

Topographie et climatologie urbaine

■ Georges NAJJAR - Pierre KASTENDEUCH - Pierre GRUSSENMEYER

MOTS-CLÉS

Topographie, climatologie, environnement, MNT, MNE, modélisation, géométrie

Le présent article expose les éléments de base de la climatologie urbaine et son évolution. Il met en évidence le rôle prépondérant que joue la géométrie urbaine

comme facteur explicatif mais aussi comme maillon essentiel dans la modélisation des processus radiatifs énergétiques et dynamiques à l'échelle du canyon urbain, du "Quartier" et de la ville.

Introduction

Selon un rapport publié par le FNUP en 2007, le taux d'urbanisation a franchi les 50 % et confirme une mutation profonde de la société humaine avec un passage d'une société majoritairement rurale à une société majoritairement urbaine. Cette tendance est amenée à s'accroître dans les prochaines années où le pourcentage de la population urbaine devrait se situer au-dessus de 60 % vers 2030. Il y aurait ainsi autant de citoyens dans le monde que d'habitants sur terre en 1987 selon ce même rapport.

L'un des faits marquants est que la population urbaine se concentre sur une surface extrêmement réduite (inférieure à 5 % de la surface continentale selon les spécialistes) et très fortement aménagée. Comparées aux zones rurales voisines, les surfaces urbaines présentent de nombreuses caractéristiques propres :

- Des bâtiments avec des formes et des dimensions variables et une organisation spatiale le plus souvent hétérogène. Cette géométrie est la source d'une très forte rugosité qui renforce la turbulence mécanique et accentue les phénomènes d'échange verticaux entre la surface et l'atmosphère sous-jacente.
- Les matériaux artificiels utilisés augmentent l'imperméabilité des surfaces urbaines et modifient profondément leurs caractéristiques thermiques et radiatives. Dans la majorité des villes, les surfaces d'eau libres et les zones végétalisées sont le plus souvent très réduites.
- Les activités humaines, à travers les différents phénomènes de combustions, rejettent dans l'atmosphère urbaine des quantités importantes de polluants (gaz, aérosols,...) de chaleur et de vapeur d'eau. Cette source anthropique de matière et d'énergie, vient s'ajouter à la production naturelle et induit des modifications non négligeables des caractéristiques de l'atmosphère urbaine.

La présence des zones urbaines, en modifiant profondément les propriétés de la surface, perturbe les échanges d'énergie et de matière entre celle-ci et l'atmosphère et induit des pertur-

bations notables du climat à l'échelle locale. Si les phénomènes de pics de pollution et les épisodes orageux violents sont les manifestations les plus médiatiques de ces perturbations, le phénomène de l'îlot de Chaleur Urbain a été le premier mis en évidence depuis 1833 et l'étude de L. Howard sur le climat de Londres (Howard, 1833). Il est aussi celui qui a été le plus étudié et le mieux documenté menant progressivement à la création d'une nouvelle branche de la climatologie appelée climatologie urbaine. Cette branche a pour objectif d'étudier le fonctionnement de l'atmosphère urbaine et son impact sur le climat régional afin de comprendre et d'améliorer les conditions de vie et de confort dans les villes.

Si les lois physiques qui gouvernent l'atmosphère sont les mêmes au-dessus des villes et des campagnes voisines, la principale différence réside dans les caractéristiques de la surface particulièrement dans les zones urbaines où la géométrie des bâtiments représente un facteur essentiel dans la détermination des caractéristiques climatiques des zones urbanisées. Ainsi, et depuis de longues dates, les climatologues se sont évertués à introduire les caractéristiques géométriques dans leurs travaux sur la climatologie urbaine, d'abord à travers des indices synthétiques simples puis, avec le progrès des moyens de calcul, par l'utilisation des Modèles Numériques d'Élévation (MNE). Cette évolution a conduit naturellement les climatologues à chercher des collaborations de plus en plus fortes avec les topographes et à introduire progressivement, dans leurs études de climatologie urbaine, des modèles de plus en plus sophistiqués et précis ainsi que des indices géométriques complexes.

Définition du phénomène de l'îlot de Chaleur Urbain

L'îlot de Chaleur Urbain (ICU) peut être défini comme une anomalie thermique, créée par la présence de la ville, et révélée par la différence de température entre la zone urbaine et les zones rurales voisines. Si cette différence est en faveur de la ville on parle d'îlot de Chaleur Urbain (ICU) et dans le cas contraire d'îlot de Fraîcheur Urbaine (IFU).

A ses débuts, l'étude de l'ICU était basée sur la comparaison de longues séries statistiques des températures moyennes permettant de détecter les modifications dues à la présence de la ville et de son évolution. Cette technique était combinée avec la comparaison des extrêmes journaliers enregistrés dans la ville avec ceux de la campagne voisine. L'arrivée des enregistrements automatiques a fait évoluer les études en permettant une comparaison des températures mesurées simultanément sur les différents sites (ville et campagne, *figure 1*). C'est cette différence instantanée qui est actuellement admise pour la définition et l'étude de l'ICU.

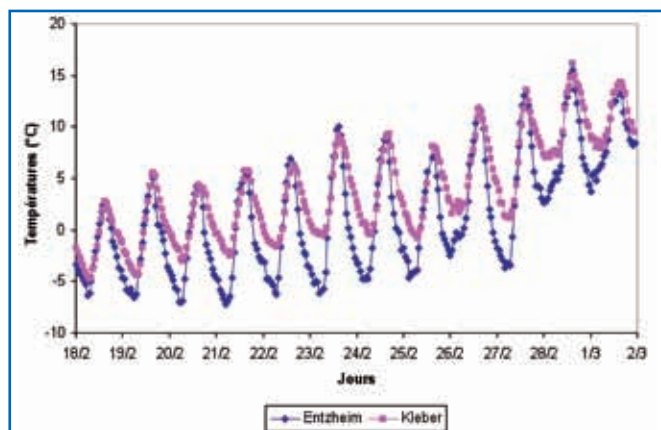


Figure 1. Définition de l'Îlot de Chaleur Urbain: différence instantanée de température entre une station rurale (Entzheim) et urbaine (Kléber).

Depuis plusieurs décennies on sait que l'ICU est sous la dépendance des facteurs climatiques et principalement la vitesse du vent et la nébulosité. Il trouve son expression maximale par ciel clair et temps calme ou vent très faible. Il manifeste une évolution journalière caractéristique avec un minimum le jour (différence de température très faible voire en faveur de la campagne) et un maximum nocturne autour de minuit.

Si les facteurs climatiques jouent un rôle prépondérant, d'autres facteurs ont été mis en évidence d'une manière empirique. Ainsi l'ICU est fonction de la taille de la ville (figure 2).

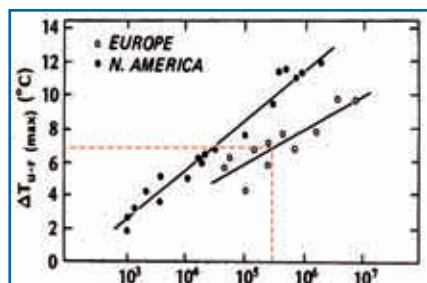


Figure 2. Influence de la taille de la ville (exprimée par le nombre d'habitants) en abscisses sur l'intensité de l'Îlot de Chaleur Urbain ΔT_{u-r} en ordonnées (Oke, 1987).

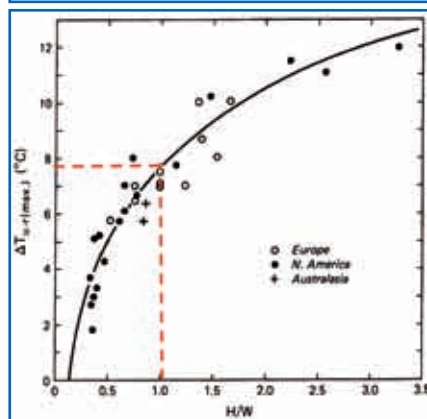


Figure 3. Influence de la géométrie exprimée par le rapport H/W, H étant la hauteur moyenne des bâtiments et W la largeur de la rue (Oke, 1987).

Il dépend aussi de sa fonction (ville industrielle, ville-dortoir...) et de sa géométrie en particulier celle du centre (figure 3), de l'occupation du sol et de la latitude. Sa distribution spatiale (Oke, 1987) est fortement liée à l'occupation du sol, avec un maximum situé dans la zone où la densité du bâti est maximale, généralement le centre-ville (rôle de la

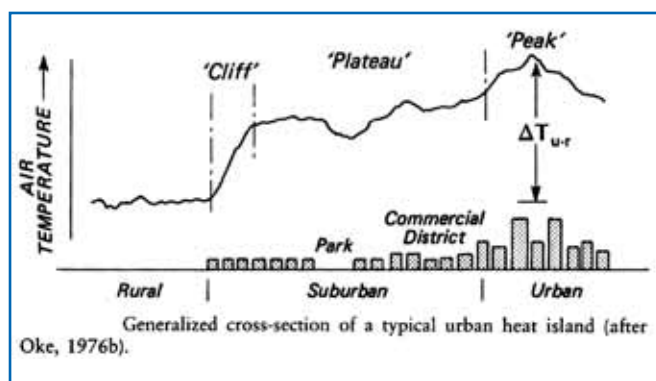


Figure 4. Evolution spatiale de l'Îlot de Chaleur Urbain le long d'un transect entre le centre de la ville et la campagne voisine (Oke, 1987).

géométrie), un gradient très fort à la frontière de la zone rurale, et entre les deux, une faible variation de la température avec des irrégularités aisément explicables par l'occupation du sol (figure 4).

Les méthodes d'étude en climatologie urbaine

À l'instar des autres domaines de la climatologie, la climatologie urbaine ne fait pas exception, et repose essentiellement et prioritairement sur les observations directes. Mais cette approche, qui de premier abord semble simple à mettre en œuvre, rencontre de nombreuses difficultés et doit relever deux défis majeurs :

- Un défi technique. En effet l'installation des postes de mesure doit obéir à des règles précises définies par les services météorologiques. Le respect de ces règles en milieu urbain est souvent très difficile sinon impossible, ce qui pose de nombreux problèmes pour le choix des sites, l'installation du matériel et la pertinence des résultats obtenus.
- Un défi conceptuel. L'un des aspects importants à la base de la climatologie urbaine est l'évaluation de la perturbation locale du climat régional causée par la présence de la ville. Ceci suppose en toute logique des mesures avant et après l'installation de la ville et tout au long de son évolution. Cette démarche, impossible à réaliser, a été remplacée par des études comparatives des conditions climatiques qui règnent à l'intérieur de la ville et dans la zone rurale voisine supposée être représentative du climat régional non perturbé.

Dans les premiers temps les études comparatives ont porté essentiellement sur des variables simples comme la température et l'humidité. Cette approche, qualifiée souvent d'empirique ou statistique, permet d'identifier le phénomène, de décrire son évolution temporelle, et déterminer sa répartition spatiale. Elle peut aussi, par le biais de techniques statistiques, montrer des liens importants entre certains paramètres (comme la taille, la géométrie du centre, la vitesse du vent...) et l'ICU. Par contre cette démarche n'est pas capable de déterminer et d'expliquer les processus physiques qui sont à l'origine de l'ICU et qui ne peuvent être appréhendés que par l'analyse détaillée des bilans radiatifs et d'énergie.

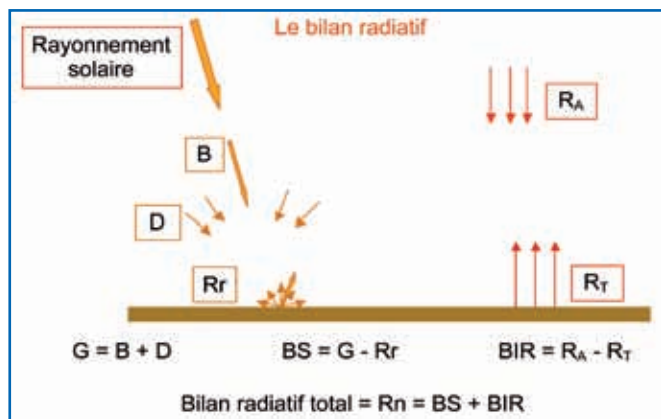


Figure 5. Schéma du bilan radiatif d'une surface. BS est le bilan du rayonnement solaire et BIR le bilan du rayonnement Infrarouge. Les autres termes sont explicités dans le texte.

■ Les bilans radiatif et d'énergie

L'équation du bilan radiatif d'une surface (figure 5) s'écrit :

$$R_n = (1-a)G + R_A - R_T$$

Avec :

R_n : bilan radiatif total ou rayonnement net en $W.m^{-2}$

G : le rayonnement solaire global $W.m^{-2}$. C'est la somme du rayonnement direct B et du rayonnement diffus D .

a : albédo de la surface

R_A : rayonnement atmosphérique en grandes longueurs d'ondes $W.m^{-2}$

R_T : rayonnement terrestre en grandes longueurs d'ondes $W.m^{-2}$

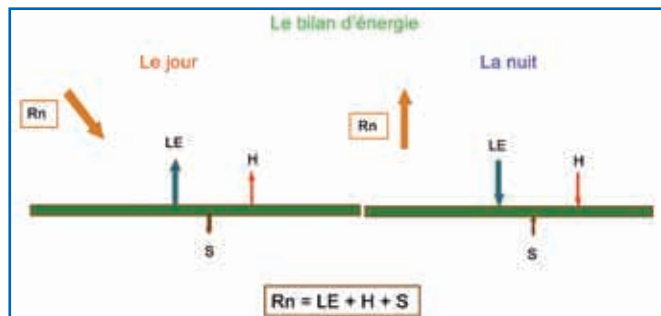


Figure 6. Schéma du bilan d'énergie au niveau d'une surface naturelle.

Le rayonnement net représente l'énergie radiative nette disponible au niveau de la surface et qui sera répartie en trois flux de chaleur selon l'équation du bilan d'énergie (figure 6) :

$$R_n + A = H + LE + S$$

Avec :

A : l'énergie anthropique dégagée dans la ville (non mesurée et estimée le plus souvent de façon indirecte)

H : flux de chaleur sensible qui contribue à l'échauffement direct de l'atmosphère

LE : flux de chaleur latente ou la quantité d'énergie absorbée par l'évapotranspiration

S : flux de chaleur dans le sol qui conduit la chaleur en profondeur par conduction

Les bilans radiatif et d'énergie sont sous la dépendance de deux catégories de facteurs :

- Le forçage externe représenté par l'énergie radiative incidente

(solaire et atmosphérique), et les conditions synoptiques qui commandent les masses d'air. Ce forçage externe est le même au-dessus des zones urbaines et les campagnes voisines.

- Les caractéristiques de la surface, radiatives (absorption, réflexion, émission), thermiques (conductivité, inertie thermique), dynamiques (rugosité) et hydriques (degré de disponibilité de l'eau à la surface). Ces caractéristiques, en contrôlant les échanges avec l'atmosphère modifient les propriétés de la masse d'air dans les basses couches et contribuent à la création d'une couche limite d'équilibre propre à la surface considérée.

Dans les zones urbaines, la surface est caractérisée par une forte rugosité due à la présence de bâtiments de différentes tailles et formes, alternant ou non avec des zones végétales, des routes et des parkings. Cette structure tridimensionnelle avec une forte proportion des surfaces verticales et une augmentation substantielle des surfaces d'échange avec l'atmosphère (Oke, 1981), modifie profondément la réponse radiative et énergétique des surfaces urbaines en réduisant la réflexion (figure 7) et la perte par rayonnement infrarouge (figure 8). Elle a pour conséquence une nouvelle organisation de la couche limite urbaine où on distingue deux grandes parties (Oke, 1976) :

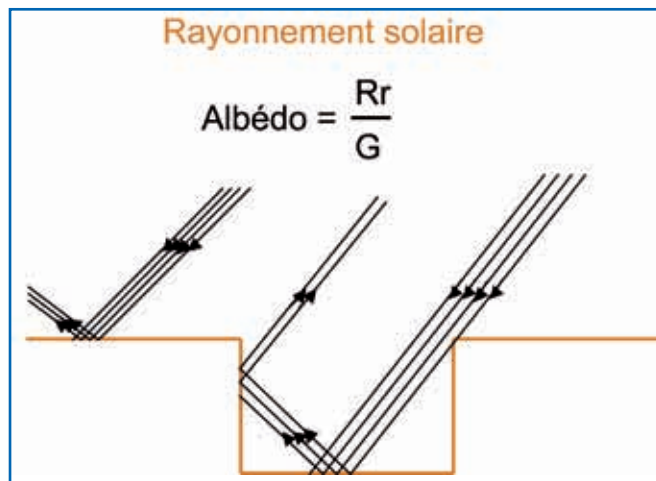


Figure 7. Schéma représentant la modification de l'albédo par une surface urbaine.

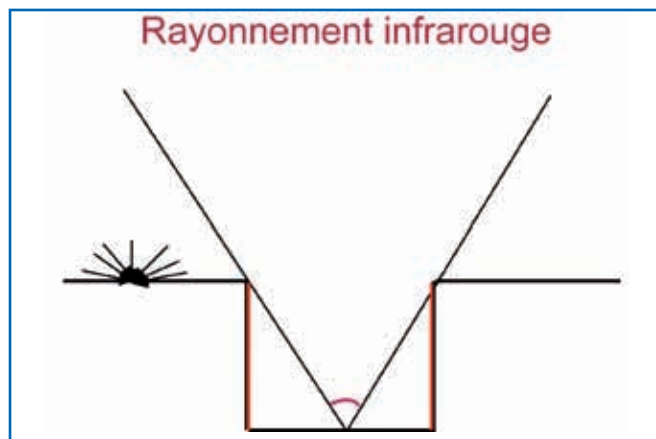


Figure 8. Schéma représentant le rôle de la géométrie dans la réduction du rayonnement infrarouge émis par la surface urbaine.

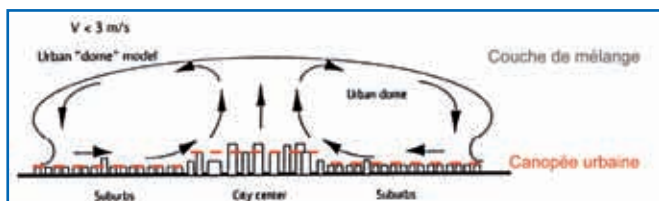


Figure 9. Schéma représentant la couche limite urbaine (Mestayer & al).

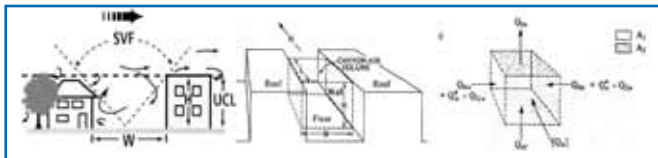


Figure 10. Schéma représentant le canyon urbain et ses éléments (Oke).

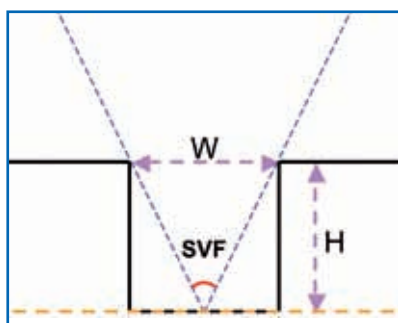


Figure 11. Caractérisation de la géométrie d'un canyon urbain. Les paramètres sont explicités dans le texte.

La canopée urbaine entre la surface du sol et la hauteur moyenne des bâtiments (figure 9). C'est la couche dans laquelle nous vivons et où se produit la majorité des échanges. Elle est caractérisée par une très grande hétérogénéité spatiale. L'unité d'étude adaptée à cette couche est le canyon urbain, entité limitée par la rue, les murs et les toits (figure 10). Elle est caractérisée par sa géométrie à travers des paramètres simples comme le rapport hauteur des bâtiments/largeur de la rue (H/W) (figure 11) ou le facteur de visibilité du ciel (Sky View Factor SVF) calculé pour le milieu de la rue. Dans cette unité les mesures expérimentales nécessitent des installations le plus souvent complexes et coûteuses (figure 12).

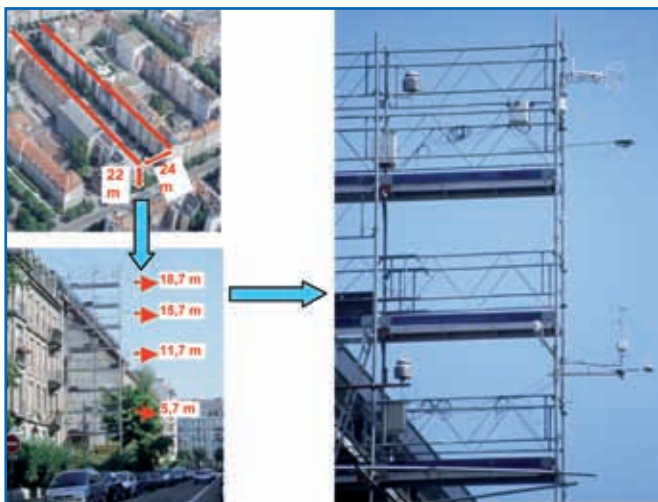


Figure 12. Mesures dans un canyon urbain.

La couche limite urbaine, située au-dessus, et dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs centaines de mètres (jusqu'à 1500 ou 2000 m). Sa structure est complexe du fait que les zones urbaines ne présentent pas une rugosité homogène sur toute leur étendue. Elles sont plutôt organisées en "Quartiers" plus au moins grands, ayant des rugosités différentes et créant chacun sa propre couche limite. Les couches limites des différents "Quartiers" se chevauchent et finissent par se mélanger créant ainsi la couche limite urbaine dont les caractéristiques sont représentatives de l'ensemble de l'agglomération. A cette échelle, l'unité d'étude est le "Quartier" considéré comme une juxtaposition de canyons de géométrie semblable mais de différentes orientations. Cette nouvelle unité possède des dimensions horizontales pouvant aller au-delà du km et une extension verticale allant jusqu'au sommet de la couche limite urbaine. Les mesures représentatives doivent être réalisées dans la couche limite, à une altitude au moins égale au double de la hauteur moyenne des bâtiments et nécessitent l'emploi de mâts ou des tours météorologiques (figure 13).

Les unités fondamentales précédemment définies peuvent être agrégées (canyon vers "Quartier" par exemple) permettant de passer d'une échelle à l'autre. A chaque échelle de mesure, l'élément possède ses propres bilans radiatif et d'énergie dont la variabilité spatiale va diminuer au fur et à mesure qu'on avance dans les échelles. Ainsi deux "Quartiers" auront vraisemblablement, des bilans radiatifs et d'énergie plus proches que ceux de deux rues d'orientations différentes ou encore de deux murs d'un même bâtiment différemment exposés.

La grande hétérogénéité horizontale qui caractérise les zones urbaines limite considérablement la représentativité spatiale de toute mesure ponctuelle et par la même occasion la portée de l'approche expérimentale basée uniquement sur les mesures. Pour pallier cette difficulté, les spécialistes de la climatologie urbaine ont adopté une démarche combinant, des mesures ponctuelles complètes sur un nombre limité de sites représentatifs, et des modèles mathématiques sophistiqués, adaptés à chaque échelle d'étude, et capables de calculer les bilans radiatif et d'énergie des zones étudiées.

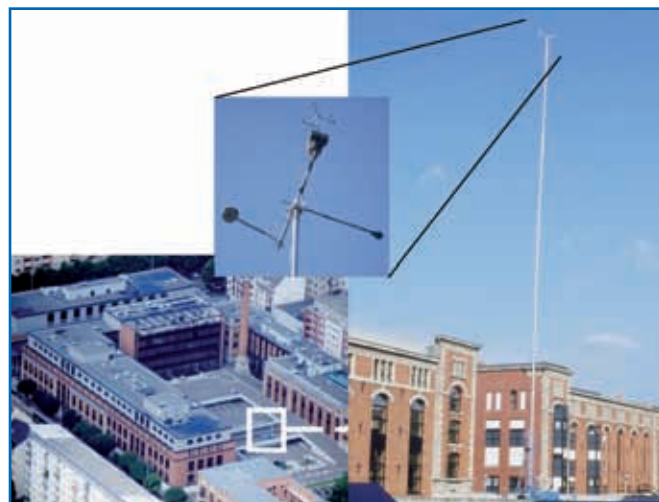


Figure 13. Mesures à l'échelle d'un "Quartier".

Les mesures réalisées sont prioritairement utilisées pour la mise au point et la validation des modèles.

Rôle de la géométrie dans les modèles utilisés en climatologie urbaine

La modélisation mathématique de l'atmosphère nécessite le découpage de celle-ci en une série de couches superposées verticalement. Chacune de ces couches est ensuite divisée en une multitude de cellules appelées mailles. Pour chacune de ces mailles, et pour chaque pas de temps, le modèle va calculer les flux entrants et sortants de matière et d'énergie ainsi que la production et la destruction de ces mêmes éléments à l'intérieur de la maille. En procédant ainsi, le modèle va permettre de déterminer la répartition spatiale, sur la zone étudiée, des différents paramètres météorologiques et de suivre leur évolution temporelle sur la période simulée. La précision des résultats obtenus va dépendre de la taille des mailles et du pas de temps de calcul. La puissance de calcul des ordinateurs n'étant pas illimitée, ces paramètres sont souvent déterminés en fonction de la taille de la zone à couvrir (dimension des mailles) et de la nature du phénomène climatique à simuler (pas de temps). Pour accélérer les calculs, des simplifications et des approximations sont nécessaires ce qui influence forcément la qualité et la précision des résultats. On comprend ainsi la multitude de modèles qui existent allant des modèles globaux (qui couvrent la planète avec des mailles supérieures à 50 km) aux modèles régionaux (couvrant un continent ou au moins plusieurs pays avec des mailles d'une vingtaine de km) et enfin les modèles locaux (l'échelle d'une région avec des mailles pouvant aller jusqu'à 2,5 km). Une dernière catégorie de modèles (des modèles de recherche), les modèles non hydrostatiques (à l'image du modèle Mésio-NH de Météo-France), capables de travailler à une échelle très fine pouvant aller jusqu'à 200 m. L'échelle de cette dernière classe de modèles correspond à celle du "Quartier" définie précédemment et explique leur utilisation dans la simulation du climat urbain. Les modèles de différentes échelles travaillent le plus souvent en mode emboîté, chaque modèle reçoit l'information nécessaire à son fonctionnement (appelée conditions aux limites) de celui qui est juste à l'échelle spatiale supérieure et fournit des informations similaires à celui qui a l'échelle spatiale inférieure (on parle de modèle père et modèle fils). Quelle que soit l'échelle spatiale, tous les modèles ont besoin de connaître, avec la meilleure précision possible, les échanges de masse et d'énergie entre la surface et l'atmosphère (conditions aux limites au niveau de la surface). Cette tâche est dévolue à une catégorie de sous-modèles appelés schémas de paramétrisation qui simulent ces échanges. Pour le bon fonctionnement des schémas de paramétrisation, les conditions de la surface doivent être décrites avec un degré de détail adapté à l'échelle spatiale concernée.

■ A l'échelle de la ville et du "Quartier"

Comme il a été signalé précédemment, ce sont les modèles méso-météorologiques non hydrostatiques qui sont adaptés à l'échelle de la ville et leur schéma de paramétrisation doit

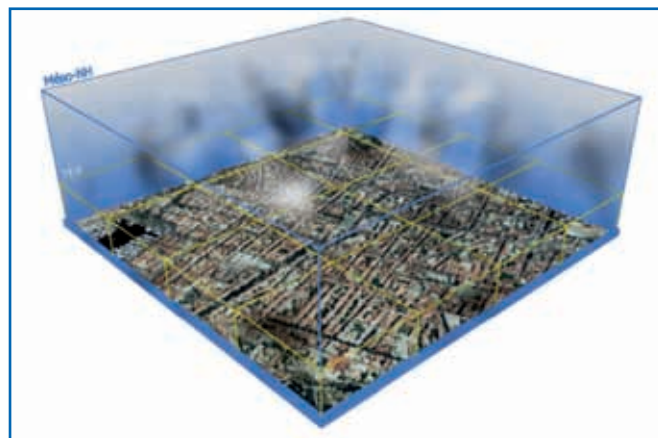


Figure 14. Schéma représentant le modèle Mésio-NH et son maillage (Météo-France).

contenir les informations nécessaires pour la prise en considération des surfaces urbaines dans les échanges avec l'atmosphère. Le modèle Mésio-NH (Météo-France) (figure 14) possède un schéma de surface appelé Surfex et composé de deux modules, le module TEB (Town Energy Budget) qui traite uniquement les surfaces urbaines (Masson, 2000), et le module ISBA (Interaction Soil-Biosphere-Atmosphere) qui traite uniquement des surfaces naturelles (végétales, plans d'eau, sols nus, etc...) et interagit avec le module précédent (Noilhan & Planton, 1989). Pour chacune des mailles, le modèle évalue le pourcentage de surface occupé par chaque type de couvert (surfaces urbanisées, forêt, culture, plan d'eau, sol nu,...) et applique à chacune d'elles le schéma adéquat (figure 15). Le résultat final pour la maille est obtenu par une pondération des résultats partiels par les surfaces respectives.

Dans le module TEB, la surface urbaine est caractérisée par une série de paramètres déterminés à partir d'une base de données de l'occupation du sol (le plus souvent Corine Land Cover) (figure 16). Il est possible d'utiliser des bases de données plus spécifiques de la région étudiée mais ceci nécessite un interfaçage avec le modèle. Parmi les paramètres utilisés on peut citer :

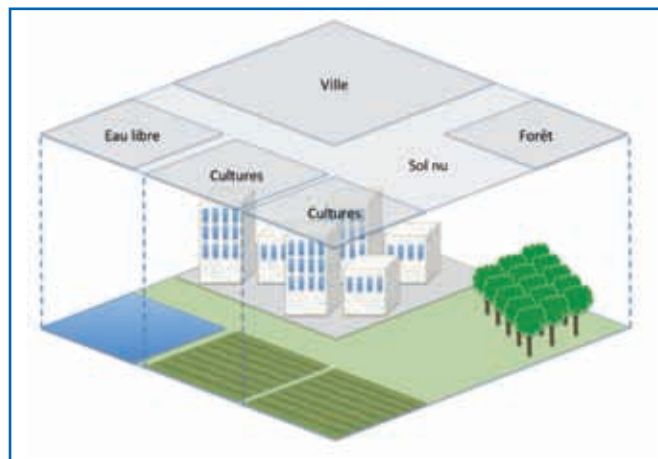


Figure 15. Représentation schématique d'une maille du modèle Mésio-NH.

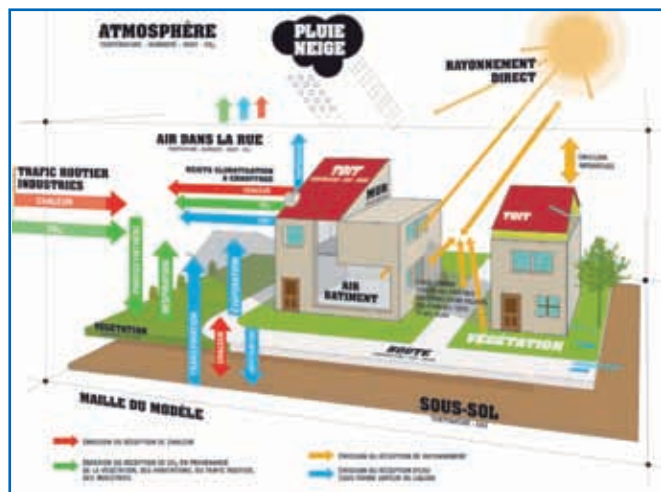


Figure 16. Représentation schématique du fonctionnement du module TEB (Town Energy Budget) Masson 2010.

- la fraction de la surface bâtie par rapport à la surface totale,
- hauteur moyenne des bâtiments,
- le rapport moyen de la hauteur des bâtiments/Largeur de rue,
- rapport des surfaces totales sur la surface au sol,
- la rugosité aérodynamique.

Le calcul est réalisé sur une rue moyenne représentative du "Quartier". Ce canyon moyen est composé de 3 types de surfaces élémentaires : 1 toit, 2 murs identiques et une rue. Il est supposé de longueur infinie et sans intersections avec d'autres rues. De plus on suppose l'isotropie de l'orientation (toutes les orientations sont présentes dans le quartier avec la même probabilité).

Chaque surface élémentaire du canyon peut être caractérisée par son albédo, son émissivité, sa capacité et sa conductivité thermique. Elle peut être décomposée en plusieurs couches avec des caractéristiques spécifiques pour chacune d'elles.

Le module calcule pour chacune des surfaces le bilan radiatif et le bilan d'énergie et transmet les résultats (moyennes pondérées) au modèle à travers une surface d'échange fictive située à la hauteur moyenne des bâtiments. Il tient compte dans ce calcul de l'énergie anthropique (trafic de voitures, industrie, chauffage domestique, etc.). De plus, il simule à l'échelle du canyon les différents paramètres climatologiques (température, humidité, vent,...), qui permettent de comprendre et d'étudier l'Îlot de Chaleur Urbain.

■ A l'échelle de la rue (canyon urbain)

Dans l'état actuel de leur développement, les modèles méso-météorologiques (y compris Méso-NH) ne sont pas capables de réaliser des simulations fines à l'échelle du canyon urbain. Pour tenir compte de tous les détails de la géométrie à cette échelle, on utilise une nouvelle catégorie de modèles à base physique très solide, avec deux variantes :

- La première basée sur les principes de la thermodynamique, peut simuler les bilans radiatif et d'énergie en tous points du canyon, on les appelle les modèles thermo-

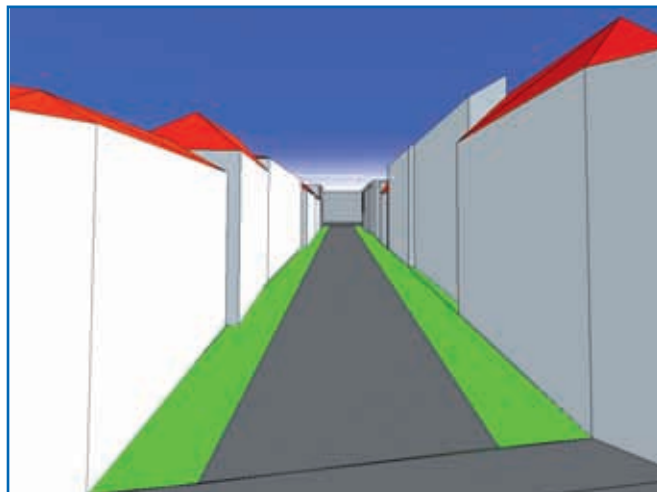


Figure 17. Représentation schématique d'une scène dans le modèle LASER/F.

radiatifs comme Laser/F (Kastendeuch et Najjar, 2009) ou Solene (Groleau et al, 2000).

- L'autre, basée sur les principes de la mécanique des fluides, simule avec une grande précision l'écoulement de l'air à l'intérieur du canyon comme le modèle Fluent (2006). Le plus souvent on réalise un couplage de ces deux variantes pour simuler tous les processus de microclimat en tout point de la rue.

Dans cette catégorie de modèles, la précision des résultats dépend de la reproduction la plus fidèle possible de la géométrie urbaine qui joue un rôle de premier ordre. Le domaine de simulation est considéré comme une scène tridimensionnelle (la rue) constituée d'objets (les murs, la rue, des arbres..., figure 17). Chaque objet est constitué de

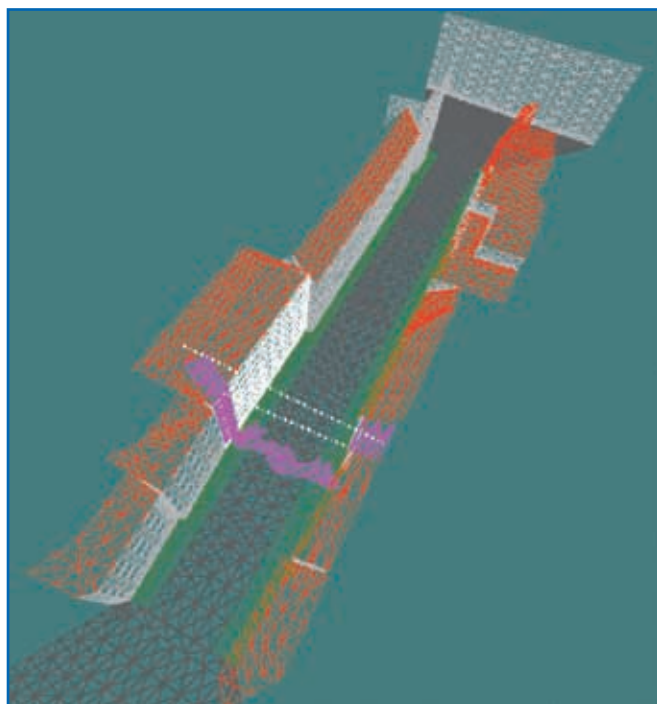


Figure 18. Triangulation de la scène précédente dans le modèle LASER/F.

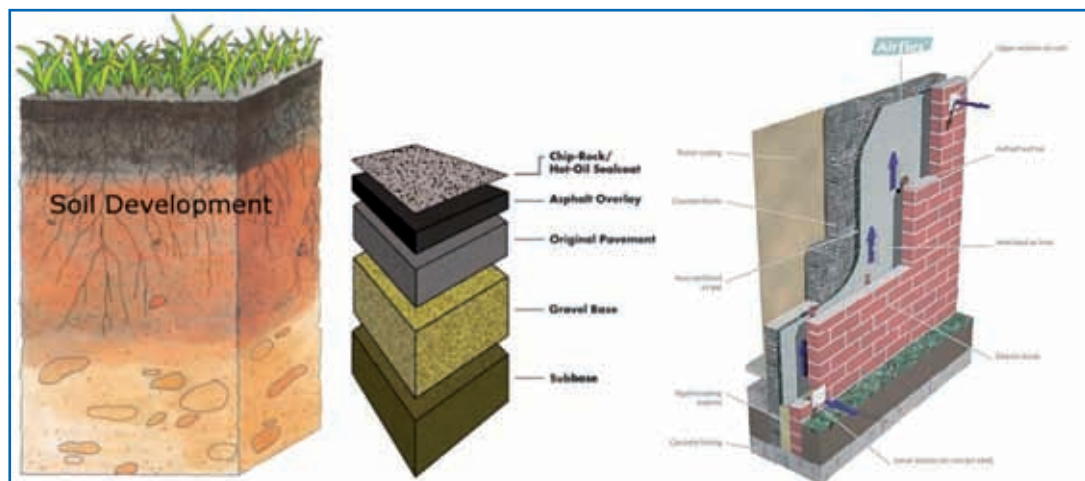


Figure 19. Caractérisation des différentes facettes de la scène dans le modèle LASER/F.

faces qui peuvent se présenter sous trois formes géométriques élémentaires: le triangle (3 côtés), le quadrilatère (4 côtés) ou le polygone (multiples côtés). Ces faces sont positionnées dans un repère orthonormé à trois dimensions (X,Y,Z), selon la convention suivante: l'axe des Y est positif vers le nord, l'axe des X est positif vers l'est et l'axe des Z est positif vers le ciel. Dans le modèle thermo-radiatif LASER/F, les faces sont automatiquement découpées en triangles (figure 18) qui à leur tour peuvent être subdivisés en triangles plus petits les facettes et tous les calculs sont réalisés pour le barycentre de la facette avec le résultat final affecté à la facette entière. Cette décomposition permet de tenir compte des objets les plus complexes se trouvant dans le domaine de simulation et la précision du calcul dépend de la taille retenue pour les facettes. Le plus souvent, celle-ci est un compromis entre la précision souhaitée et la lourdeur des calculs qu'elle génère. Chaque face d'un objet peut être multicouche et composée d'un empilement de matériaux différents, ce qui permet de construire des objets hétérogènes constitués d'un assemblage de murs, vitres, toits. Le sol est lui-même considéré comme un assemblage d'objets qui peuvent se présenter sous forme de nappe d'eau, d'herbe, de béton. Chaque matériau possède ses propres caractéristiques thermo-physiques (émissivité, réflectivité, capacité thermique, conductivité...). Les facettes héritent des propriétés physiques des faces dont elles sont issues (figure 19).

Le calcul du bilan radiatif pour chaque facette nécessite le calcul de chacune des composantes du rayonnement solaire (le rayonnement solaire direct, diffus, ou encore réfléchi par les autres éléments de la scène et du rayonnement infrarouge atmosphérique et terrestre (arrivant directement sur la facette ou après réflexion par les autres facettes). Le modèle tient compte de l'anisotropie du rayonnement solaire diffus mais suppose que le rayonnement infrarouge est isotrope.

Pour le calcul du rayonnement solaire, la position précise du soleil dans le ciel est déterminée à chaque pas de temps. De plus un facteur de visibilité (v), déterminé par un algorithme type "lancer de rayon", caractérise chaque facette et permet de préciser si la facette voit directement le soleil ou

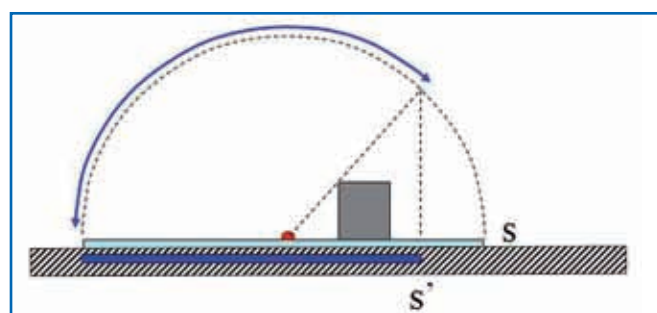


Figure 20. Facteur de visibilité du ciel SVF: rapport entre les surfaces S' et S .

si un obstacle se trouve entre les deux. Dans ce dernier cas un paramètre de transmissivité permet de caractériser le degré de transparence de l'obstacle et en tenir compte dans le calcul. Pour le calcul du rayonnement diffus atmosphérique un autre facteur géométrique caractérise chaque facette. Il s'agit du "facteur de visibilité du ciel" (figure 20) SVF (Sky View Factor), dont la valeur varie entre 0 et 1, et qui exprime la part de ciel visible par rapport à la demi-sphère céleste (qui correspond à un ciel visible depuis une face horizontale, sans obstacle à l'horizon). Le ciel étant considéré anisotrope, il est lui-même décomposé en facettes et chacune d'elles interagit avec les différentes facettes de la scène. Pour déterminer les échanges entre deux facettes il est nécessaire de les caractériser par un facteur géométrique appelé facteur de forme FF (figure 21) qui dépend de leurs surfaces respectives et des angles formés par leurs normales et le rayon vecteur qui relie leurs barycentres. Enfin, pour le calcul du rayonnement solaire réfléchi par

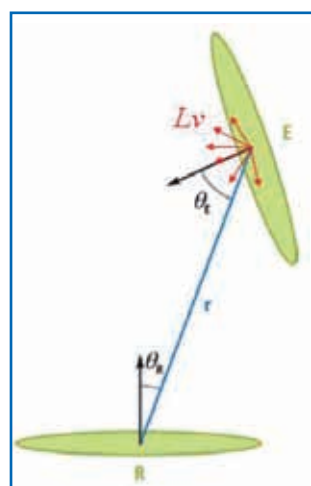


Figure 21. Définition du facteur de forme FF reliant deux facettes quelconques de la scène.

les autres facettes de la scène, le modèle utilise un algorithme itératif qui s'arrête quand la différence entre deux itérations est inférieure à un seuil fixé par l'utilisateur.

Le calcul des échanges radiatifs dans l'infrarouge utilise pour chaque facette, les résultats des calculs précédents du rayonnement solaire, les mêmes facteurs géométriques SVF et FF mais nécessitent aussi la connaissance des échanges d'énergie par conduction à travers les murs et par convection avec l'atmosphère du canyon. Dans ce cas, et à chaque itération, c'est l'équation du bilan d'énergie de la facette qui est évaluée en partant d'une condition initiale déterminée. Comme dans le cas du rayonnement solaire, le calcul s'arrête quand l'écart entre les résultats de deux itérations devient inférieur à un seuil fixé.

Il est important de préciser que les données d'entrée du modèle sont, en plus de la géométrie du canyon, les mesures du rayonnement solaire, de la température, de l'humidité et de la vitesse du vent.

Conclusion

Le présent article décrit brièvement le rôle que joue la géométrie de la ville dans le domaine de la climatologie urbaine. Au début des paramètres géométriques simples comme le ratio hauteur des bâtiments/largeur de la rue, étaient utilisés, de manière empirique, comme facteurs explicatifs de l'intensité de l'îlot de Chaleur Urbain.

Avec les progrès de l'informatique et l'évolution des modèles de prévisions météorologiques, la prise en compte détaillée de la géométrie a fait son apparition dans les schémas de paramétrisation de surface (maillon essentiel de tous les modèles de prévision) et permis aux modèles de mieux prendre en compte les surfaces urbaines. Ces modèles sont capables à l'heure actuelle de gérer, et à l'échelle des zones urbaines, des épisodes comme les canicules estivales ou les périodes de grand froid hivernal.

À l'échelle fine du canyon, des modèles spécifiques (thermo-radiatifs ou d'écoulement) prennent en compte tous les détails de la géométrie urbaine. Ils permettent de simuler avec précision tous les processus radiatifs et énergétiques à l'origine du microclimat urbain. Leur domaine de compétence ne se limite pas au seul champ de la climatologie mais embrasse d'autres domaines comme l'architecture, l'aménagement et les études de pollution.

À l'heure actuelle, et avec les progrès constants de l'informatique, les scientifiques travaillent à l'intégration de cette dernière catégorie de modèles dans les modèles de prévisions météorologiques. ●

Contact

Georges NAJJAR

Université de Strasbourg (UDS)
Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique
et de la Télédétection, LSIT UMR 7005 CNRS/UDS/INSA
georges.najjar@unistra.fr

Pierre KASTENDEUCH

Université de Strasbourg (UDS)
Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique
et de la Télédétection, LSIT UMR 7005 CNRS/UDS/INSA
pierre.kastendeuch@unistra.fr

Pierre GRUSSENMEYER

Institut National des Sciences Appliquées (INSA) Strasbourg
Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique
et de la Télédétection, LSIT UMR 7005 CNRS/UDS/INSA
pierre.grussenmeyer@insa-strasbourg.fr

Bibliographie

- FLUENT 2006** *Fluent 6.3 User Guide*. Fluent inc., Centerra Ressource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, USA.
- FNUP 2007** *Etat de la population mondiale en 2007*. consultable sur le site : <http://www.unfpa.org/swp/2007/french/introduction.html>
- GROLEAU D. 2000** *SOLENE un outil de simulation des éclairagements solaires et lumineux dans les projets architecturaux et urbains*. Colloque Artpa Rouen.
- HOWARD L. 1833** *The climate of London*. Second edition W. Phillips editor
- KASTENDEUCH P.P. and G. NAJJAR 2009** *Simulation and validation of radiative transfers in urbanised areas*. Solar Energy, 83 pp. 333-341
- MASSON V. 2000** *A physically based scheme for the urban energy budget in atmospheric models*. Boundary Layer Meteorology 94 pp. 357-397
- MASSON V., 2010** *Micro-climat urbain, la ville dans les mailles du modèle*. Revue Météo Le Magazine, n° 9 Mars 2010-05-30
- MESTAYER P. G. AND S. ANQUETIN, 1995** *Climatology of cities*. Third International Conference on Air Pollution- Air pollution 95- Actes du colloque pp. 1-35.
- NAJJAR G., P. KASTENDEUCH, M.-P. STOLL, J. COLIN, F. NERRY, N. RINGENBACH, J. BERNARD, A. DE HATTEN, R. LUHAHE, D. VIVILLE, 2004** *Télédétection, rayonnement et bilan d'énergie en climatologie urbaine à Strasbourg, le projet RECLUS*. La Météorologie, 46, pp 44-50
- NAJJAR G., P. KASTENDEUCH, N. RINGENBACH, J. COLIN, M.-P. STOLL, F. NERRY, J. BERNARD, A. DE HATTEN, R. LUHAHE, D. VIVILLE, 2005** *Bilan radiatif et d'énergie dans un canyon urbain*. Annales de l'Association Internationale de Climatologie, Vol. 2, pp 41-54 – 2005
- NOILHAN J. and S. PLANTON 1989** *A simple Paramétrisation of land surface processes for meteorological models*. Month. Weather Rev. 117 pp. 536-549
- OKE T.R. 1976** *The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands*. Atmosphere 14, pp. 268-277
- OKE T.R. 1981** *Canyon geometry and the nocturnal heat island. Comparison of scale model and field observations*. Journal of Climatology 1 pp. 237-254
- OKE T.R. 1982** *The energetic basis of the urban heat island*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 108 pp. 1-24
- OKE T. R. 1987** *Boundary Layer Climate*. Methuen 435p.

ABSTRACT

This paper presents basics and advances in urban climatology. It highlights that urban geometry plays a major part in the modelling and the explaining of the radiative processes and energy dynamics on the urban canyon, the district or the city scale.