfied with the simulation of the other energy balance fluxes evoked in the last two parts of the article. This simulation model is judge against a data set acquired during the RECLUS experimental campaign that took place at Strasbourg during summer 2002. When possible, the simulations results are compared to the data field. It appears that this physical based model gives good results for the radiation domain (short and long wavelengths).

Keywords: radiation balance, energy balance, urban climatology, urban canyon, model.

Introduction

En climatologie, il s'avère de plus en plus nécessaire de modéliser les échanges d'énergie à l'interface sol-plante-atmosphère (consulter l'article de synthèse paru sur le sujet par Pitman,

2003 ou encore celui de Arnfield, 2003). En effet, la partie inférieure de l'atmosphère subit directement l'influence du sol et s'en trouve physiquement profondément transformée. Pour obtenir les meilleurs résultats, les modèles de prévision numérique du temps à échelle fine doivent reproduire aussi fidèlement que possible les contraintes exercées par le sol sur les basses couches de notre atmosphère. Les enjeux sont multiples puisque la prévision météorologique s'améliore, ce qui permet des retombées pratiques immédiates (agriculture, santé, transport, urbanisme). Pour simuler l'interaction sol-plante-atmosphère, plusieurs types de modèles peuvent être utilisés. Pour restreindre l'exposé, seuls les modèles urbains sont abordés, ce qui ne représente qu'une partie du problème. Précisons également que les modèles statistiques ou semi-empiriques (Runnalls et Oke, 2000) ainsi que les modèles réduits à base de maquettes (Oke, 1981 ; Mills, 1997a ; Spronken-Smith et Oke, 1999 ; Kastner-Klein et Federovich, 2001 ; Pearlmutter *et al.*, 2005) ne seront pas évoqués. Il est possible de distinguer trois classes de modèles numériques à bases physiques, en fonction de l'échelle de travail et/ou de la manière dont ils tiennent compte du sol. S'il faut simuler le comportement d'une ville dans son ensemble, il est préférable d'employer des modèles qui travaillent avec des mailles. Ceux-ci vont paramétrer la surface urbaine présente dans chaque maille par une série de variables (comme une longueur de rugosité, un albédo, etc). La logique générale consiste à considérer les mailles comme étant composées d'un pourcentage de plusieurs types d'occupation du sol (prairie, forêt, ville, eau, ...) pour lesquels on va simuler les interactions entre le sol et l'atmosphère par des algorithmes spécifiques à chaque milieu. Cette approche est très utile quand il est nécessaire de faire le couplage avec des modèles atmosphériques dont la résolution est kilométrique ou hectométriques et qui exigent un forçage de surface réaliste. Ces modèles permettent aussi de simuler l'influence de la ville sur son environnement. On les désigne d'ailleurs par les termes « schéma de surface », à l'exemple de « *Town Energy Budget* » qui a été mis au point à Météo-France (Masson, 2000). Les recherches dans ce domaine se sont intensifiées ces dernières années et les propositions se multiplient (voir par exemple Kusaka *et al.*, 2001 ; Dupont et Mestayer, 2006). En effet, l'augmentation actuelle de la résolution spatiale des modèles atmosphérique accroît la complexité des schémas de surface qui doivent explicitement intégrer l'espace urbain.

A une échelle plus fine, des modèles un peu plus réalistes peuvent être utilisés. Contrairement aux schémas de surface précédents, ils reposent sur une description plus détaillée de la géométrie et ne travaillent pas par mailles. Dans le domaine de la ville, ils s'inspirent surtout du concept de canyon urbain (Mills, 1993 ; Sakakibara, 1996 ; Arnfield et Grimmond, 1998). Le plus souvent, l'environnement urbain est vu comme un canyon de longueur infinie (ce qui simplifie les calculs radiatifs), composé d'une route et de deux murs, dont on spécifie les dimensions géométriques et les caractéristiques physiques. Le canyon est découpé en petites unités (patches) pour lesquelles on résout les équations de transfert. Les points faibles de cette approche tiennent au travail sur un canyon idéalisé (au plan géométrique) et au fait que les matériaux sont souvent exclusivement artificiels : on néglige l'eau et les surfaces végétales. Leur avantage, par rapport aux précédents, est une restitution assez fidèle au plan physique des processus microclimatiques.

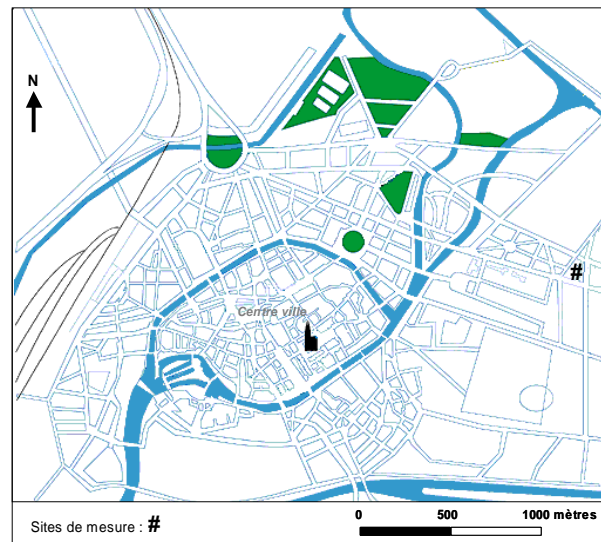
Enfin, il existe un troisième type de modèle encore plus précis. Dans cette catégorie, la géométrie urbaine est reproduite dans toute sa complexité, et chaque élément de l'environnement urbain (bâtiments, routes, arbres, ...) est introduit avec ses propres caractéristiques géométriques et thermo-physiques. Dans la pratique, on néglige cependant les détails en fonction de la puissance de calcul et des données disponibles. Ces modèles très détaillés ne peuvent pas, pour le moment, travailler à l'échelle de la ville entière. Au plan algorithmique, une difficulté supplémentaire est introduite par rapport à la catégorie précédente : elle se retrouve notamment au plan radiatif. Pour le reste, tous les processus

d'interaction entre le sol et l'atmosphère doivent y être définis pour chaque type de surface (naturelle ou artificielle). La tentative de Mills (1997b) pour simuler l'impact d'un ensemble de bâtiments urbains (cubiques) doit être soulignée. Son travail a largement inspiré ses successeurs (par exemple : De La Floor et Dominguez, 2004 ; Robitu *et al.*, 2006). Observons que ce type de modèle peut aussi s'appliquer à la simulation du comportement thermique à l'intérieur des bâtiments (Badescu et Sicre, 2003). Le modèle de recherche LAtent-Sensible-Radiative Fluxes (LASER/F), développé par l'équipe de climatologie de l'Université Louis Pasteur fait partie de cette dernière catégorie. L'objectif de cet article est double : d'une part, présenter les différents algorithmes utilisés dans LASER/F et, d'autre part, valider le modèle en confrontant les résultats d'une simulation à des mesures de terrain obtenues au cours de la campagne expérimentale RECLUS (Najjar *et al.*, 2004 ; Ringenbach, 2004).

1. Les conditions de simulation

La simulation a été réalisée sur une rue de la ville de Strasbourg au pas de temps d'un quart d'heure et pour une série de journées allant du 13 au 19 août 2002 (figures 1 et 2). Ces journées suivent une période perturbée et pluvieuse qui a rechargé la réserve utile des sols (ce qui permet à la végétation de transpirer à son maximum).

Figure 1 : Carte de localisation. *Location map.*



Si la journée des 13 et 14 sont encore soumises à quelques brefs passages nuageux, toutes les autres sont de très belles journées à nébulosité nulle. Il est important de préciser que la géométrie respecte (en la simplifiant) celle du canyon réel (figure 2) et que l'axe de la rue est orienté au nord-nord-est (azimut de 35° par rapport au nord).

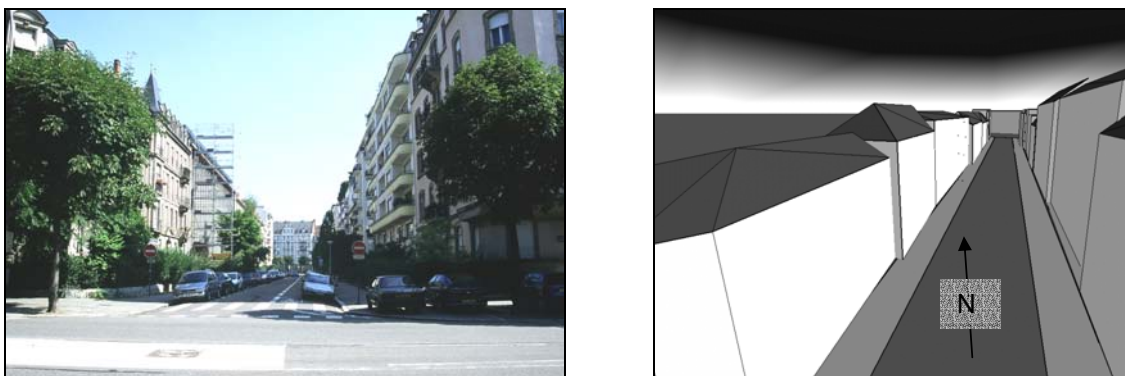


Figure 2 : La rue de l'Argonne à Strasbourg (photo et scène de simulation). *The Argonne street at Strasbourg (photo and simulation scene).*

En outre, des bandes d'herbe sont introduites de part et d'autre de la chaussée car, dans la réalité, des espaces verts latéraux de 5 m de large existent entre les trottoirs et les bâtiments. Ces espaces sont occupés à 50% par du gazon, des haies, arbustes, arbres de toutes natures et de toutes tailles (jusqu'à une dizaine de mètres de haut pour certains) et à 50%, par du sol nu (terre, gravillons, ...). Précisons encore que le canyon fait en moyenne 22 m de haut pour 24 m de large.

Pour permettre la validation des simulations, des capteurs virtuels ont été placés dans le modèle, aux emplacements occupés par les capteurs réels en 2002 (figure 3). Ces capteurs virtuels ont pour objectif de se comporter comme les capteurs réels et peuvent être de deux types :

- Les capteurs virtuels radiatifs analysent les rayonnements échangés dans la scène dans toutes les longueurs d'ondes et ceci, sur chacune de leur six faces (deux dans chaque direction d'une dimension spatiale). Dans le spectre solaire, ils fournissent le rayonnement direct, le rayonnement diffus atmosphérique, le rayonnement réfléchi par les autres objets. Dans l'infrarouge ils fournissent l'infrarouge atmosphérique et l'infrarouge terrestre (émis et réfléchi).
- Les capteurs virtuels de flux ont pour ambition d'évaluer les flux d'un ensemble de patches (flux de chaleur sensible, latente et dans le sol) par une intégration sur une certaine distance.



Figure 3 : Photographie de quelques appareils : anémomètre Sonic, bilanmètre, albedomètre... *Photography of some measurement devices: Sonic anemometer, bilanmeter, albedometer...*

Comme pour tout modèle numérique, une simulation LASER/F nécessite des données d'entrée. Celles-ci définissent les conditions aux limites qui servent de contrainte au modèle et permettent aussi de fixer les champs initiaux. La géométrie doit être fournie en trois dimensions et doit reproduire aussi fidèlement que possible la réalité, tout en la simplifiant (cf. partie 2). Il faut donc trouver un compromis acceptable entre le temps de calcul et le degré de réalisme souhaité. Chaque face qui compose les objets de la scène doit être soigneusement caractérisée par :

- ses propriétés radiatives comme l'émissivité pour l'infrarouge, sa réflectivité et sa transmissivité dans le solaire. Ces coefficients peuvent être obtenus dans des bases de données établies pour tous les matériaux de construction ou dans la littérature ;

- ses propriétés internes, comme le nombre de couches et pour chaque couche, la conductivité thermique, la capacité thermique (chaleur spécifique multipliée par la masse volumique), son épaisseur ;
- au début de la simulation, une température de surface doit être fournie, de même qu'une température profonde pour les sols, la température à l'intérieur des bâtiments et celle sur la face inférieure des feuilles (égale à celle de l'air). Ces données sont utilisées pour initialiser les températures à l'intérieur des objets (par une interpolation linéaire).

Pour chaque pas de temps il faut ensuite fournir les données suivantes (issues de mesures ou de calculs) :

- le rayonnement solaire direct reçu par une surface perpendiculaire aux rayons du soleil (rayonnement solaire direct de référence) ;
- le diffus et l'infrarouge atmosphérique reçus sur une surface horizontale en l'absence de masque (rayonnement diffus et infrarouge de référence) ;
- la température de l'air extérieur, la température de l'air dans les bâtiments, l'humidité relative extérieure, la vitesse du vent.

Certaines données annexes que nous n'énumérerons pas dans le détail (comme l'altitude de la scène, la pression atmosphérique) sont également exigées à un moment ou à un autre dans certaines équations et doivent être fournies au départ.

2. La géométrie et les matériaux

Comme tous les modèles de sa catégorie, LASER/F travaille à partir de scènes (figure 2), un terme emprunté au domaine des images de synthèse. Une scène est une transcription informatique de la réalité à l'aide d'une géométrie tridimensionnelle détaillée (autant que le permettent les relevés de terrain et/ou la puissance de calcul). L'expérience prouve que la géométrie joue un grand rôle dans le climat urbain, via les échanges radiatifs qui dépendent fortement des effets de masque, des facteurs de vue, etc (voir par exemple Terjung et O'Rourke, 1980 ; Oke, 1981 ; Aida, 1982 ; Johnson et Watson, 1984 ; Kondo *et al.*, 2001). Les scènes numériques de LASER/F sont composées de différents objets qui sont eux-mêmes constitués de différentes faces de formes variables (polygones non convexes), ce qui permet de construire des objets géométriquement très complexes. Ces faces possèdent chacune leurs propres caractéristiques (réflectivité, émissivité, ...) et peuvent être composées d'un nombre illimité de couches de matériaux différents (qui se distinguent par leur épaisseur, leur conductivité thermique, ...), ce qui autorise la représentation de tout type d'objet naturel (comme un sol) ou artificiel (comme un mur). Dans une scène, le sol est traité comme un ensemble d'objets qui matérialisent des nappes d'eau, de l'herbe, une route, etc. Une fois la scène introduite dans le modèle, toutes les faces de tous les objets sont obligatoirement fragmentées en patchs élémentaires triangulaires dont la superficie maximale peut être spécifiée par l'utilisateur. Cette tâche se fait en deux étapes : lors de la première étape, les faces sont subdivisées en triangles (en passant par un algorithme spécialisé pour les plus compliquées ; Shewchuk, 1996, 2002) ; au cours de la deuxième étape, les triangles issus de l'étape précédente sont fragmentés récursivement pour obtenir les patchs finaux. Il va de soi que ces patchs élémentaires conservent les propriétés thermo-physiques de leur face originelle. Tous les calculs dans LASER/F se font au barycentre des patchs. Cette partie géométrique du modèle, qui n'a pourtant rien à voir avec le microclimat urbain, est pourtant très importante, puisque la précision des résultats sera conditionnée par l'exactitude de la géométrie et la finesse de la fragmentation demandée.

Comme le principal moteur du microclimat urbain réside dans les transferts radiatifs qui ont lieu entre le sol et l'atmosphère, mais aussi entre les objets eux-mêmes, c'est avec une

attention particulière que le code radiatif du modèle a été écrit. Bien évidemment ces échanges peuvent se faire aussi bien en rayonnement de courte longueur d'onde (le visible, en provenance du soleil) qu'en rayonnement de grande longueur d'onde (l'infrarouge, en provenance de l'atmosphère et du sol). Les techniques pour simuler ces deux grands types d'échanges sont décrits dans ce qui suit, sans formulation mathématique complexe, en commençant par le rayonnement de courte longueur d'onde.

3. Le rayonnement solaire (ou rayonnement de courte longueur d'onde)

Si on considère un objet au sol, le rayonnement solaire incident (que l'on appelle aussi « rayonnement global ») peut avoir emprunté différents cheminements avant de parvenir à la surface de l'objet concerné :

- d'abord, il faut envisager une composante appelée « directe », qui représente le rayonnement qui provient en ligne droite du soleil sans interaction avec l'atmosphère ;
- ensuite, il faut tenir compte du rayonnement solaire diffusé au sein de l'atmosphère (par les molécules de gaz ou par les aérosols) et qui finit par arriver à la surface du sol de toutes les directions de l'hémisphère céleste ;
- enfin, une partie provient des réflexions du rayonnement solaire sur d'autres objets présents au sol.

En terme de modélisation, ces trois composantes nécessitent chacune son propre algorithme. Pour simuler correctement le rayonnement solaire direct, mais aussi le diffus atmosphérique reçu par un objet (voir ci-dessous), il faut avant tout connaître la position du soleil. Pour ce faire, les équations de Reda et Afshin (2003) sont utilisées. Ces deux auteurs ont mis au point des équations qui fournissent la position du soleil (et d'autres paramètres) pour n'importe quel endroit de la surface terrestre, et à n'importe quel moment de l'année, avec une très grande précision. Mais il ne suffit pas de connaître la position du soleil dans le ciel. En effet, dans un environnement urbain, les effets d'obstruction dû aux obstacles ne peuvent pas être négligés, car ils induisent la présence d'ombres qui influencent fortement le bilan d'énergie de ces zones. Lorsque la position du soleil est connue dans le ciel, un algorithme spécialisé dans la détection d'obstacles est appliqué (Moller et Trumbore, 1997 ; Segura et Feito, 1998). Cet algorithme teste pour chaque patch si les rayons solaires dirigés dans sa direction sont interceptés par un objet quelconque de la scène (comme un mur). Si le patch n'est pas masqué, alors le rayonnement solaire direct est évalué par une équation qui tient compte des différents angles entre la position du soleil et celle de la face concernée (pente, orientation). Dans cette équation, il est évidemment nécessaire de fournir la valeur du rayonnement solaire direct de référence (cf. partie 1). Remarquons que les obstacles situés entre un patch et le soleil ne sont pas forcément opaques (transmissivité = 0) : ils peuvent être semi-transparents (transmissivité > 0), comme pour des objets en verre (vitres) ou en plexiglas. En traversant ces objets, le rayonnement solaire est atténué, mais pas arrêté. Cette atténuation joue aussi bien sur le rayonnement solaire direct que le diffus atmosphérique ou sur le réfléchi. Cet effet est intégré dans l'algorithme de détection d'obstacle et dans le calcul du rayonnement solaire reçu.

Dans les algorithmes les plus simples, le rayonnement diffus est considéré comme isotrope, ce qui signifie que les contributions de toutes les parties du ciel sont identiques. Or, comme le démontre Perez (1993), ces modèles peuvent mener à des erreurs non négligeables pour certaines expositions (notamment les faces orientées au nord et au sud) et pour certains types de couverture nuageuse (Robinson et Stone, 2004). Aussi, pour minimiser les erreurs, il est conseillé d'utiliser des algorithmes plus évolués, qui considèrent le rayonnement diffus comme anisotrope. Ainsi, dans leur modèle d'atmosphère baptisé « *all-weather* », Perez *et al.* (1993) tiennent compte des conditions d'ensoleillement pour évaluer non seulement

l'intensité, mais aussi la distribution de la luminosité dans le ciel. En effet, on sait qu'à un instant donné, la portion de l'atmosphère proche du soleil est une plus grande source de rayonnement diffus que la zone proche du zénith par exemple (Temps et Coulson, 1977). De plus, cette distribution varie tout au long de la journée et elle doit être réévaluée à chaque moment. Pour pouvoir appliquer ce modèle, il faut considérer le ciel lui-même comme un objet de la scène. Concrètement, le ciel est un hémisphère composé de patchs triangulaires qui diffusent chacun une certaine quantité de rayonnement. Le calcul du rayonnement diffus atmosphérique comprend deux étapes :

- **1^{ère} étape** : selon l'état du ciel (Perez *et al.* en distinguent 8 catégories en tout : de clair à complètement couvert), nous allons attribuer un facteur de pondération à chaque patch d'atmosphère à l'aide d'une fonction statistique où intervient essentiellement la position du patch par rapport au soleil. Puis, en partant du rayonnement diffus de référence reçu sur une surface horizontale (modélisé ou fourni en donnée d'entrée), la contribution en rayonnement diffus de chaque patch d'atmosphère est évaluée en fonction de son « poids » ;
- **2^{ème} étape** : il faut calculer la contribution en rayonnement diffus de chaque patch de ciel sur chaque patch au sol. Cette partie se fait par l'évaluation des « facteurs de forme » (voir Ozisik 1973 ; Schröder et Hanrahan, 1993 ; Panykh *et al.*, 1998). Evidemment, les patchs de ciel ne voient pas forcément tous les patchs de sol, aussi il faut faire intervenir l'algorithme de détection des obstacles entre le ciel et le sol.

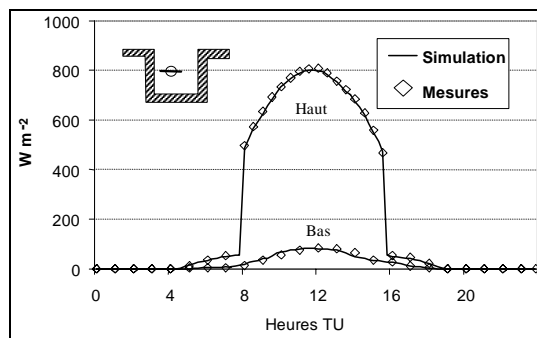
A des échelles de travail aussi fines, il est impossible de négliger la contribution des réflexions en provenance des autres objets qui, dans certains cas (comme pour une face tournée au Nord), pourra constituer une source non négligeable d'apport radiatif. Harman *et al.* (2004) trouvent qu'en négligeant les réflexions dans le visible, l'erreur peut aller jusqu'à 18% du rayonnement global, contre seulement 2,5% après 1 réflexion (pour 30% et 3% dans l'IR respectivement). On appellera « rayonnement incident réfléchi » (abrégié *RIR* dans ce qui suit) le rayonnement solaire en provenance des autres objets de la scène par réflexion. Notons que plus la géométrie est variée, plus le *RIR* joue un rôle important : après un nombre infini de réflexions, le rayonnement a une grande probabilité de finir piégé dans le milieu (en ville le rayonnement solaire qui s'engouffre dans les rues a de grandes chances d'y rester bloqué). En fonction des propriétés physiques de la surface des objets, la réflexion peut être de nature lambertienne (dite isotrope) ou spéculaire (anisotrope). Selon le mécanisme lambertien, lorsqu'un objet réfléchit le rayonnement solaire, sa surface va le renvoyer équitablement dans toutes les directions, quel que soit son angle d'incidence. Dans le cas du rayonnement spéculaire (comme pour un miroir), le rayonnement est réfléchi préférentiellement dans une certaine direction qui dépend de son angle d'incidence sur la surface.

Dans la réalité, la réflexion des objets est une combinaison des deux phénomènes (Torrance et Sparrow, 1967 ; Nayard *et al.*, 1991). Pour le moment, pour simplifier, seul le mécanisme de réflexion (lambertien) est traité dans LASER/F. Ainsi, le *RIR* d'un patch de la scène est la somme du rayonnement global qui a été réfléchi de manière lambertienne dans sa direction par tous les autres patchs de la scène. Schématiquement, l'algorithme de calcul du *RIR* est le suivant : la quantité de rayonnement solaire réfléchi par chaque patch de la scène est évaluée (en fonction du rayonnement global déjà reçu et de la réflectivité). Ce rayonnement est ensuite renvoyé sous forme diffuse dans la scène où il va toucher uniquement les objets visibles par le patch émetteur. Grâce aux facteurs de forme déjà évoqués, il est possible de connaître la quantité de rayonnement reçue par les patchs cibles. Celle-ci s'ajoute au rayonnement solaire incident déjà reçu par la cible. D'un point de vue purement conceptuel, on remarquera cependant, que si on souhaite connaître la quantité totale de rayonnement qui est réfléchi par les faces de la scène, il faut en principe connaître la

quantité totale de rayonnement qu'elles reçoivent. On se retrouve donc face à un problème classique d'équations à références circulaires. Au plan algorithmique, ce problème est résolu par une méthode bien connue dite « de radiosité progressive » (Adelene, 1995 ; Chang et Shih, 1998). Itérativement, chaque patch « émet » une partie de son rayonnement vers la totalité des autres patches, jusqu'à la stabilisation du système. Cette méthode est « lourde » en calculs et lente, mais elle possède l'avantage d'être numériquement stable et inconditionnellement convergente (d'autant plus qu'un certain nombre de techniques d'accélération peuvent être appliquées).

Il est possible de comparer le rayonnement global (direct + diffus + *RIR*) simulé par le modèle, au rayonnement global mesuré horizontalement et verticalement dans le canyon lors de la campagne expérimentale RECLUS. Ce rayonnement a été mesuré par un albedomètre placé au milieu du canyon et à 11,7 m au-dessus du sol. Ce capteur mesure le rayonnement global reçu sur deux faces opposées (il est en fait composé de deux pyranomètres). Lorsqu'il est positionné à l'horizontale, l'une des faces regarde vers le ciel et l'autre vers le sol. Sur la figure 4, le rayonnement global simulé sur le capteur fictif est en parfait accord avec le rayonnement mesuré sur la face supérieure de l'albedomètre.

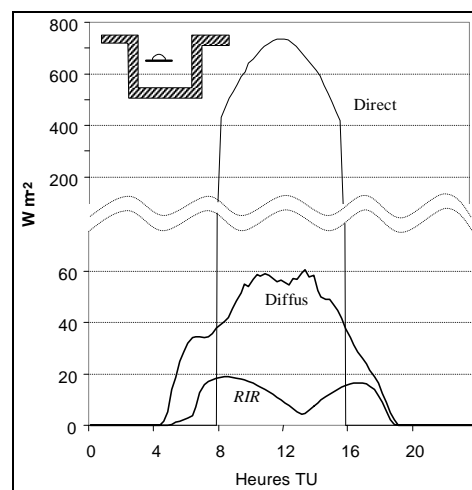
Figure 4 : Rayonnement solaire simulé et mesuré par un albedomètre horizontal placé au milieu du canyon et à 11,7 m au-dessus du sol. Face tournée vers le ciel (Haut) et face tournée vers le bas (Bas). *Solar radiation simulated and measured by an horizontal albedometer located in the middle of the canyon at 11.7 m high. The face viewing up ('Haut') and the face viewing down ('Bas').*



On remarque qu'il atteint 810 W/m^2 en milieu de journée et qu'il reproduit bien le phénomène de masque le matin et le soir. Le rayonnement global simulé sur la face tournée vers le sol est également assez bien reproduit. Le rayonnement reçu est faible et atteint au maximum 83 W/m^2 , ce qui est normal puisqu'il provient exclusivement des réflexions sur les objets qui composent le fond du canyon.

Alors que les mesures ne permettent pas de faire la part d'une manière simple des diverses composantes du rayonnement global, le modèle permet d'évaluer la contribution respective du diffus atmosphérique, du réfléchi et du direct. Cette décomposition est présentée en figure 5 pour la face tournée vers le ciel.

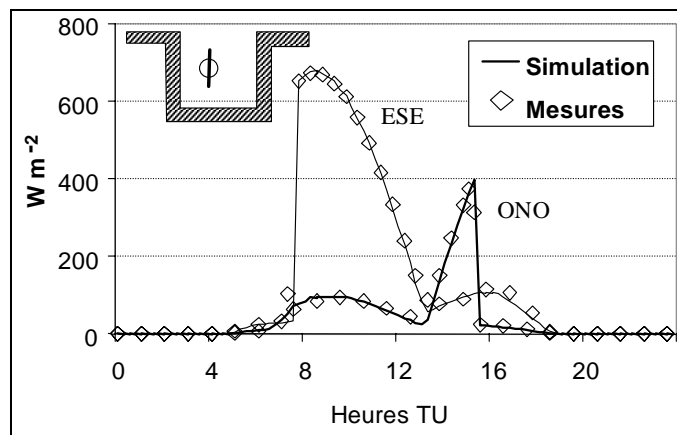
Figure 5 : Simulation des composantes du rayonnement global reçu par la face supérieure d'un albedomètre horizontal placé au milieu du canyon et à 11,7 m au-dessus du sol. Le rayonnement direct est représenté en trait fin, le diffus atmosphérique en trait moyen et le rayonnement réfléchi par les objets en trait épais. La partie médiane de la figure a été volontairement tronquée. *Simulation of the global radiation components of the upper face of an horizontal albedometer located in the middle of the canyon at 11.7m high. Direct radiation (thin line), diffuse atmospheric radiation (medium line) and reflected radiation (big line). The middle part of the picture is not visible.*



Ainsi, entre 8h et 16h, c'est bien évidemment le rayonnement direct qui domine, puisque le capteur voit le soleil. En dehors de cette plage horaire (lorsque le soleil est masqué), le rayonnement diffus atmosphérique constitue le principal apport radiatif, devant le rayonnement réfléchi sur les parois (*RIR*). Remarquons la cinétique singulière du *RIR* qui présente deux maximums, vers 8h et 17h (lorsque le soleil est face aux parois verticales du canyon) et une valeur minimale vers 13h (lorsque le soleil est dans l'axe de la rue).

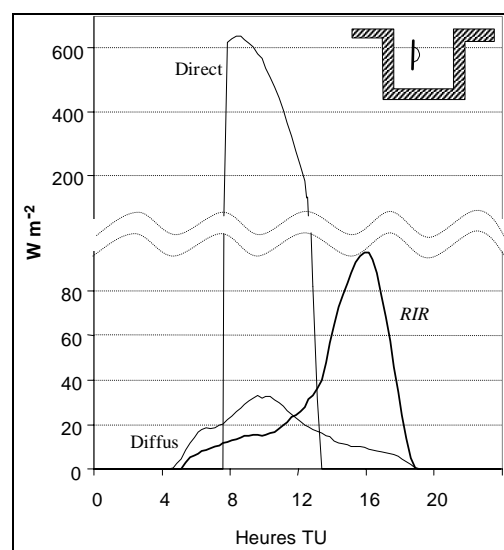
La figure 6 autorise la comparaison simulation/mesures pour un albedomètre placé pratiquement au milieu du canyon à la verticale (regardant les murs). Compte tenu de l'orientation de la rue (azimut de 35° par rapport au nord), c'est la face ESE du capteur qui est la mieux exposée dans la matinée et qui reçoit le plus de rayonnement, alors que c'est logiquement au tour de la face ONO l'après-midi.

Figure 6 : Rayonnement solaire mesuré et simulé pour un albedomètre vertical. La face ONO est représentée en trait épais et la face ESE en trait plus fin. *Solar radiation simulated and measured by a vertical albedometer. The WNW face (big line) and the ESE face (thin line).*



Malgré la cinétique journalière compliquée de ce capteur, la simulation s'accorde assez bien avec les mesures. On remarque aussi que, quelle que soit la face analysée, le rayonnement global subit deux pics d'intensité inégale (un pic principal et un pic secondaire). La simulation permet d'expliquer sans ambiguïté cette cinétique. Ainsi, pour la face ESE du capteur (figure 7), la décomposition du rayonnement global révèle que le pic principal (entre 8h et 13h) s'explique par l'arrivée d'une grande quantité de rayonnement direct, alors que la part du diffus et du réfléchi est insignifiante. Par contre, le pic secondaire qui se manifeste l'après-midi et qui culmine vers 16 h, est imputable à une arrivée importante (de presque 100 W m^{-2}) de rayonnement réfléchi (*RIR*) sur les parois du canyon.

Figure 7 : Simulation du rayonnement global reçu sur la face ESE d'un albedomètre vertical placé pratiquement au milieu du canyon. Le rayonnement direct est représenté en trait fin, le diffus atmosphérique en trait moyen et le rayonnement réfléchi par les objets en trait épais. La partie médiane de la figure a été volontairement tronquée. *Simulation of the global radiation components received on a ESE face of a vertical albedometer located at the middle of the canyon. Direct radiation (thin line), diffuse atmospheric radiation (medium line) and reflected radiation (big line). The middle part of the picture is not visible.*



Le *RIR* de l'après-midi est beaucoup plus fort que le matin. Cette asymétrie est due en partie aux nombres de réflexions subies : 2 le matin pour une seule l'après-midi (figures 8a et b). Comme le capteur voit peu de ciel, le rayonnement diffus atmosphérique est la plus petite des trois composantes. Sa cinétique dissymétrique est due à l'anisotropie introduite par le modèle de Perez (1993). Le rayonnement diffus est plus important le matin, quand le capteur fait face au soleil, que l'après-midi, quand il lui tourne le dos (ce qui ne serait pas le cas avec un modèle isotrope).

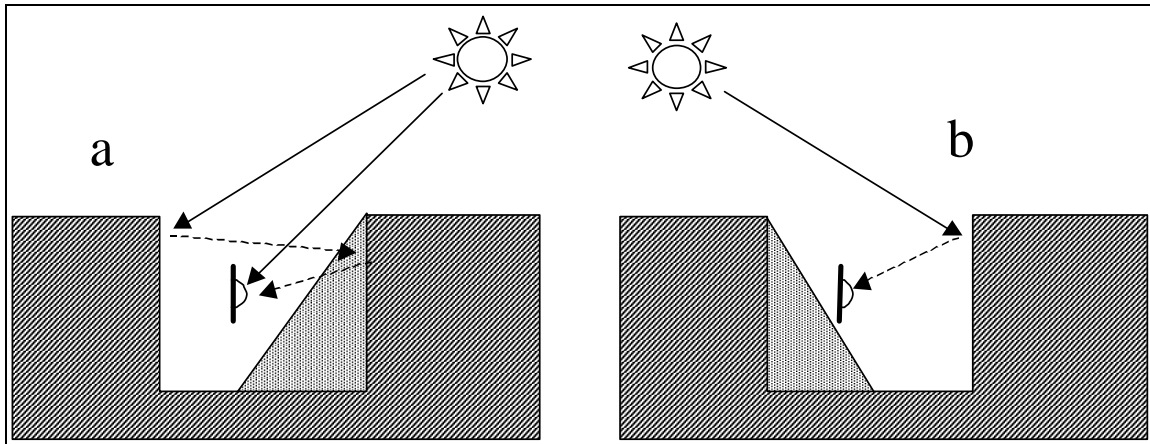


Figure 8 : Explication du pic de rayonnement global observé le matin (a) et l'après-midi (b) pour un capteur vertical tourné vers l'ESE dans un canyon. *Explanation of the global radiation peak observed during the morning (a) and the afternoon (b) for a vertical device facing ESE.*

A l'issue de cette première étape de travail, les comparaisons entre mesures et simulations démontrent clairement la validité de certains algorithmes implantés dans LASER/F pour simuler le rayonnement solaire :

- 1) la cinétique solaire est respectée, ce qui valide les calculs de positionnement du soleil ;
- 2) les obstacles sur la trajectoire des rayons solaires sont correctement détectés, et les ombres sont convenablement reproduites. On valide ainsi l'algorithme de détection d'obstacles ;
- 3) le calcul du rayonnement diffus atmosphérique est satisfaisant, ce qui confirme le choix d'un modèle anisotrope ;
- 4) le rayonnement reçu par réflexions multiples entre les objets semble être correct, ce qui justifie l'utilisation coûteuse en temps de calcul de l'algorithme de redistribution de l'énergie par radiosité progressive.

4. Le rayonnement infrarouge

Tous les objets reçoivent du rayonnement infrarouge en provenance de deux sources principales : l'atmosphère qui rayonne vers le sol (infrarouge atmosphérique, *IRA*) et les autres objets qui émettent un rayonnement dirigé vers le ciel et vers leur voisinage (infrarouge terrestre, *IRT*). A la grande différence du rayonnement diffus atmosphérique, l'*IRA* peut être considéré comme isotrope. Ceci revient à envisager l'atmosphère comme une source homogène de rayonnement infrarouge. L'*IRA* de chaque patch est alors simplement calculé grâce à une valeur *IRA* de référence (fournie en tant que donnée d'entrée, ou modélisée) et d'un facteur de visibilité du ciel, aussi connu sous le nom de « *sky view factor* ». Le facteur de visibilité du ciel (voir par exemple Grimmond *et al.*, 2001) est un indice qui varie entre 0 et 1 et qui donne une indication sur la proportion de ciel qui est vue depuis un patch. S'il est nul, le patch ne voit pas de ciel, et s'il vaut 1, le patch voit l'hémisphère céleste en entier. Bien sûr, en ville, le facteur de visibilité du ciel variera énormément entre des valeurs élevées pour

les toits et des valeurs faibles pour le fond d'une ruelle étroite. Cet indice est calculé une fois seulement avant chaque simulation (il est invariant dans le temps puisqu'il ne dépend que de la géométrie de la scène). L'évaluation du facteur de visibilité du ciel est faite numériquement par une intégration des facteurs de forme entre chaque patch au sol et les patches visibles de la voûte céleste (une détection d'obstacle est indispensable pour savoir si les patches se voient ou non).

L'infrarouge terrestre (*IRT*) véhicule l'énergie radiative échangée par les objets de la scène entre eux. C'est une perte pour les objets émetteurs (qui se refroidissent), mais un gain pour les récepteurs (qui se réchauffent). Son estimation pose deux grands problèmes : l'un purement radiatif, l'autre plutôt thermique. Examinons d'abord le problème d'ordre radiatif. L'émission de rayonnement infrarouge suit la loi de Stephan-Boltzmann généralisée pour les corps gris (Edmonds, 1968), avec :

$$Q = \varepsilon \sigma T^4$$

D'après cette théorie, le rayonnement émis (Q en $W m^{-2}$) par un objet, dépend d'une constante ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$), de l'émissivité (ε , facteur qui varie entre 0 et 1) et de la température (T). Plus l'émissivité est élevée, plus la quantité de rayonnement émis est proche de celle d'un corps noir. Or, on admet que dans le domaine de l'infrarouge, l'absorptivité d'un corps est égale à son émissivité. En conséquence, le complément de l'émissivité ($1-\varepsilon$) représente la réflectivité dans le domaine infrarouge. Aussi, les corps gris émettent et réfléchissent du rayonnement infrarouge ! Notons ici que l'*IRA* est également soumis à ce mécanisme de réflexion. Ainsi, le rayonnement infrarouge réfléchi par un objet provient en partie de l'atmosphère et en partie du rayonnement en provenance des autres objets au sol. En postulant que toutes ces composantes (émises et réfléchies) se propagent sous forme diffuse, elles peuvent être traitées dans le même algorithme par *LASER/F*. C'est la somme de leur contribution qui va former l'*IRT*. Pour aller plus loin, il faut remarquer que la quantité de rayonnement infrarouge qu'un patch émet/réfléchit sous forme d'*IRT* dépend aussi de la quantité de rayonnement infrarouge qu'il reçoit sous cette même forme. Une fois de plus, le problème de référence circulaire se pose. Cette difficulté est résolue à l'aide de la même méthode de radiosité progressive évoquée précédemment pour le *RIR*.

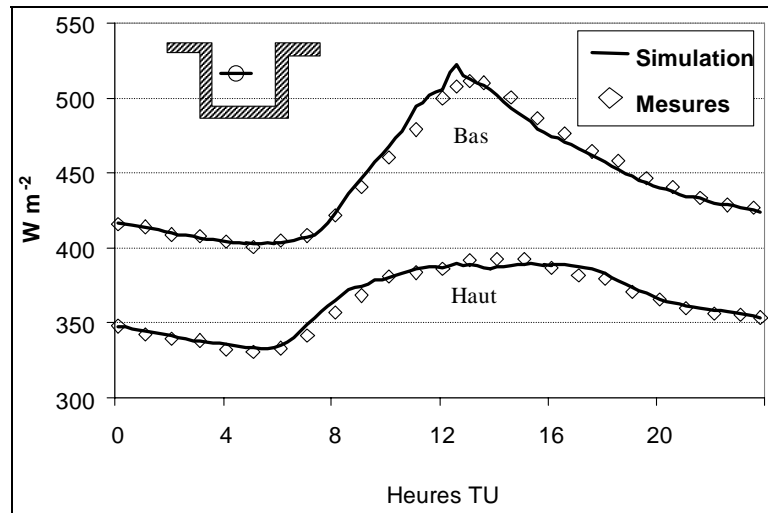
En ce qui concerne le deuxième problème de l'*IRT*, qualifié précédemment d'ordre thermique, il tient au fait que d'après la loi de Stephan-Boltzmann, l'émission de rayonnement infrarouge dépend de la température de surface (T). Or, cette dernière peut être assimilée à une température d'équilibre qui, à un moment donné, reflète l'état thermique du corps. Cette température dépend de tous les échanges énergétiques qui ont lieu entre l'objet et son environnement, non seulement sous forme radiatifs, mais aussi sous forme de flux de chaleur (conduction, flux de chaleur sensible et évapotranspiration). Ainsi, la qualité de la simulation de l'*IRT* est un point délicat, puisqu'elle dépend de toutes les erreurs commises dans l'estimation des températures de surface. Au plan informatique, le problème est résolu par des itérations successives d'une suite de routines qui vont s'exécuter tant que les températures de surface de l'ensemble de la scène ne sont pas stabilisées à un facteur ξ près (arbitrairement fixé à $0,01^\circ C$, mais ce critère de convergence est réglable par l'opérateur). Il signifie que tant que les températures de la scène entre deux itérations évoluent de $\pm \xi$, le calcul se poursuit. Dans cette suite de routines, il est nécessaire d'estimer l'*IRT* à chaque itération, mais aussi tous les flux qui dépendent des températures de surface (voir ci-dessous).

A ce stade, le modèle permet une évaluation de toutes les composantes du bilan radiatif (R_n) dans un environnement complexe :

$$R_n = \underbrace{\text{direct} + \text{diffus}}_{\text{Bilan du solaire}} + \underbrace{RRI - \text{réfléchi}}_{\text{Bilan de l'infrarouge}} + \underbrace{IRA + IRT - \text{réfléchi} - \text{émis}}_{\text{Bilan de l'infrarouge}}$$

La validation du rayonnement infrarouge est une étape fondamentale pour tester non seulement la qualité des algorithmes de rayonnement, mais aussi, indirectement, ceux des autres flux de chaleur. Dans un premier temps, l'infrarouge simulé a été comparé au rayonnement infrarouge mesuré par un pyrgéomètre à deux faces (capteur qui mesure le rayonnement infrarouge), placé à l'horizontale et au milieu du canyon (figure 9). Ainsi, la face du capteur tournée vers le ciel voit à la fois les murs du canyon (aux températures de surface élevées) et l'atmosphère (dont la température apparente est faible), alors que la face inférieure ne voit que les objets du canyon.

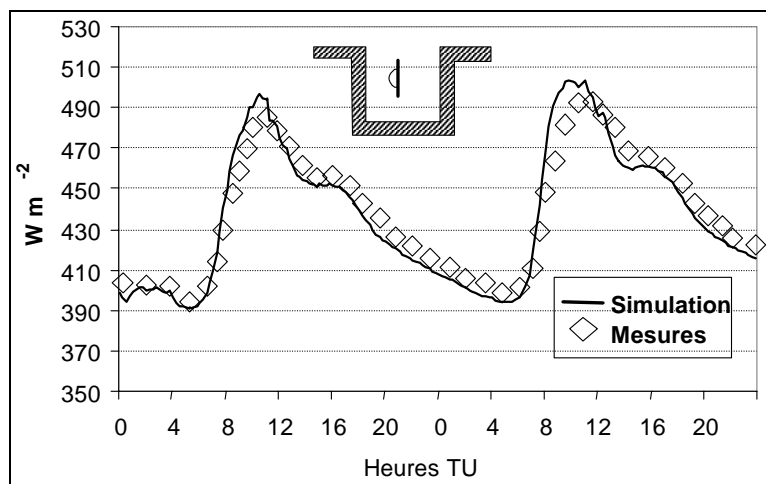
Figure 9 : Validation du rayonnement infrarouge par un bilanmètre infrarouge horizontal placé au milieu du canyon. Le capteur du haut est représenté en trait fin alors que le capteur du bas est représenté en trait épais. *Validation of the infrared radiation by an horizontal infrared bilanmeter located at the middle of the canyon. The upper face (thin line) and lower face (big line).*



Ces remarques expliquent aisément pourquoi la face tournée vers le haut reçoit moins de rayonnement infrarouge que la face tournée vers le bas (390 W.m^{-2} contre 511 W.m^{-2}). La comparaison entre la simulation et l'observation laisse apparaître des différences qui ne dépassent pas 10 W m^{-2} pour le capteur haut et 16 W m^{-2} pour le capteur bas. Ces différences peuvent être imputées à une trop grande simplification de la géométrie de la scène (pas d'arbres, pas de fenêtres ni de balcons sur les façades), ou une légère erreur de paramétrisation thermo-physique. On remarque surtout que la différence maximale est obtenue dans la phase d'échauffement (peu avant midi) pour le capteur qui regarde vers le bas.

Le rayonnement infrarouge a aussi été validé par comparaison avec un pyrgéomètre vertical dont la face unique (dirigée vers l'ONO) regarde une paroi du canyon (figure 10). La simulation respecte la cinétique globale.

Figure 10 : Validation du rayonnement infrarouge par un pyrgéomètre vertical visant une façade d'immeuble. *Validation of the infrared radiation by a vertical pyrgeometer viewing the canyon wall.*



Le rayonnement infrarouge subit une augmentation brutale le matin, lorsque la façade du canyon se réchauffe grâce à l'arrivée du rayonnement solaire. Un peu avant 12h, il chute lentement, pour marquer un pallier vers 16h, puis la baisse reprend jusqu'au lendemain matin. Ici, parfois la simulation dépasse légèrement l'observation (surtout en phase de réchauffement le matin, $+30 \text{ W.m}^{-2}$ au maximum) et parfois, la sous-estime légèrement (notamment pendant la nuit, -10 W.m^{-2}).

Il apparaît clairement que la modélisation du rayonnement infrarouge dans le canyon est beaucoup plus délicate que celle du rayonnement global. Les différents flux impliqués dans le calcul des températures de surface ont pour conséquence d'y répercuter les erreurs et il devient très difficile de déterminer avec précision les sources du problème. Néanmoins, les différences entre la simulation et l'observation restent acceptables et la cinétique journalière générale est bien respectée. Aussi, les algorithmes d'échange d'énergie par rayonnement infrarouge qui sont en grande partie identiques à ceux mis au point pour le visible ne semblent pas pouvoir être remis en cause.

5. Transfert de chaleur par conduction thermique dans les matériaux

Contrairement au transfert radiatif, la conduction thermique ne peut s'opérer que pour des objets en contact, entre deux régions d'un même milieu ou entre deux milieux en contact, sans déplacement appréciable de matière. C'est en fait l'agitation thermique qui se transmet de proche en proche, une molécule ou un atome cédant une partie de son énergie cinétique à son voisin (la vibration de l'atome se ralentit au profit de la vibration du voisin). Grâce à ce transfert, on espère simuler la conduction de la chaleur dans le sol dont on sait qu'elle joue un rôle fondamental : en journée, le sol stocke une partie de l'énergie radiative incidente en la transmettant en profondeur (il se réchauffe), alors que la nuit, il déstocke une partie de la chaleur emmagasinée en la dirigeant vers la surface (il se refroidit). Ce mécanisme est l'une des clefs qui explique en partie le comportement du microclimat urbain et notamment, le fameux îlot de chaleur nocturne. Ce transfert de chaleur obéit à la loi dite de Fourier (Carslaw et Jaeger, 1959 ; Ozisik, 1973 ; Incropera et De Witt, 1996).

Pour simuler de manière réaliste la conduction pour des objets dont les contraintes énergétiques varient fortement au cours du temps, il faut modéliser la conduction de la chaleur en régime transitoire (de manière à tenir compte de l'inertie thermique des matériaux). Normalement, la conduction de la chaleur se fait dans les trois dimensions au sein du matériau, mais pour l'instant, seule la propagation de la chaleur dans le sens de l'épaisseur est prise en compte. On admet que cette approximation peut être faite avec une perte minimale de précision. Comme les objets (de type murs par exemple) sont composés de plusieurs couches de matériaux aux propriétés thermiques (conductivité thermique, masse volumique et chaleur spécifique) et aux épaisseurs parfois très différentes, il faut résoudre cette équation unidimensionnelle pour des objets hétérogènes. Cette partie du travail ne pose aucun problème particulier, mais il est démontré que le nombre et l'emplacement des points de calculs sont en principe importants pour obtenir des résultats réalistes (Tuomaala *et al.*, 2000 ; Davies, 2003). Les équations de Fourier sont écrites pour un schéma implicite qui a la réputation d'être inconditionnellement stable au plan numérique. Elles nous permettent d'obtenir le stock de chaleur dans les matériaux, le flux de chaleur et les températures à l'intérieur et à la surface des objets. Dans le cas des sols, la température profonde (à partir de la limite de pénétration de la vague de chaleur diurne) est constante et imposée durant toute la simulation. La conductivité thermique du sol est imposée pour le moment, mais on sait qu'elle dépend de la teneur en eau. C'est pourquoi il est envisagé de la rendre variable. La température sur la face interne des murs (à l'intérieur des bâtiments) évolue dans le temps et fait partie des données d'entrée. Dans le cas des arbres (uniquement feuillus pour le moment),

on considère que leur couronne est composée de feuilles de 1 mm d'épaisseur, dont la température sur la face inférieure est contrainte à être égale à celle de l'air. La température interne et de surface des feuilles est simulée (conduction). Par rapport à d'autres modèles qui négligent ces aspects, LASER/F a notamment pour objectif de montrer l'influence de l'eau en milieu urbain. L'eau est traitée de deux manières différentes :

- Si le revêtement d'un patch est classé comme de l'eau vive (c'est-à-dire une eau sans cesse renouvelée, comme l'eau d'une fontaine ou d'une rivière), ou s'il fait partie d'une étendue d'eau ayant une grande inertie thermique (mer ou grand lac), alors la température de surface est imposée en donnée d'entrée et aucun calcul de conduction n'est effectué.
- Si le revêtement du patch est considéré comme une étendue d'eau inerte (flaque ou marre, voir un lac peu profond) dont la température est sensible au cycle diurne, alors on considère qu'il se réchauffe de manière homogène (en bloc) et la température de surface est calculée en fonction de l'énergie emmagasinée.

A l'aide de ces deux comportements, il est possible de simuler tous les types d'étendue d'eau, ce qui forme un apport original par rapport aux travaux précédents.

6. Flux de chaleur sensible et latente

Le flux de chaleur sensible entre la surface et l'atmosphère est estimé en première approximation selon les équations de Al Sanea (2002) qui a étudié cette problématique pour les toits en milieu urbain. Selon cet auteur, le flux est proportionnel à la différence entre la température de surface et celle de l'air et à un coefficient de transfert convectif qui dépend de la vitesse du vent (Ito *et al.*, 1972). Cette paramétrisation simple du flux de chaleur sensible est (pour le moment) étendue à toutes les surfaces de la scène.

Le flux de chaleur latente fait l'objet de plus en plus d'attention en modélisation numérique. Le plus difficile, à ces échelles, est de reproduire explicitement le comportement des arbres. Soulignons les tentatives de Robitu *et al.* (2006) ou Picot (2004). Comme le modèle LASER/F doit pouvoir être appliqué à tout type de surface (végétation, eau, ...), il simule aussi le flux de chaleur latente. Même si dans un milieu comme la ville, ce type de flux n'est pas très élevé, il est impossible de négliger le rôle des parcs, des arbres, du gazon, voire des étendues d'eau, surtout dans une ville comme Strasbourg qui attache une grande importance à ses espaces verts. Trois types de couverts sont envisagés : gazon, eau, feuilles. Le flux de chaleur latente pour les surfaces de gazon et les feuilles est calculé selon l'équation bien connue de Penman-Monteith qui intègre une résistance aérodynamique et une résistance du couvert, en posant l'hypothèse d'un sol bien pourvu en eau et d'un végétal actif. Comme dans cette équation, la résistance stomatique varie en fonction de la hauteur du gazon (via le LAI, Leaf Area Index), cette équation peut s'appliquer pour des hauteurs d'herbe variables. Pour les étendues d'eau (quelle que soit leur nature), l'évaporation s'estime à l'aide de l'équation de Penman qui fonctionne parfaitement pour les étendues d'eau libre.

La modélisation des flux de chaleur est la partie la moins fiable des schémas de surface et pourtant l'une des plus importante. Il s'agit évidemment des flux de chaleur latente, sensible et la conduction dans les objets. Si on rajoute le rayonnement et le stockage, ces flux permettent de boucler le bilan d'énergie. La campagne de mesures expérimentale menée dans le canyon urbain à Strasbourg permet de valider les flux de chaleur sensible et latente qui ont été mesurés au sommet du canyon (quasiment dans l'axe). N'ayant pas été mesuré, le flux de chaleur dans le sol ne pourra pas faire l'objet d'une validation. Le flux de chaleur sensible a été mesuré par un anémomètre Sonic, secondé d'un thermocouple. Le flux de chaleur latente est mesuré par un Hygromètre Krypton. L'anémomètre Sonic a pour principe d'envoyer une

onde sonore à haute fréquence dans les trois directions de l'espace, entre des couples d'émetteur/récepteur. Le temps de parcours de l'onde sonore détermine la vitesse et la direction du vent. Comme le temps de parcours moyen du son dépend de la température de l'air, la centrale d'acquisition calcule aussi une température de l'air dite « Sonic ». Avec les données de vent et la température, elle détermine ensuite un flux de chaleur sensible. Lorsque l'anémomètre Sonic est secondé par un thermocouple, il est aussi possible de calculer un flux de chaleur sensible en combinant les données de vent et les données de températures du thermocouple, ce qui offre un autre moyen d'obtenir le flux de chaleur sensible. L'hygromètre Krypton, lui, est un hygromètre qui mesure les fluctuations rapides de la vapeur d'eau atmosphérique à haute fréquence, par l'émission et l'analyse d'un rayonnement ultraviolet. Il est bien connu que les données fournies par ces appareils sont soumises à un problème de représentativité spatiale. Contrairement au rayonnement ou la conduction, le flux de chaleur sensible et latente dépendent du vent : le flux mesuré par le capteur n'est pas forcément le flux émis localement, et les zones qui alimentent le flux ne sont pas toujours les mêmes au cours du temps. Il faut être capable de déterminer à tout moment les zones qui alimentent le flux (les zones contributives). Idéalement, la mesure des flux doit se faire en zone plane, avec les capteurs placés au plus près du couvert étudié et par vent faible ou nul puisque se sont alors les zones placées sous le capteur qui contribuent le plus. Mais qu'en est-il au sommet d'un canyon urbain où les différences de températures entre les façades peut induire une circulation interne compliquée (Bozonnet *et al.*, 2005; Eliasson *et al.*, 2006) ? Les capteurs de flux placés au sommet du canyon lors de l'expérimentation de 2002 se voulaient représentatifs des flux s'échappant de l'ensemble de la rue. Comme le vent au cours de la période étudiée est faible, les advections doivent jouer un rôle mineur sur les flux. Les simulations montrent d'ailleurs que l'hypothèse se vérifie assez bien (figure 11).

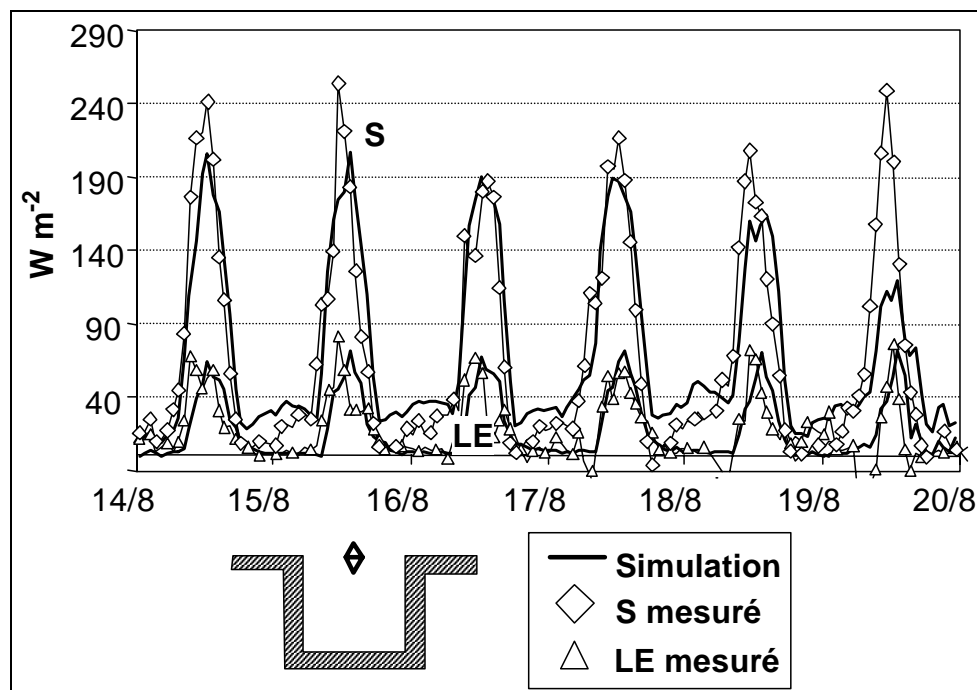


Figure 11 : Les flux de chaleur au sommet du canyon pour des journées allant du 14 au 19 août. Les flux sont représentés après lissage par une moyenne mobile d'ordre 6. *Heat fluxes at the canyon top for the period between August 14 to 19. The fluxes are averaged over a 1.5 hour period.*

Selon les analyses, le léger déphasage qui affecte le flux de chaleur latente simulé est probablement dû à une mauvaise répartition de la végétation dans la scène. De plus, l'amortissement du flux de chaleur sensible lors du maximum diurne et sa légère surestimation pendant la phase nocturne est lié à une mauvaise représentation des différents

types de surface qui tapissent le fond du canyon : certaines d'entre elles n'ont pas été correctement prises en compte dans la simulation ; il s'agit des entrées d'immeubles et de parking (pavées) qui entrecoupent les bandes d'herbe au pied des immeubles et qui réagissent rapidement aux contraintes thermiques.

Conclusion

Dans le domaine de la microclimatologie, les différents flux radiatifs et de chaleur jouent un rôle prédominant. La complexité des surfaces rencontrées à ces échelles pousse la modélisation dans ses retranchements. Les résolutions atteintes sont telles que les surfaces doivent être soigneusement représentées par leurs propriétés thermo-physiques (géométrie, réflectivité, émissivité, ...). C'est dans cet esprit qu'a été conçu le modèle LASER/F. Les transferts d'énergie y sont décrits par des algorithmes spécialisés pour chacun des principaux flux : énergie solaire, rayonnement infrarouge, conduction ou flux de chaleur sensible et latente. Dans cet article, ce modèle a été appliqué en milieu urbain et plus précisément dans un canyon pour lequel un jeu de données acquis durant une campagne de mesures expérimentale qui s'est déroulée en été 2002 sert de validation. Les résultats sont très encourageants, surtout dans le domaine radiatif où le modèle est quasiment conforme à la réalité. Néanmoins, dans le domaine des flux de chaleur, il reste encore un certain nombre de validations à effectuer avant de pouvoir affirmer être capable de simuler ces transferts avec réalisme. Malgré tout, les flux respectent les ordres de grandeur trouvés chez d'autres auteurs et la cinétique générale correspond assez bien aux mesures. Avec les résultats obtenus, on peut affirmer dès maintenant que ces modélisations se révèlent être de précieux auxiliaires pour les décideurs, les aménageurs ou pour de la prévision météorologique urbaine. Le couplage de ces schémas de surface avec des modèles de mécanique des fluides (Mills, 1993 ; Smith *et al.*, 2001 ; Bozonnet *et al.*, 2005) promettent des applications dans le domaine de la qualité de l'air (Yamartino et Wiegand, 1986 ; Kamenetsky et Vieru, 1995 ; Chan et Dong, 2002 ; Xie *et al.*, 2005), dans le domaine de l'urbanisme (optimisation de la répartition des surfaces végétales ou de la densité de bâti ; Picot, 2004) ou dans le domaine de la biométéorologie (problématique de confort ; Robitu *et al.*, 2006).

Bibliographie

- AIDA M., 1982 : Urban albedo as a function of the urban structure – a model experiment (Part I). *Boundary-Layer Meteorology*, **23**, 405-413.
- ADELENE N.G., 1995 : Assessment of five radiosity acceleration techniques. *Comput. Graphics*, **19**, 5, 727-738.
- AL-SANEA S.A., 2002 : Thermal performance of building roof elements. *Building and Environment*, **V. 37**, 7, 665-675.
- ARNFIELD A.J., 2003 : Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, **23**, 1-26.
- ARNFIELD A.J. et GRIMMOND C.S.B., 1998 : An Urban Canyon Energy Budget Model and its Application to Urban Storage Heat Flux Modelling. *Energy and Buildings*, **27**, 61-68.
- BADESCU V. et SICRE B., 2003 : Renewable energy for passive house heating. *Energy and Buildings*, **35**, 1085-1096.
- BOZONNET E., BELARBI R. et ALLARD F., 2005 : Modelling solar effects on the heat and mass transfer in a street canyon, a simplified approach. *Solar Energy*, **79**, 10-24.
- CARSLAW H.S. et JAEGER J.C., 1959 : *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press, Oxford, 2nd edition, 520 p.
- CHAN T.L. et DONG G., 2002 : Validation of a two dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon. *Atmospheric Environment*, **36**, 861-872.
- CHANG C.C. et SHIH Z.C., 1998 : An accuracy enhancement algorithm for hierarchical

- radiosity. *Comput. Graphics*, **22**, 2-3, 225-232.
- DAVIES M.G., 2003 : A rationale for nodal placement for heat flow calculations in walls. *Building and Environment*, **38**, 247-260.
- De La FLOR F.S. et DOMINGUEZ S.A., 2004 : Modelling microclimate in urban environments and assessing its influence on the performance of surrounding buildings. *Energy and Buildings*, **36**, 5, 403-413.
- EDMONDS I.R., 1968 : Stephan-Boltzmann Law in the Laboratory. *American Journal of Physics*, **36**, 9, 845-846.
- ELIASSON I., OFFERLE B., GRIMMOND C.S.B. et LINDQVIST S., 2006 : Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon. *Atmospheric environment*, **40**, 1-16.
- GRIMMOND C.S.B., POTTER S.K., ZUTTER H.N. et SOUCH C., 2001 : Evaluation and application of automated methods for estimating sky view factors in urban areas. *International Journal of Climatology*, **21**, 903-913.
- HARMAN I.N., BEST M.J. et BELCHER S.E., 2004 : Radiative exchange in an urban street canyon. *Boundary-Layer Meteorology*, **110**, 301-316.
- INCROPERA F.P. et DEWITT D.P., 1996 : *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, 4th ed., 885 p.
- ITO N., KIMURA K. et OKA J., 1972 : A field experiment study on the convective heat transfer coefficient on the exterior surface of a building. *ASHRAE Transactions*, **78**, 1.
- JOHNSON G.T. et WATSON I.D., 1984 : The determination of view-factors in urban canyons. *Journal of Applied Climate and Meteorology*, **23**, 329-335.
- KAMENETSKY E. et VIERU N., 1995: Model of air flow and air pollution concentration in urban canyons. *Boundary-layer Meteorology*, **73**, 1-2, 203-206.
- KASTNER-KLEIN P. et FEDEROVICH E.A., 2001 : Wind-tunnel study of organized and turbulent air motions in street canyons. *Engineering and Industrial Aerodynamics*, **89**, 849-861.
- KONDO A., UENO M., KAGA A. et YAMAGUCHI K., 2001 : The influence of urban canopy configuration on urban albedo. *Boundary-Layer Meteorology*, **100**, 225-242.
- KUSAKA H., KONDO H., KIKEGAWA Y. et KIMURA F., 2001: A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and SLAB models. *Bound.-Layer Meteor.*, **101**, 329-358.
- MASSON V., 2000 : A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-layer Meteorology*, **94**, 357-397.
- MILLS G.M., 1993 : Simulation of the energy budget of an urban canyon. I. Model structure and sensitivity test. *Atmospheric Environment*, **27B(2)**, 157-170.
- MILLS G. 1997a : Building density and interior building temperatures: A physical modeling experiment. *Physical Geography*, **18 (3)**, 195-214.
- MILLS G., 1997b : The radiative effects of building groups on single structures. *Energy and Buildings*, **25**, 51-61.
- MOLLER T. et TRUMBORE B., 1997 : Fast, minimum storage ray-triangle intersection. *Journal on Graphic Tools*, **2**, 1, 21-28.
- NAJJAR G., KASTENDEUCH P.P., STOLL M.-P., COLIN J.-R., NERRY F., RINGENBACH N., BERNARD J., De HATTEN A., LUHAHE R. et VIVILLE D., 2004 : Le projet Reclus, télédétection, rayonnement et bilan d'énergie en climatologie urbaine à Strasbourg. *La Météorologie*, **46**, 44-50.
- NAYARD S. K., IKEUCHI K. et KANADE T., 1991 : Surface reflection: Physical and geometrical perspectives. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **13(7)**, 611-634.
- OKE T.R., 1981 : Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, **1**, 237-254.
- OZISIK N., 1973 : *Radiative transfer and interactions with conduction and convection*. Wiley-Interscience Publication, 575 p.
- PEARLMUTTER D., BERLINER P. et SHAVIV E., 2005 : Evaluation of urban surface energy fluxes using an open-air scale model. *Journal of Applied Meteorology*, **44**, 532-545.

- PEREZ R., SEALS R. et MICHALSKY J., 1993 : An All-Weather Model for Sky Luminance Distribution - A Preliminary Configuration and Validation. *Solar Energy*, **50**, 3, 235-245.
- PIANYKH O.S., TYLER J.M. et WAGGENSPACK W.N., 1998 : Improved monte carlo form factor integration. *Computer Graphics*, **22**, 6, 723-734.
- PICOT X., 2004 : Thermal comfort in urban spaces: impact of vegetation growth Case study: Piazza della Scienza, Milan, Italy. *Energy and Buildings*, **36**, 329-334.
- PITMAN A.J., 2003 : The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *International Journal of Climatology*, **23**, 479-510.
- REDA I. et ANDREAS A., 2004 : Solar position algorithm for solar radiation applications. *Solar Energy*, **76**, 577-589.
- 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.
- ROBINSON D. et STONE A., 2004 : Solar radiation modelling in the urban context. *Solar Energy*, **77**, 295-309.
- ROBITU M., MUSY M., INARD C. et GROLEAU D., 2006 : Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. *Solar Energy*, **80**, 435-447.
- RUNNALLS K.E. et OKE T.R., 2000 : Dynamics and controls of the near-surface heat island of Vancouver, British Columbia. *Physical Geography*, **21**, 283-304.
- SAKAKIBARA Y. 1996 : A numerical study of the effect of urban geometry upon the surface energy budget. *Atmospheric Environment*, **30**, 3, 487-496.
- SCHRODER P. et HANRAHAN P., 1993 : *On the form factor between two polygons*. Computer Graphics Proceedings. ACM SIGGRAPH '93 Proceedings.
- SEGURA R.J. et FEITO F.R., 1998 : An algorithm for determining intersection segment-polygon in 3D. *Computer & Graphics*, **22**, 5, 587-592.
- SHEWCHUK J.R., 1996 : *Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator*. In Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering (Ming C. Lin and Dinesh Manocha, editors), volume 1148 of Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, Berlin, 203-222.
- SHEWCHUK J.R., 2002 : Delaunay Refinement Algorithms for Triangular Mesh Generation. *Computational Geometry: Theory and Applications*, **22**(1-3), 21-74
- SMITH W.S., REISNER J.M. et KAO C.-Y.J., 2001: Simulations of flow around a cubical building: comparison with towing-tank data and assessment of radiatively induced thermal effects. *Atmospheric Environment*, **35**, 3811-3821.
- SPRONKEN-SMITH R.A. et OKE T.R., 1999 : Scale modelling of nocturnal cooling in urban parks. *Boundary-Layer Meteorology*, **93**, 287-312.
- TEMPS R.C. et COULSON K.L., 1977 : Solar radiation incident upon slopes of different orientations. *Solar Energy*, **19**, 179-184.
- TERJUNG W. et O'ROURKE P., 1980 : Influence of physical structures on urban energy budgets. *Boundary-Layer Meteorology*, **19**, 421-439.
- TORRANCE K. et SPARROW E., 1967 : Theory for Off-Specular Reflection from Rough Surfaces. *Journal of the Optical Society of America*, **57**, 9, 1105-1114.
- TUOMAALA P., PIIRA K. et VUOLLE M., 2000 : A rational method for the distribution of nodes in modelling of transient heat conduction in plane slabs. *Building and Environment*, **35**, 397-406.
- XIE X., ZHEN HUANG Z., JIASONG WANG J. et XIE Z., 2005 : The impact of solar radiation and street layout on pollutant dispersion in street canyon. *Building and Environment*, **40**, 201-212.
- YAMARTINO R.J. et WIEGAND G., 1986 : Development and evaluation of simple models for the flow, turbulence and pollutant concentration fields within an urban street canyon. *Atmospheric Environment*, **20**, 2137-2156.