

## Étude de la demande énergétique de climatisation pour une construction urbaine de type méditerranéenne

Emmanuel Bozonnet / Rafik Belarbi / Francis Allard  
LEPTAB. Université de La Rochelle. France

### Resumen

El desconfort térmico de los edificios durante el verano se incrementa en los centros urbanos por efecto del « isla térmica » de calor urbano. Las edificaciones tradicionales en ciudades mediterráneas tienen morfologías típicas adaptadas a ese fenómeno, con lo cual mejoran el confort durante esa estación. Calles estrechas, tipo « cañón », constituyen espacios confinados que limitan el aporte solar y la acumulación de calor. Sin embargo, la climatización de verano se desarrolla y participa de las fuentes antropogénicas que aumentan el efecto de « isla térmica » de calor. El objetivo de este estudio es definir la interacción entre microclima urbano, edificaciones y demanda de energía vinculada a los sistemas de climatización. Con este fin se ha desarrollado una simulación de transferencia termoélica para un caso típico en Atenas mediante una aproximación original basada en un modelo zonal. La simulación se realizó durante un mes representativo de verano acoplando desde los efectos del microclima hasta el sistema de climatización. Los resultados obtenidos, comparados con los resultados experimentales, muestran una importante interacción entre estos dos factores.

### Abstract

*Indoor thermal discomfort in summertime is amplified in city centre by the urban heat island effect. Traditional buildings in Mediterranean cities are organized according to some typical patterns enhancing the thermal comfort. Narrow streets, like urban canyons, are confined and can be valuable for better solar protections and lower temperature levels. Meanwhile, air conditioning systems are developing and participate with others anthropogenic sources to the UHI effect emphasize. The objective of this study is to define the interactions between urban microclimate, buildings and its air conditioning energy demand, by simulation of heat and mass transfer in the case of an urban canyon street in Athens. Heat and mass transfers are assessed with empirical and zonal models which are coupled with the functioning of the air conditioning system. The simulations are computed on a one month period during summer so the dynamical behaviour of the system can be assessed, and compared with experimental data. The obtained results highlight a strong interaction between the urban microclimate and the air conditioning system.*

### Descriptores

Confort térmico de las edificaciones; Microclima urbano; Calle "cañón"; Modelo zonal.

Par le passé, la conception des bâtiments était souvent liée au maintien d'une ambiance intérieure de confort thermique, définie principalement par des paramètres hygrothermiques. Ainsi, le bâti traditionnel, voire la ville elle-même à l'image de la ville de type méditerranéenne, ont-ils été adaptés pour répondre aux sollicitations du climat. Cette démarche est à nouveau d'actualité avec l'émergence de préoccupations environnementales qui ont suscité des études plus approfondies sur la demande énergétique des bâtiments, liée aux systèmes de conditionnement des ambiances. Grâce à l'informatisation, ces études ont été affinées par l'élaboration de nombreux codes informatiques pour la simulation des ambiances intérieures permettant des calculs détaillés dès la phase d'avant-projet. Toutefois, la prise en compte des conditions climatiques aux abords des bâtiments est souvent limitée aux seules données de stations météorologiques de référence pour le site de la construction, ou réglementaires, sans prise en compte du couplage entre climat et bâti. L'objectif de l'étude exposée est de définir par des simulations thermoaérauliques, l'interaction entre microclimat urbain, bâti et demande énergétique de climatisation dans le cas typique d'une rue canyon. En effet, les dissipations thermiques des bâtiments participent de façon significative au dégagement de chaleur anthropique et donc à l'amplification du réchauffement urbain en conditions estivales (figure 1).

Cette densification des villes et l'accroissement général des consommations d'énergie entraînent un cercle

vieux de réchauffement, d'autant plus que les charges de climatisation augmentent avec le «réchauffement microclimatique». Notre étude s'intéresse à l'interaction entre microclimats et bâti par la simulation des transferts de masse et de chaleur aux abords des bâtiments. Ce travail a finalement permis de qualifier la demande énergétique des bâtiments couplée au microclimat dans un cas typique de construction méditerranéenne.

### Étude du cas typique d'une rue canyon a Athènes

#### Situation géographique de la rue étudiée

Nous nous intéressons ici au cas d'une rue de type canyon située dans le centre d'Athènes, la rue Dervenion située sur le plan de la figure 2. Cette rue, ainsi que 4 autres rues représentées sur la figure 2, a fait l'objet de mesures thermoaérauliques durant l'été 2001, dans le cadre du projet Européen Urbvent (Georgakis et Santamouris, 2005).

Les données météorologiques disponibles pour la ville d'Athènes (site universitaire situé à environ 5 km du centre urbain (figure 2), ont été prises à partir de données consultables sur le site du groupe de recherche ITIA (<http://www.meteo.ntua.gr/>). En effet, les relevés météorologiques standards sont couramment réalisés en zone non perturbées, telles que des zones aéroportuaires, éloignées des centres urbains. Les mesures sur la rue Dervenion ont été réalisées en journée du 4 au 6 septembre 2001. Aussi, nous avons réalisé une simulation sur cette rue de type canyon pendant une période de 28 jours, du 10 août au 6 septembre, ce qui permet d'avoir les conditions pour les jours de mesure en tenant compte des conditions climatiques antérieures. Ce type de simulation est intéressant pour l'étude du comportement thermoaéraulique sur une saison complète, et les résultats peuvent s'avérer utiles pour l'étude énergétique globale des bâtiments de par et d'autre de la rue. Ainsi, dans cette première approche, la simulation donne une estimation des températures de surface en façade ainsi que les transferts de chaleur avec la rue, données essentielles pour la détermination des charges des locaux adjacents.

Figure 1  
Phénomène d'amplification de l'îlot de chaleur urbain et climatisation

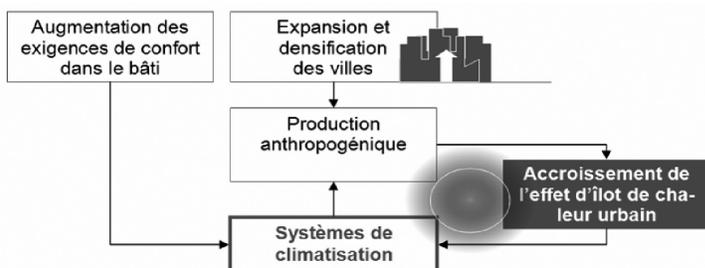
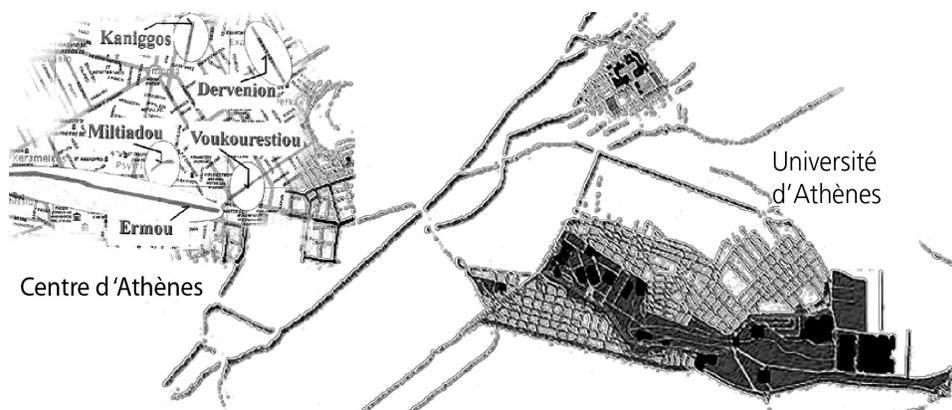


Figure 2  
Situation de la rue étudiée, rue Dervenion, dans le centre d'Athènes, et Université d'Athènes à l'écart du centre ville (données météorologiques disponibles)



Modélisation du domaine d'étude

Dans l'étude du comportement thermoaéraulique d'une rue au cours d'une saison, des périodes de ventilation due à un écoulement dominant de grande échelle alternent avec des périodes de stabilité atmosphérique pour lesquelles l'ensoleillement devient le principal moteur des écoulements locaux. Entre ces différentes périodes, une superposition de ces phénomènes peut se produire, sans prédominance de l'un sur l'autre. Nous nous sommes proposé d'intégrer dans un modèle de type zonal (Bozonnet et al., 2002) deux phénomènes climatiques essentiels: l'ensoleillement (Bozonnet et al., 2005) et les écoulements dominants dus au vent. Cette approche est intermédiaire entre les modèles fins à codes de champ et les modèles simplifiés à quelques nœuds de calcul. Elle a pour avantage de permettre des études d'un niveau de précision cohérent avec les études d'énergétique du bâtiment sur des périodes longues, de l'ordre de quelques mois, et de grands vo-

lumes, ici à l'échelle d'une rue. Le calcul couplé est mené selon la procédure itérative représentée figure 3.

Le couplage proposé a été développé au travers de différents codes de calculs développés en C++ et du programme de calcul solaire Solene développé par le Cerma (Antoine et Groleau, 1998). Les calculs sont menés parallèlement sur le volume d'air et sur les parois du domaine considéré, façades et sol urbain. L'effet des écoulements dus aux vents dominants, ainsi que les données d'ensoleillement, sont intégrés et couplés à la résolution itérative du problème au travers des bilans d'énergie et de masse sur le volume d'air et les parois.

L'étude porte sur un tronçon de la rue, en partie courante, selon un maillage en 5 x 3 x 6 cellules dont les dimensions sont données à la figure 4.

La géométrie de la rue est simplifiée sans prise en considération d'éléments spécifiques de façade tels que balcons ou anfractuosités, ainsi que les obstacles éventuels au niveau du sol. Cependant, pour permettre un

Figure 3 Schématisation du couplage des phénomènes thermoaéraulique

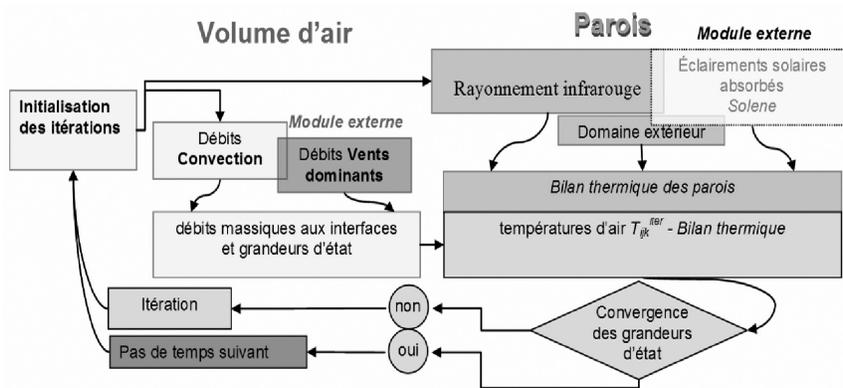
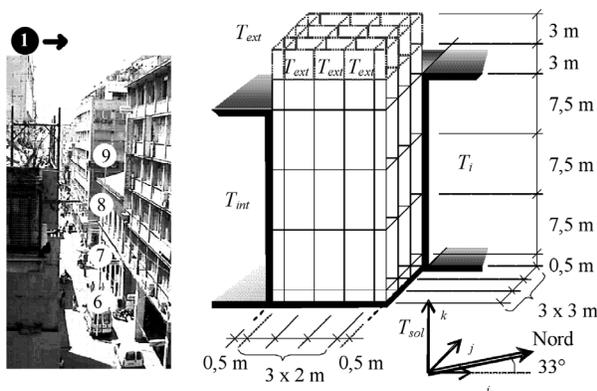


Figure 4 Maillage du tronçon d'étude de la rue Dervenion (photo de gauche) selon les directions *i, j* et *k*



calcul plus précis des échanges convectifs, au niveau des parois, le maillage est resserré; en effet le flux de chaleur convecté dépend de l'écart entre la température de la surface et la température moyenne de l'air proche de cette surface. Une modélisation précise de l'écoulement d'air près des façades nécessiterait une description complète de la forme de la surface ainsi que l'intégration d'un modèle complémentaire de couche limite. Dans le sens longitudinal, le maillage est décomposé en trois tronçons, les conditions en pression du tronçon central sont alors définies en fonction des conditions atmosphériques déterminées par la simulation de part et d'autre de ce tronçon. Le volume de la rue est ainsi partitionné en trois zones principales dans la hauteur, ce qui permet d'étudier les récirculations principales ainsi que de différencier l'évolution des températures et des flux de chaleur en partie basse, centrale et haute de la rue. Un niveau intermédiaire de cellules a été défini au niveau des toitures de façon à prendre en compte les transferts entre la cavité du canyon et la couche limite atmosphérique qui est considérée ici comme un puits et dont la température est imposée à la température extérieure du site.

Aux limites, la température d'air extérieur au volume étudié est définie par les données météorologiques du site sur la période considérée. L'intérieur des bâtiments est supposé maintenu en température par un système de conditionnement des ambiances à  $T_{int} = 25^{\circ}\text{C}$ , sachant que sur la période de simulation la température extérieure du site varie de  $25^{\circ}\text{C}$  à  $35^{\circ}\text{C}$  environ.

### Du microclimat urbain à la demande énergétique du bâtiment

Le calcul des charges climatiques sur le bâti peut être mené traditionnellement à partir des données météorologiques de l'évolution de température, donnée ici par la station météorologique sur 28 jours (ici sur le site de l'université d'Athènes). Mais, du fait de l'îlot de chaleur urbain (Landsberg, 1979 et 1981; Oke, 1987) la température extérieure et donc les charges climatiques peuvent être fortement différentes sur le site considéré. Nous avons donc développé une simulation de l'interaction entre le microclimat et le bâti (Bozonnet, 2005), la zone de la rue étant partitionnée selon la figure 4.

Pour une étude de système de climatisation, différentes charges enthalpiques doivent être déterminées dont principalement les charges dues à l'utilisation des locaux, les apports par renouvellement d'air et les apports par transmission par les parois. Dans l'étude simplifiée du microclimat de la rue canyon réalisée, la modélisation des locaux a été très simplifiée et seule la charge thermique de conduction au travers des façades est ici modélisée. L'impact réel est sous-estimé car les apports dus aux vitrages et au renouvellement d'air ne sont pas pris en considération et participent généralement de façon importante à la charge totale. Toutefois cette première approche permet d'estimer l'impact des différents niveaux de précision dans la prise en compte des phénomènes météorologiques sur le dimensionnement et la consommation énergétique liée à la climatisation.

### *Calcul de la demande énergétique sur la base de données météorologiques standards*

Dans une première approche, de façon simplifiée les différents flux thermiques dans les parois sont calculés avec une température d'air imposée dans le volume du canyon et égale aux données de référence de la station météorologique, comme représenté à la figure 5.

Le calcul d'ensoleillement des façades est réalisé ici à partir du logiciel Solene, les effets de masque étant pris en compte dans la simulation. La charge thermique est calculée au nu intérieur de la façade pour chaque niveau du maillage, indice  $k$ , à chaque pas de temps horaire à partir d'un modèle simplifié 3R2C (Roux, 1984). Les flux thermiques calculés heure par heure, intégrés ici pour chaque journée, nous permettent d'obtenir la demande énergétique quotidienne, exprimée en wattheure par mètre carré de paroi et par jour, liée aux transferts en façade. L'évolution de cette demande énergétique pour la façade nord et la façade sud est représentée à la figure 6 dans le cas où la température extérieure  $T_{ext}$  est donnée par la station météorologique de référence. Dans la suite de l'étude, cette simulation à partir de la température donnée par la station météorologique est désignée comme le cas de référence, référence par rapport à laquelle sont comparés les résultats des autres cas de simulation.

Les conditions d'ensoleillement quotidiennes étant régulières sur les 28 jours d'étude, les variations de la demande énergétique sont principalement dues aux varia-

tions de température. Ces évolutions sont similaires entre les différents niveaux de la façade, et seule l'amplitude varie du fait des masques et de l'ensoleillement variable suivant la hauteur. La demande énergétique en façade Nord et Sud suit aussi la même évolution, la différence d'exposition expliquant la variation d'amplitude. Pour la façade Nord l'énergie totale ainsi calculée sur les 28 jours est de 5.602 Wh/m<sup>2</sup>, avec en partie basse, indice  $k = 0$ , 3.990 Wh/m<sup>2</sup> et en partie haute,  $k = 3$ , 7.928 Wh/m<sup>2</sup>, soit près de 99 % de plus. Pour la façade sud, l'énergie calculée atteint 6.936 Wh/m<sup>2</sup>, soit 24% de plus qu'en façade nord, avec 4.062 Wh/m<sup>2</sup> en partie basse et 10.683 Wh/m<sup>2</sup> en partie haute, soit 163% de plus. L'impact de l'ensoleillement est en effet beaucoup plus important sur cette dernière façade. Le troisième jour, l'énergie calculée est maximale avec 300 Wh/m<sup>2</sup> en façade nord et 347 Wh/m<sup>2</sup> en façade sud soit une différence de 17% seulement. L'écart entre les deux façades est effectivement dû aux journées où la charge est plus faible.

*Calcul de la demande énergétique couplée avec l'évolution du microclimat et prise en compte de l'impact du système de climatisation*

Dans cette partie, le cas de la rue Dervenion est repris en considérant que les locaux sont climatisés par des systèmes simples, de type monobloc de fenêtre ou «windows», représentés selon le maillage de la rue à la figure 7.

Le fonctionnement de ces systèmes est alors couplé avec la simulation thermoaéraulique, ce qui permet d'estimer l'impact de leur fonctionnement sur la température dans la rue. La température intérieure est maintenue à 25°C et, tous les locaux étant climatisés, les échanges par les parois autres que la façade sont négligés, ainsi que toutes les autres charges. Le condenseur, échangeur fluide frigorigène/air, se situe en façade, en vis-à-vis de l'évaporateur situé à l'intérieur du bâtiment. De façon simplifiée, on suppose que l'énergie thermique absorbée par la fa-

Figure 5  
Calcul simplifié des charges climatiques en différents niveaux de la façade avec une température extérieure d'air dans le canyon définie par des données météorologiques

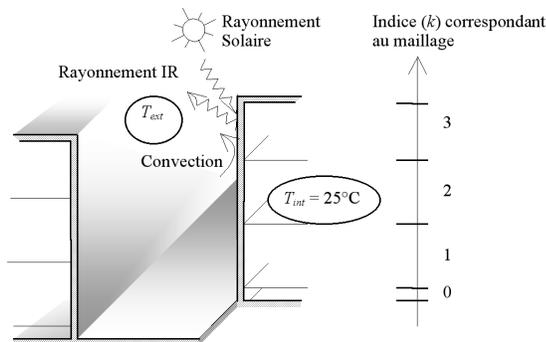
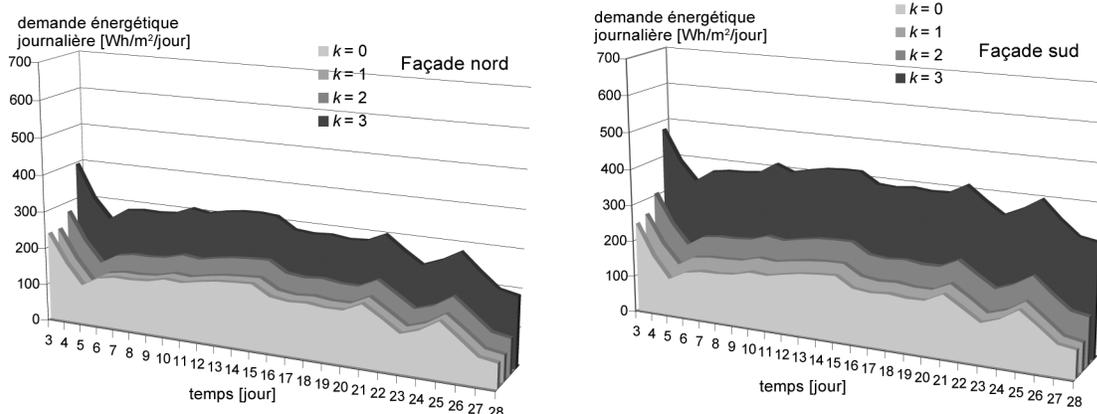


Figure 6  
Évolution de la demande énergétique quotidienne de climatisation en façade par niveau dans la rue en Wh/m<sup>2</sup> par jour sur la période de simulation, sur la base des données météorologiques de référence



çade est échangée par le condenseur avec l'air dans le volume de la rue. Aussi pour la cellule adjacente à la façade concernée une source de chaleur équivalente est prise en considération dans le bilan thermique de l'air. Ce flux thermique  $\phi_{source}$  est supposé égal au flux thermique calculé au nu intérieur de la façade  $S_{\nu}\phi_i$ . L'évolution calculée de la température d'air dans le canyon suit une évolution similaire à l'évolution sans condenseur en façade, mais avec des pics de température plus marqués. Cette différence observée s'accroît d'autant plus que la température est supérieure à 25°C. Les écarts de température diurnes sont au maximum de 9°C, comme pour le cas sans climatiseur, mais plus élevés en moyenne avec 6°C.

L'évolution de la demande énergétique quotidienne en façade obtenue par cette simulation, figure 8, est similaire à la précédente, les pics étant plus marqués, de même que pour les températures.

Sur la période de 28 jours la façade nord et la façade sud ont une demande énergétique de 8.595 Wh/m<sup>2</sup>

et 10.116 Wh/m<sup>2</sup>, soit 53% et 46% de plus que pour le cas de référence. Cet écart est aussi nettement supérieur à celui calculé sans système de climatisation, ce qui montre bien l'impact du système de climatisation sur la température extérieure et donc sur la demande énergétique calculée. La demande énergétique quotidienne maximale est ici aussi relevée pour le 14<sup>ème</sup> jour de simulation avec 422 Wh/m<sup>2</sup> et 479 Wh/m<sup>2</sup>, soit 41% et 38% de plus que le cas de référence. La différence est nettement plus marquée que pour le cas sans système de climatisation.

Cet impact des systèmes de climatisation sur le microclimat urbain, évoqué en introduction, constitue une charge anthropique particulière car elle est plus ou moins amplifiée, en fonction des phénomènes d'inertie, lors des pics d'apport thermique mis en évidence sans système de climatisation.

L'étude menée dans cette partie démontre l'importance de la prise en compte de différents niveaux de précision, dans la définition des sollicitations climatiques sur

Figure 7  
Intégration simplifiée dans la simulation d'un système de climatisation de type «windows»

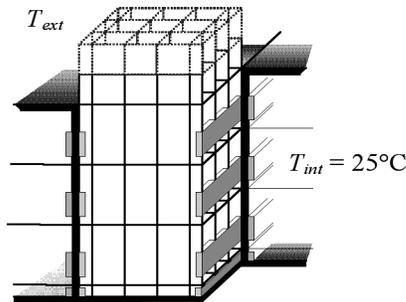
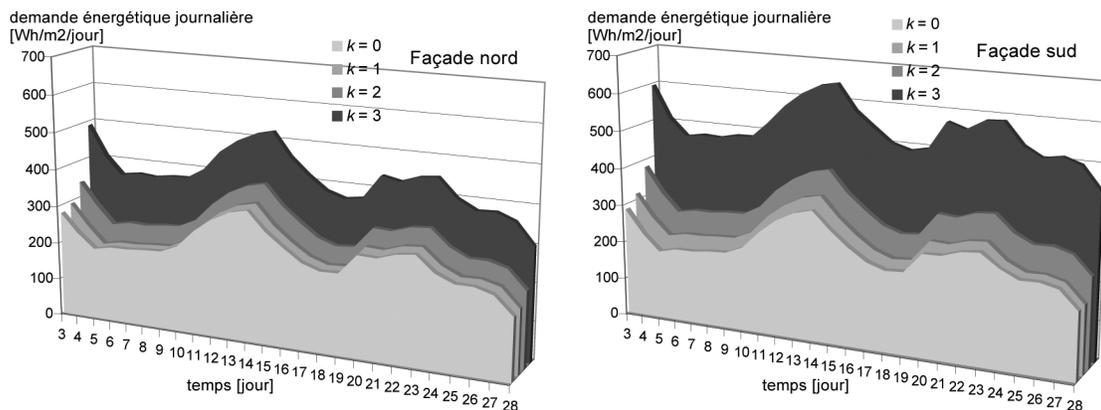


Figure 8  
Évolution de la demande énergétique quotidienne de climatisation en façade par niveau dans la rue en Wh/m<sup>2</sup> par jour sur la période de simulation, calculée à partir de la simulation aérodynamique couplée avec le fonctionnement théorique d'un système de climatisation



le bâti, sur la demande énergétique en façade. Cette approche peut être complétée par un couplage plus complet avec le fonctionnement d'un local et d'un éventuel système de traitement des ambiances ou d'un dispositif de rafraîchissement passif ou de ventilation naturelle. Les évolutions relevées ici ne tiennent en effet pas compte du couplage complet, mais dans le cas d'un dispositif comprenant des entrées d'air en façade les différentes tendances mises en évidence seraient certainement amplifiées.

## Conclusion

Les simulations réalisées sur ce cas typique de rue canyon en centre urbain nous ont permis d'aborder le phénomène de couplage thermoaéroulque nécessaire à l'évaluation du microclimat urbain et de son impact sur les bâtiments. La méthode simplifiée développée dans ce travail (Bozonnet, 2005) a été appliquée sur une période de 28 jours, l'ensemble des phénomènes climatiques étant simulés en régime variable. Les résultats de simulation ont montré un couplage complexe entre convection naturelle et convection forcée, notamment pour les périodes de vent faible. Cette approche a été appliquée à l'estimation des charges de climatisation en façade des bâtiments suivant différents niveaux de définition des conditions en température extérieure. La demande énergétique globale, sur toute la période, a été comparée au cas de référence défini par les conditions données par la station météorologique. Les résultats obtenus, ont démontré l'importance de l'effet d'îlot de chaleur, ainsi que de la prise en compte des phénomènes de transfert thermoaéroulque dans la rue sur la demande énergétique. Pour le cas de la façade sud cette différence est élevée par rapport au cas de référence. Le choix d'une température extérieure fixée peut alors donner des résultats fortement sous-estimé, cas de référence,

ou fortement surestimés, cas d'une température de référence au dessus des toitures. Enfin, le couplage de cette modélisation avec un modèle simplifié de fonctionnement de climatiseur en interaction avec la rue montre l'impact non négligeable de cette interaction sur le microclimat et donc sur la demande énergétique finale.

Pour améliorer cette modélisation, une prise en compte plus complète des charges anthropiques en milieu urbain ainsi qu'une meilleure définition des conditions limites et du couplage avec le bâti peut être envisagée. Cette approche pourrait aussi être couplée avec un modèle de plus grande échelle englobant l'ensemble de la ville, type de modélisation appelée aussi multi-échelle. Par ailleurs, des études expérimentales complémentaires permettraient d'étudier le phénomène d'îlot de chaleur de façon plus précise et sur de plus longues périodes. La mesure des transferts de masse et de chaleur dans la rue confrontée aux résultats de simulation permettrait de valider plus complètement les simulations. Enfin l'étude de différents systèmes de conditionnement des ambiances intérieures, dont leur consommation effective, permettrait d'établir la capacité de notre approche à discriminer correctement différentes solutions architecturales ou des choix de systèmes.

Notre approche nous permet en effet d'envisager des études paramétriques sur les constructions, le traitement des surfaces, ainsi que sur le choix et l'élaboration d'un système de traitement des ambiances intérieures et l'étude de scénarii de fonctionnement sur des saisons complètes. L'ensemble du travail réalisé dans cette étude ouvre de nombreuses perspectives dans l'étude énergétique des bâtiments et des microclimats urbains: étude de systèmes alternatifs à la climatisation (p.ex. ventilation naturelle), optimisation de systèmes et de matériaux de construction, traitement du microclimat urbain et des surfaces urbaines (p.ex. impact de la végétation ou de plans d'eau).

## Références bibliographiques

Antoine M.-J. et Groleau, D. (1998) Assessing solar energy and environmental variables in urban outdoor spaces: a simulation tool. Proceedings of EuroSolar, 5th European Conference on solar energy in architecture and urban plan, Bonn, Germany; 27-30 may 1998: pp. 108-110.

Bozonnet, E. (2005) PhD thesis: *Impacts des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments - Cas de la rue canyon*. Université de La Rochelle. La Rochelle.

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 (1): pp. 10-24.

- Bozonnet, E.; Wurtz, E.; Belarbi, R. et Allard, F. (2002 ) Simulation thermo-aéraulique du microclimat urbain à l'échelle d'une rue de type canyon. Proceedings of IBPSA France, Paris; 17-18 octobre.
- Georgakis C. et Santamouris M. (2005 ) "Wind and Temperature in the Urban Environment", in C. Ghiaus and F. Allard, *Natural ventilation in the urban environment - assessment and design*: James and James: pp. 81-102.
- Landsberg H. E. (1979 ) Atmospheric changes in a growing community (the Columbia, Maryland experience) *Urban Ecology*, 4 (1): pp. 53-81.
- Landsberg H. E. (1981 ) *The urban climate*. New-York: A Subsidiary of Harcourt Brace Jovanovich, Publishers.
- Oke T. R. (1987 ) *Boundary layer climates*. University Press, Cambridge.
- Roux J.-J. (1984 ) PhD thesis: "*Proposition de modèles simplifiés pour l'étude du comportement thermique des bâtiments*": INSA de Lyon".