Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville

Morgane COLOMBERT

Ingénieur et enseignant-chercheur, École des Ingénieurs de la Ville de Paris, Département Construction Environnement, 15 rue Fénelon, 75010 Paris, tel : 01 56 02 61 61, fax : 01 56 02 61 25, mail : morgane.colombert@eivp-paris.fr.

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION 3

II. LA FORMATION DU CLIMAT URBAIN 4

II.1 MODIFICATION DU BILAN D'ENERGIE THERMIQUE DE LA VILLE 8
II.1.1 Rayonnement net (Q) 10*
II.1.2 Flux de chaleur d'origine anthropique (Q_F) 11
II.2.2 Variation de la quantité de chaleur stockée (ΔQ_S) 11
II.2.3 Flux de chaleur sensible (Q_H) 12
II.2.4 Flux de chaleur latente (Q_E) 12
II.2.5 Flux de chaleur advectif (ΔQ_A) 12
II.3 MODIFICATION DU BILAN HYDRIQUE DE LA VILLE 12
II.4 ROLE DE DIFFERENTS FACTEURS DANS LA FORMATION DU CLIMAT URBAIN 14
II.5 SYNTHESE 16

III. METHODE ET MODELE 17

III.1. CHOIX DU MODELE 17
III.2. CHOIX DU SITE 21
III.3. CHOIX DES SIMULATIONS 22
III.3.1 Une journée estivale 22
III.3.2 Une journée hivernale 23
III.3.3 Tests de sensibilité 23
III.4. CHOIX DE L'ACTEUR : COLLECTIVITES LOCALES 24

IV. RESULTATS 25

IV.1. SIMULATIONS 25
IV.2. REFLEXIONS SUR LES MOYENS A DISPOSITION DES COLLECTIVITES TERRITORIALES FRANÇAISES POUR INTEGRER DANS LA CONCEPTION URBAINE DES CRITERES PERMETTANT D'INFLUER SUR L'ENVIRONNEMENT CLIMATIQUE 29
IV.2.1 PLU, SCOT et ZAC : quelle influence possible sur l'environnement climatique ? 32
IV.2.2 Démarches incitatives et informatives : des moyens à ne pas négliger 35

IV. CONCLUSION 36

BIBLIOGRAPHIE 39

Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville

Morgane COLOMBERT

RESUME

Le milieu urbain est à l'origine de processus radiatifs, thermiques, dynamiques et hydriques qui modifient le climat de la ville. La couche superficielle du sol, avec la présence plus ou moins importante de surfaces végétales ou d'eau, les activités humaines qui induisent des rejets de chaleur et de polluants, et la structure urbaine, avec des matériaux de construction et une certaine morphologie du cadre bâti, sont les principaux facteurs de cette modification.

Le bilan d'énergie thermique permet d'appréhender la majorité des perturbations générées par la ville. A l'aide du schéma *Town Energy Balance*, développé par Météo-France pour paramétrer les échanges en énergie et en eau entre les surfaces bâties et l'atmosphère, nous avons effectué des tests de sensibilité du bilan d'énergie à différents facteurs. Ces facteurs appartiennent à cinq domaines d'actions : le bâtiment, l'espace public, l'organisation urbaine, les activités industrielles et les transports.

Nos différentes simulations ont permis de confirmer le rôle prédominant des paramètres radiatifs dans le bilan d'énergie de la ville en été. Durant l'hiver, ce sont d'autres paramètres thermiques (isolation) qui ont la plus grande influence.

Les collectivités territoriales françaises ont à leur disposition plusieurs outils et moyens pour agir en faveur de leur environnement climatique et intégrer des facteurs influant sur le climat urbain : leurs domaines de compétence directe (voirie, bâtiments communaux, espaces verts, etc.), les documents stratégiques d'orientation (SCOT et PLU), les procédures d'aménagement (ZAC et lotissement), l'incitation et l'information de leurs citoyens et de leurs services (Agenda 21 local, Plan Climat Territorial, Approche Environnementale de l'Urbanisme). Elles ne peuvent cependant pas agir avec une liberté suffisante, compte tenu des limites contraignantes entre droit de l'urbanisme et droit de la construction et de l'habitat.

MOTS CLES

Climatologie urbaine, îlot de chaleur urbain, bilan d'énergie, Town Energy Balance, modélisation numérique, urbanisme réglementaire, urbanisme opérationnel, Agenda 21, plan climat.

AVANT-PROPOS

Le travail de recherche présenté ici est issu d'une thèse menée par Morgane Colombert (Colombert, 2008) et financée dans le cadre d'une convention CIFRE réunissant trois partenaires : Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée et l'École des Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP). Jean-Luc Salagnac, ingénieur de recherche au CSTB, Youssef Diab, professeur des Universités et directeur

scientifique de l'EIVP, et Denis Morand, maitre de conférence à l'Université Paris Est ont encadré Morgane Colombert lors de ce projet.

Le Centre National de Recherche en Météorologie a également été partenaire de ces travaux en mettant à disposition l'outil informatique Town Energy Balance (TEB) qui permet notamment de réaliser des bilans énergétiques et radiatifs d'une zone urbaine (Masson, 2000).

I. INTRODUCTION

Le climat intervient traditionnellement dans la conception du cadre bâti et de la ville. En effet, par le passé, la conception des bâtiments et, par extension, des villes s'est souvent faite dans une volonté d'adéquation au climat (Givoni, 1978). La forme du bâtiment, l'orientation des fenêtres (et l'ombre dont elles bénéficient), l'orientation et la couleur des murs, et la taille et la localisation des fenêtres (pour la ventilation et les apports solaires) se sont ainsi adaptées au climat des régions. De fait, chaque région, française ou du Monde, possède un habitat traditionnel dont la conception et la forme sont intimement liées au climat ainsi, bien sûr, qu'aux ressources locales (matériaux).

Inversement, le milieu urbain influe sur ce climat. Les villes modifient ainsi localement les paramètres climatiques et il est constaté qu'elles induisent notamment, au sein de leur territoire, une augmentation des températures en leur centre par rapport aux zones périphériques (Landsberg, 1979. Escourrou, 1991), d'où le concept d'îlot de chaleur, une diminution de la vitesse du vent (Sacré, 1983), une modification de la pluviométrie (Shepherd *et al.*, 2002. Jauregui et Romales, 1996), etc. Ces modifications ont des conséquences sur la consommation énergétique des bâtiments et l'efficacité de la climatisation naturelle (Santamouris *et al.*, 2004), la pollution atmosphérique (Sarrat *et al.*, 2006), le confort en extérieur (Steemers, 2006), la santé (Buechley *et al.*, 1972) ou encore la faune et la flore (Sukopp, 2004).

La canicule de 2003 a également permis de révéler le problème causé par la présence concomitante d'un îlot de chaleur urbain et d'une vague de chaleur ou canicule. L'îlot de chaleur a pour effet de limiter la baisse des températures durant la nuit. Lors des vagues de chaleur, cette diminution devient vitale pour permettre aux organismes humains une récupération des fortes chaleurs du jour et son absence peut être mortelle.

Du fait de ces conséquences sanitaires mais également énergétiques, les collectivités territoriales ont intérêt à mieux appréhender et à mieux intégrer les modifications climatiques locales induites par la ville. Ce n'est cependant pas suffisant pour générer des initiatives avec des actions réfléchies et ayant des influences réelles sur le climat urbain. Pour cela, les élus et les aménageurs ont besoin de connaître de façon aussi précise que possible les impacts climatiques de leur(s) choix d'aménagement mais également de savoir quels sont actuellement les moyens à leur disposition pour leur prise en compte. Plusieurs échelles d'analyse sont possibles (bâtiment, quartier, ville) et nous avons choisi l'échelle de la ville pour répondre à notre problématique : *comment favoriser une meilleure prise en compte des facteurs influençant le climat urbain et sur lesquels l'homme peut agir au travers de l'aménagement des villes ?*

Pour tenter de répondre à cette problématique, il est nécessaire de comprendre quel est qualitativement et quantitativement la contribution de différents facteurs au climat urbain. C'est en effet une étape nécessaire avant d'aborder la question de l'intégration d'enjeux relatifs au climat urbain au sein de l'aménagement. Nous nous sommes donc intéressés aux deux aspects suivants qui constituent le cœur de la problématique de ce travail de recherche : 1) la compréhension de la formation du climat urbain et la quantification de l'influence de différents facteurs sur celui-ci, 2) l'intégration de nouveaux enjeux relatifs au climat urbain au sein des projets urbains et d'aménagement.

Le présent article s'organise en trois parties aux objectifs distincts et complémentaires.

Dans la première partie, nous abordons la climatologie urbaine, science pour laquelle les connaissances augmentent, d'année en année, au gré des avancées scientifiques et de l'évolution des préoccupations des scientifiques.

La deuxième partie présente la méthode que nous avons utilisée durant cette recherche pour répondre à notre problématique. A partir d'une proposition de domaines d'action en adéquation avec la manière dont se conçoivent et se gèrent les milieux urbain, il en découle un certain nombre de leviers permettant d'agir sur le climat urbain. A l'aide d'un modèle de simulation numérique du climat urbain, nous avons étudié la variation des bilans d'énergie selon la valeur de différents paramètres. Ces différentes simulations permettent une réflexion sur la sensibilité des variables, c'est-à-dire l'importance jouée par tel ou tel facteur dans la formation du climat urbain et, plus précisément, de l'îlot de chaleur urbain.

La troisième et dernière partie porte sur les résultats de la simulation et sur les moyens actuellement à disposition des collectivités territoriales françaises pour intégrer dans la conception urbaine des critères permettant d'améliorer l'environnement climatique des villes.

II. LA FORMATION DU CLIMAT URBAIN

La rue et les bâtiments sont à l'origine de perturbations microclimatiques multiples qui se répercutent par la suite à une échelle locale et même régionale. Perturbations des écoulements de l'air, modification de l'évapotranspiration, apports anthropiques de chaleur, perturbations radiatives et thermiques, tous ces éléments ou processus sont initiés à l'échelle de la rue ou du bâtiment. Ainsi, si pour se représenter le fait que la température est souvent plus élevée en milieu urbain qu'au sein du milieu rural voisin, le concept d'« îlot de chaleur urbain » a été proposé, cette notion d'îlot traduit un phénomène homogène peu représentatif de la réalité. En effet, le climat urbain et plus particulièrement l'îlot de chaleur urbain s'apparente beaucoup plus à un archipel, avec différents quartiers chauds, plus qu'à une couche uniforme (Rosenzweig *et al.*, 2005), ce qui est par ailleurs plus en accord avec la complexité et la diversité des environnements urbains.

Chaque ensemble de rues et de bâtiments forme ainsi un microclimat qui ne sera a priori pas identique à celui formé par un quartier voisin. Il est indispensable de ne pas négliger cet aspect dans l'interprétation des données météorologiques. La généralisation de mesures d'un site urbain à l'ensemble de la ville et les interprétations qui en découlent doivent être faites

avec précaution. Ainsi, l'intensité de l'îlot de chaleur correspond à la différence de température entre le point le plus chaud de la ville et le milieu rural voisin.

L'étude du climat urbain nécessite de distinguer différentes échelles horizontales et verticales (Oke, 2004, 1978).

A l'horizontal, trois échelles d'étude peuvent être distinguées en climatologie (urbaine ou non) : la micro-échelle, l'échelle locale et la méso-échelle (Oke, 2004).

La micro-échelle (10^{-2} à 10^{3} m)[1] permet de distinguer le microclimat qui existe au niveau d'un bâtiment, d'une rue, d'un arbre, d'un jardin, d'une cour, etc. En effet, à faible distance il peut être observé des différences de températures de quelques degrés et le flux d'air est également perturbé par le moindre objet.

L'échelle locale (10^{2} à $5x10^{4}$ m) correspond à l'échelle pour laquelle sont conçues les stations météorologiques, c'est-à-dire que les caractéristiques de la zone étudiée, comme la topographie, sont prises en compte mais pas les effets micro. Dans le cas d'une zone urbaine, l'échelle locale correspond à un quartier pour lequel il peut être trouvé une unité dans le développement urbain (unité architecturale, taille et espacement des bâtiments, activité, etc.).

La méso-échelle (10^{4} à $2x10^{5}$ m) correspond à la zone influencée par exemple par la présence d'une agglomération.

A la vertical, les influences de la ville ne s'observent pas sur l'ensemble de l'atmosphère mais au sein de la couche limite planétaire ou couche limite atmosphérique (CLA)[2], qui s'étend du sol jusqu'à une altitude entre 100 et 3 000 mètres.

La couche limite urbaine (CLU) se distingue de la couche limite de la planète par sa complexité due à des caractéristiques et processus particuliers. Les principaux éléments causes de perturbation au sein de l'environnement urbain sont les bâtiments de formes et de hauteurs variables. Ceux-ci introduisent une grande quantité de surfaces verticales, des éléments à forte rugosité, des matériaux artificiels, et des surfaces imperméables.

Lors de ses premières études Oke (1978) distingue deux couches atmosphériques différentes au-dessus des villes : la couche de canopée urbaine, qui correspond à la couche atmosphérique située entre le sol et le niveau des toits, et la couche limite interne qui se superpose à la couche de canopée urbaine. Ses études l'amènent à distinguer trois autres sous-couches (Oke, 2004) : la sous-couche rugueuse, la sous couche inertielle et la couche de mélange (figure 1).

[1] Certains espaces naturels n'offrent pas de variations climatiques sur des distances aussi faibles qu'en milieu urbain, qui est un milieu très hétérogène, d'où cet important intervalle et les chevauchements entre les différentes échelles.

[2] « *La présence d'un ensemble urbain modifie profondément la structure des basses couches de l'atmosphère tant du point de vue dynamique que du point de vue thermique. En effet, l'écoulement de l'air est très perturbé par les obstacles nombreux, rapprochés et de hauteurs inégales qui caractérisent les zones urbaines ; de plus, le remplacement du sol naturel par de grandes étendues de béton, de bitume, de pierres, etc., ainsi que la concentration sur un espace réduit de processus de combustion (chauffage, industrie, transports) provoquent une modification importante du bilan énergétique entre le sol et l'atmosphère. La pollution de l'air qui change la composition de l'atmosphère des villes entraine également une modification des échanges radiatifs et des précipitations. Enfin, l'imperméabilité du sol et la diminution des surfaces évapotranspirantes perturbent le bilan hydrique.* » Sacré (1983)

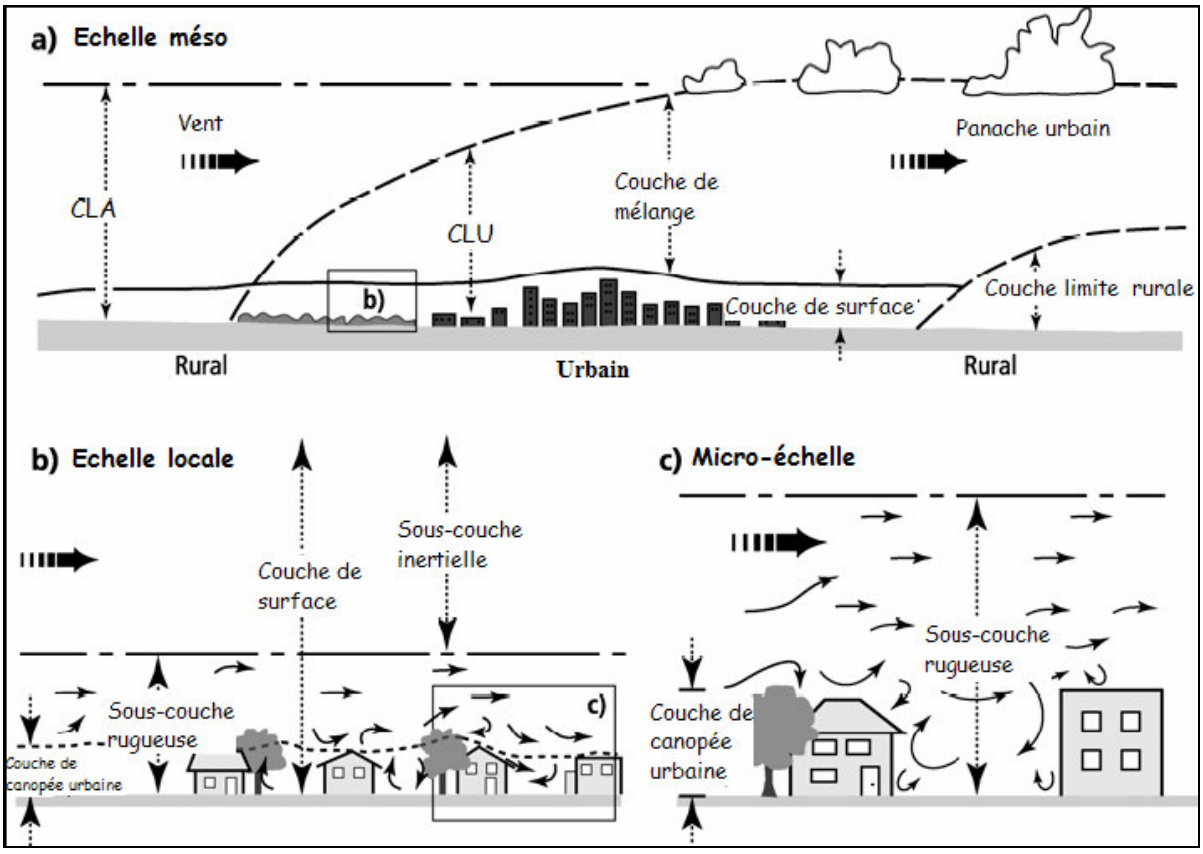


Figure 1 : Représentation schématique de la couche limite urbaine (CLU) à méso-échelle (a), à l'échelle locale (b) et à micro-échelle (c) (Leroyer (2006), d'après Oke (1987)).

La canopée urbaine est la couche où se situe la plupart des sources de polluants et des récepteurs (hommes, végétations et matériaux). La couche de canopée urbaine est composée majoritairement de rues canyon et de divers arrangements de bâtiments de grande hauteur, de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres. La disposition des rues canalise une partie des flux alors que les éléments de forte rugosité induisent la formation d'une fine sous-couche de rugosité au-dessus de la couche de canopée urbaine (Piringer et Joffre, 2005).

La sous-couche de rugosité, de hauteur z_0, avec une extension plus importante que pour les couches limites classiques, occupent les premières dizaines/centaines de mètres au-dessus de la surface. Au-dessus de cette sous-couche de rugosité inhomogène se trouve le reste de la couche de surface, c'est-à-dire la sous-couche inertielle où les flux turbulents verticaux sont approximativement constants avec la hauteur (Piringer et Joffre, 2005).

L'hétérogénéité horizontale des quartiers, à l'échelle du kilomètre, avec parfois des transitions fortes de rugosité et/ou de température, peut générer une série de couches limite internes. Leur superposition augmente l'hétérogénéité de la basse couche atmosphérique. (Piringer et Joffre, 2005)

Une autre source d'hétérogénéité horizontale est la présence de sources ponctuelles de chaleur et de vapeur d'eau de grande puissance, comme par exemple les zones industrielles. Les zones

urbaines incluent également des sources disparates de chaleurs latente[3] et sensible[4] dues aux transferts de surface (sol et bâtiments) ou aux diverses sources ponctuelles de faible niveau (chauffage, automobiles) (Piringer et Joffre, 2005).

La structure de la CLU a une série de conséquences physiques qui sont bien connues. L'îlot de chaleur urbain, avec des températures plus élevées au centre de la ville, en est une. Les séries de couches limites internes dynamiques et thermiques perturbent l'équilibre des champs de vent, génèrent des flux locaux entre le centre de la ville et ses environs et entre les différents quartiers (« brises de campagne »), ainsi que des convections thermiques. La présence d'une ville peut également accroître le brouillard et les précipitations et ce probablement du fait de l'augmentation de la concentration des noyaux de condensation[5] due à la pollution. L'influence de la ville peut être observée non seulement sur l'atmosphère au-dessus de la ville elle-même mais également au-dessus des villes sous le vent où une « plume urbaine » est générée par les perturbations de la ville (Piringer et Joffre, 2005).

Les phénomènes engendrés à l'échelle de la ville peuvent être explicités par le biais des bilans radiatif, énergétique et hydrique. Avant d'expliciter ces différents phénomènes, précisons que certaines prédispositions naturelles peuvent favoriser ou, à l'inverse, défavoriser la formation du climat urbain et son intensité.

La localisation de la ville a un impact conséquent sur les modifications climatiques susceptibles d'être observées localement (Bitan, 1992. Golany, 1996). Landsdberg (1981) estime également que « *l'extension et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain est aussi profondément influencé par la topographie* » et Givony (1998) écrit que « *la localisation d'une ville au sein d'une région donnée peut avoir l'effet le plus permanent sur le climat urbain et le confort des habitants* ».

La ville s'intègre donc dans un environnement naturel, avec lequel elle entretient des relations étroites. Cet environnement naturel est plus ou moins propice à la mise en place d'un climat urbain ou de manière générale d'un climat local. Il peut être décrit à partir :

- du climat régional (il dépend de la latitude, de la longitude et de l'altitude, c'est-à-dire de la localisation géographique. Il est lié aux circulations océaniques et atmosphériques) ;
- de la morphologie du site, la topographie (Montagne, plaine, vallée, plateau…), qui influence notamment les phénomènes aérauliques ;

[3] Chaleur latente : la chaleur latente, ou enthalpie de changement d'état (molaire ou massique) correspond à la quantité de chaleur nécessaire à l'unité de quantité de matière (mole) ou de masse (kg) d'un corps pour qu'il change d'état, cette transformation ayant lieu à pression constante.

[4] Chaleur sensible : la chaleur sensible est la quantité de chaleur qui est échangée, sans transition de phase cynique, entre deux corps. Elle est qualifiée de « sensible » parce que cet échange de chaleur sans changement de phase change la température du corps, effet qui peut être ressenti ou mesuré par un observateur.

[5] Un noyau de condensation est une particule solide ou liquide de très petite taille, flottant au sein de l'atmosphère, et sur laquelle peuvent s'accumuler des gouttelettes d'eau par changement de phase de la vapeur d'eau environnante qui se transforme en eau liquide par condensation (passage de l'état gazeux à l'état liquide ou solide).

- des ressources naturelles à proximité, que sont l'eau (fleuves, rivières, océans…), la végétation, et le sous-sol, les deux premiers constituant pour leur part des puits de fraicheur plus ou moins influents.

Les rapports terre-mer sont un des facteurs géographiques influençant le temps (ou la météo) et le climat (Pagney, 2000). Comme le signale Escourrou (1981), l'influence des océans et des mers se manifeste sur une bande côtière d'une quarantaine de kilomètres par plusieurs caractéristiques. Il est ainsi possible d'observer pour l'intérieur des terres par rapport à la zone côtière : une diminution des minima de température, une augmentation des maxima en été, une augmentation de l'amplitude thermique, une augmentation du nombre de jours de gel, une diminution de l'insolation, une augmentation des précipitations et des orages, ou encore une diminution de la vitesse du vent et un changement de direction. L'influence des lacs et des plans d'eau sera moins important mais de nature identique.

La présence de brises, liées aux comportements thermiques différents de la mer et de la surface terrestre, est également un phénomène important. Les masses océaniques, du fait de l'évaporation et des mouvements marins, s'échauffent et se refroidissent très lentement. A l'inverse, la surface terrestre sous l'action de la chaleur solaire s'échauffe beaucoup plus vite que l'eau, et de nuit, la surface terrestre se refroidit plus rapidement. Ces deux situations constituent le point de départ pour la formation, dans le premier cas, d'une brise de mer, et dans le second, d'une brise de terre.

L'influence des brises de mer sur la ville de Marseille et sa couche limite atmosphérique a été étudiée notamment par le biais de la campagne de mesures ESCOMPTE (Puygrenier *et al.*, 2005. Lemonsu *et al.*, 2004).

Le relief agit également sur la formation des vents. Les vallées, notamment en montagne, produisent leur propre système local de vent, et ce, entre autres, du fait des différences thermiques entre les versants de la vallée (Oke, 1978). Le cas de Johannesburg (Afrique du sud), située sur un haut plateau, au milieu des crêtes de montagne du Witwatersrand, a par exemple été étudié (Goldreich, 1992). Le cas de Mexico (Mexique), ville située entre différentes montagnes, est également connu pour ses problèmes de pollution atmosphérique dus à un manque de dispersion des polluants en relation directe avec la stagnation des masses d'air.

II.1 Modification du bilan d'énergie thermique de la ville

La chaleur produite et stockée par la ville peut être représentée via le bilan d'énergie thermique de surface, qui prend en compte tous les échanges d'énergie dont les échanges radiatifs (figure 2). Chaque terme du bilan d'énergie est modifié par l'environnement urbain et contribue à la formation de l'îlot de chaleur urbain.

Le bilan énergétique de la ville est, avec le bilan hydrique (cf. paragraphe suivant), un des points essentiels pour comprendre la formation du climat urbain et les échanges énergétiques à l'origine de celui-ci.

Plusieurs études ont permis de préciser l'importance des différents termes du bilan énergétique (Q*, Q_H, ΔQ_S, Q_E, Q_F) dans différentes situations géographiques et climatiques[6].

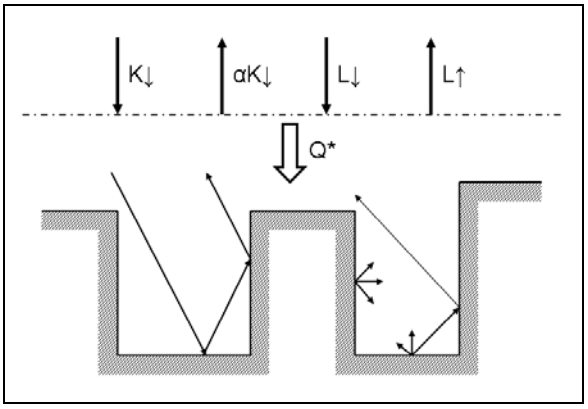
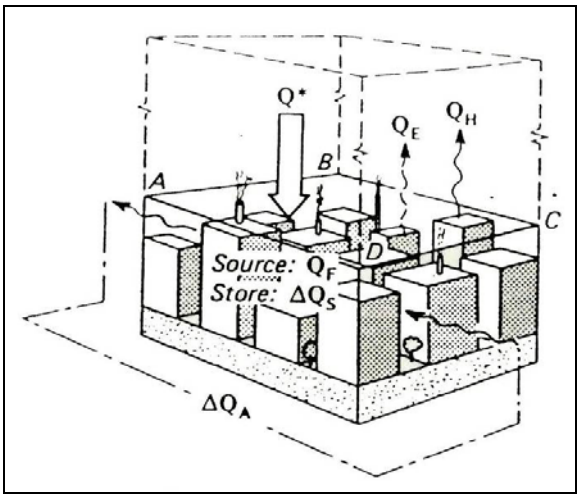
<table>
<tr>
<td>a) Bilan radiatif

</td>
<td>b) Bilan énergétique pour une zone urbaine (Duchêne-Marullaz, 1980).

</td>
</tr>
<tr>
<td>$Q^* = L\downarrow - L\uparrow + (1 - \alpha)\, K\downarrow$ (W.m^{-2})
Où α est l'albédo du sol,
L↑ le rayonnement de grande longueur d'onde émis par le milieu,
L↓ le rayonnement atmosphérique descendant,
K↓ le rayonnement solaire global reçu sur une surface horizontale,
Et Q* le rayonnement net.</td>
<td>$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S\ (+ \Delta Q_A)$ (W.m^{-2})
Où Q* est le rayonnement net,
Q_F le flux de chaleur artificiel (d'origine anthropique) produit par les processus de combustion, de métabolisme et de rejets thermiques (industries, transports, habitats, etc.),
Q_H le flux turbulent de chaleur sensible,
Q_E le flux turbulent de chaleur latente,
ΔQ_S la variation de la quantité de chaleur stockée par la zone urbaine (ou, par raccourci, flux de chaleur stockée),
ΔQ_A le flux de chaleur advectif (transport horizontal).</td>
</tr>
</table>

Figure 2 : Les bilans radiatif et énergétique

Par raccourci, ce bilan d'énergie thermique est également appelé bilan d'énergie, bilan énergétique ou bilan thermique.

« *L'urbanisation modifie le bilan énergétique normal, c'est-à-dire que la quantité d'énergie solaire absorbée par le substratum*[7] *et son utilisation est différente* » (Escourrou, 1991). L'apport d'énergie provient initialement du soleil (K↓) et de l'atmosphère (L↓) et des rejets de chaleur dus aux processus anthropiques de combustion, de métabolisme et de rejets thermiques (Q_F). Ces trois termes sont à l'origine de processus radiatifs et de flux de chaleurs sensible et latente. Ces transferts de chaleur se font de trois façons : par conduction[8] au sein des matériaux, par convection[9] et par rayonnement (de grandes longueurs d'onde).

[6] Pour la ville de Mexico (Mexique) : Oke *et al.* (1992) et Oke *et al.* (1999). Pour Bonn (Allemagne) : Kerschgens et Kraus (1990). Pour Marseille : Roberts *et al.* (2003) et Roberts *et al.* (2004).

[7] Le substratum représente la surface terrestre : sols, végétation, surface en eau, etc.

[8] La conduction est le processus de transfert de chaleur à l'intérieur d'un matériau solide allant des molécules les plus chaudes vers les molécules les plus froides.

[9] La convection est un transfert de chaleur par le biais d'un fluide (comme l'air). L'échange de chaleur convectif arrive dans diverses situations, quand la chaleur est transférée de la surface d'un solide à l'air adjacent, et vis et versa, ou quand la chaleur est transférée entre deux surfaces de températures différentes par le moyen d'un flux

II.1.1 Rayonnement net (Q*)

Le rayonnement net Q* correspond au rayonnement de courtes et grandes longueurs d'onde « capturé » (terme positif) ou « perdu » (terme négatif) par la surface étudiée. Il est le « résultat » du bilan radiatif. Tous les termes du bilan radiatif sont affectés par le milieu urbain, que ce soit dû à sa géométrie, aux matériaux ou encore à la pollution atmosphérique qui y règne.

Cependant, pour Piringer et Joffre (2005) et Oke (1982, 1988), le bilan radiatif ne diffère pas de façon significative entre les zones urbaines et rurales, la perte nette en rayonnement de grandes longueurs d'onde étant en partie compensée par le gain net en rayonnement de courtes longueurs d'onde due un albédo plus faible.

Pour ce qui est du rayonnement infrarouge, le bilan $L\downarrow - L\uparrow$ est, selon Oke (1978) et Ringenbach (2004), également plus faible en milieu urbain que dans les zones voisines. L'augmentation du rayonnement infrarouge descendant ($L\downarrow$) du fait de la pollution ne permet pas de compenser l'augmentation du rayonnement infrarouge ascendant ($L\uparrow$).

Le rayonnement solaire réfléchi ($\alpha K\downarrow$) est donné par l'albédo de la zone urbaine (α), albédo qui dépend, dans le cas d'un milieu urbain, à la fois de la géométrie du cadre bâti (les rues piègent le rayonnement solaire) et des matériaux de construction.

Les matériaux urbains présentent des albédos variés mais en moyenne plus faibles que ceux observés pour des surfaces naturelles. La morphologie urbaine, c'est-à-dire l'arrangement géométrique des composants urbains, et le piégeage du rayonnement qu'elle entraine participe également à une diminution de l'albédo des zones urbaines. Oke (1978) estime que l'albédo moyen des villes est de 0,15, ce qui est souvent plus faible que celui des zones rurales (0,2 pour la végétation ; 0,11 à 0,15 pour la forêt ; 0,25 à 0,3 pour des sols nus (Najjar *et al.*, 2005)). Comme le signale Taha (1997a), les albédos des milieux urbains sont généralement compris entre 0,10 et 0,20, mais dans certaines villes ces valeurs peuvent être bien plus importantes. Les villes nord africaines en sont un bon exemple avec des albédos compris entre 0,30 et 0,45 alors que la plupart des villes américaines et européennes ont un albédo compris entre 0,15 et 0,20. Les campagnes de mesures récentes effectuées en Europe montrent également que l'albédo des surfaces urbaines européennes est remarquablement faible. Christen *et al.* (2003) estiment que l'albédo de Bâle (Suisse) est aux alentours de 0,10. Roberts *et al.* (2004) estiment que celui du centre de Marseille est de 0,08. Il a été trouvé que plus les bâtiments sont hauts et denses, plus l'albédo est faible (Piringer et Joffre, 2005). Des matériaux foncés et l'ombre dans les rues étroites diminue significativement l'albédo et suggèrent que les villes denses européennes sont de meilleurs absorbeurs que la plupart des surfaces des villes nord-américaines (Piringer et Joffre, 2005). Les chiffres de Sailor et Fan (2002) le confirment en estimant que l'albédo des villes nord américaines est compris entre 0,15 et 0,20.

Il est à noter que l'albédo d'un milieu urbain présente une variation journalière non négligeable (Chimklai *et al.*, 2004) due à la position du soleil et donc à l'angle d'incidence du

---

d'air. La convection peut être causée, par exemple, par des différences de température et/ou forcée le mouvement de l'air par le vent.

rayonnement solaire. Les effets d'ombres, la part de surfaces soumises au rayonnement ayant des propriétés différentes, l'importance du « piégeage » du rayonnement, etc., sont des critères qui entrent dans le calcul de l'albédo de la ville et dont la valeur est modifiée selon la position du soleil.

Le rayonnement thermique émis par le milieu L↑ (domaine infrarouge) dépend de la température de surface et de l'émissivité des matériaux constituant le sol (loi de Stefan-Boltzmann). En milieu urbain, les matériaux ont de manière générale des températures de surface plus élevées que les matériaux plus naturels voisins, ainsi le rayonnement thermique ascendant est plus important en zone urbaine et ce particulièrement en milieu de journée, heure à laquelle les matériaux ont eu le temps de se réchauffer. C'est également le cas la nuit, les surfaces urbaines se refroidissant moins vite que les surfaces naturelles (Ringenbach, 2004). Nunez et Oke (1977) ont également noté que le refroidissement nocturne est moins marqué dans la rue que sur les toits en raison du piégeage du rayonnement infrarouge par les bâtiments de part et d'autre de la rue.

II.1.2 Flux de chaleur d'origine anthropique (Q_F)

La chaleur anthropique représente la chaleur générée par les sources mobiles et stationnaires d'une zone (trafic automobile, industries, chauffage, etc.). Cette chaleur est par la suite convertie en rayonnements, en flux turbulent de chaleur (flux de chaleur latente et sensible) ou encore en flux de chaleur stockée (Rizwan *et al.*, 2008). La production d'énergie anthropique est étroitement liée à la taille et à la densité de bâtiments et d'habitants de la ville, à ses fonctions et à son industrialisation, ainsi qu'à la zone climatique et aux besoins de chauffage ou de climatisation (Oke 1978; Taha 1997b).

L'îlot de chaleur urbain est présent de façon plus nette en été qu'en hiver, on peut donc en déduire que les rejets thermiques d'origine anthropique, plus importants en hiver (chauffage…), ne sont pas le principal facteur du climat urbain. On notera également qu'en hiver cette énergie anthropique peut être plus importante que l'apport solaire alors qu'en été elle en est bien inférieure.

Taha (1997b) présente différentes valeurs moyennes de rejet de chaleur anthropique : 53 $W.m^{-2}$ pour Chicago, 21 $W.m^{-2}$ pour Los-Angeles, 117-159 $W.m^{-2}$ pour Manhattan à New-York city, 99 $W.m^{-2}$ pour Montreal, 127 $W.m^{-2}$ pour Moscow, 43 $W.m^{-2}$ pour Budapest. A Toulouse (France), Pigeon et al. (2007) estime que Q_F est autour de 70 W m^{-2} durant l'hiver et autour de 15 W m^{-2} en été. Des simulations à Philadelphie suggèrent que Q_F contribue à l'îlot de chaleur nocturne en hiver et en été respectivement à hauteur de 0,8°C et de 2–3°C (Fan and Sailor, 2005). Le bilan d'énergie en journée est dominé par le rayonnement solaire incident.

II.2.2 Variation de la quantité de chaleur stockée (ΔQ_S)

Les phénomènes radiatifs et thermiques conduisent à une accumulation de la chaleur au sein des matériaux et du sol. Cette énergie est restituée à l'atmosphère principalement durant la nuit et constitue durant cette période une des principales sources d'énergie (Ringenbach,

2004). La campagne, du fait, entre autres[10], d'un stock d'énergie moindre, se refroidit beaucoup plus rapidement.

Il n'existe à l'heure actuelle pas de méthode permettant de mesurer directement ΔQ_S au sein de l'environnement urbain (Roberts *et al.*, 2003). Cette valeur est souvent déduite par le biais de méthode alternative comme la déduction par rapport aux autres termes du bilan d'énergie.

II.2.3 Flux de chaleur sensible (Q_H)

Le flux de chaleur sensible est une des causes majeures de la présence d'un îlot de chaleur urbain. Il est alimenté à la fois par les rejets de chaleur d'origine anthropique et par la chaleur stockée au sein du sol et des bâtiments (ΔQ_S). Ces derniers permettent à Q_H de rester positif, même pendant la nuit. Comme le signale Ringenbach (2004), « *le refroidissement radiatif plus rapide que la baisse de la température de l'air met en évidence le rôle du flux de chaleur sensible dans le réchauffement de l'atmosphère* ».

Le flux de chaleur sensible (Q_H) et la chaleur stockée (ΔQ_S) constituent en journée 90% des flux échangés au sein d'un site fortement urbanisé (Roberts *et al.*, 2004).

II.2.4 Flux de chaleur latente (Q_E)

La réduction des phénomènes évapotranspiratoires en milieu urbain a pour conséquence un flux de chaleur latente la plupart du temps inférieur par rapport à celui présent dans les milieux ruraux voisins. Dans certaines situations, par exemple en cas de gel, on assiste à une inversion de ce phénomène du fait de la grande diminution des phénomènes évapotranspiratoire en milieu rural.

L'imperméabilisation du milieu urbain et la diminution de la présence de végétaux modifient considérablement les flux de chaleur sensible et latente. Cantat (1993) estime qu'en milieu rural végétalisé la répartition entre flux de chaleur sensible et flux de chaleur latente est de l'ordre de 20% et 80% respectivement alors qu'en milieu urbain cette répartition est de 86% et 14%.

II.2.5 Flux de chaleur advectif (ΔQ_A)

Le flux de chaleur advectif est dû au gradient spatial de température, d'humidité et de vent (Rizwan *et al.*, 2008). ΔQ_A est considéré comme négligeable pour les sites ayant une forme horizontale étendue et relativement homogène (Roberts *et al.*, 2003) et est ainsi souvent négligé dans les études sur les milieux urbains (Pigeon *et al.*, 2007. Oke *et al.*, 1992).

II.3 Modification du bilan hydrique de la ville

Le bilan hydrique (figure 3) d'un lieu permet, sur une période donnée, de comptabiliser les apports et pertes en eau, ainsi que les réserves pouvant exister. La formulation la plus générale s'écrit :

$$P = Q + ETR + \Delta Ru + \Delta Rh$$

Où P est l'ensemble des précipitations, Q est ce qui ruisselle, ETR est l'évapotranspiration et Ru et Rh sont respectivement les réserves en eau du sol et du sous-sol.

[10] Le piégeage des radiations favorise également un moindre refroidissement en milieu urbain.

Oke (1978) a adapté cette formule à l'espace urbain :

$$\underbrace{P + F + I}_{\text{Apport en eau}} = \underbrace{E + \Delta r + \Delta S + \Delta A}_{\text{Pertes en eau}}$$

Où P est la quantité de précipitation,

F la quantité de vapeur d'eau provenant des processus de combustion,

I la quantité d'eau apportée artificiellement par les canalisations,

E la quantité de vapeur d'eau échangée dans les processus d'évaporation, d'évapotranspiration et de condensation,

Δr la quantité d'eau perdue par ruissellement et évacuation,

ΔS la quantité d'eau emmagasinée par la ville, et

ΔA le bilan net de la vapeur d'eau transportée par advection[11].

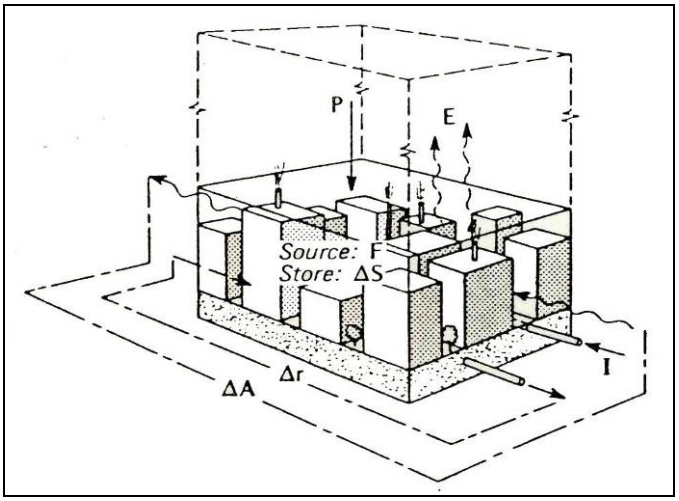


Figure 3 : Schéma descriptif du bilan hydrique pour une zone urbaine, d'après Oke (Duchêne-Marullaz, 1980)

F (quantité de vapeur d'eau provenant des processus de combustion) et I (quantité d'eau apportée artificiellement par les canalisations) sont ainsi deux termes qui n'existent pas en milieu rural (si l'irrigation n'est pas prise en compte). Tout comme le flux de chaleur anthropique Q_F, la quantité de vapeur d'eau F qui provient en grande majorité des processus de combustion des énergies fossiles (gaz, essence, fuel, charbon, etc.) ou encore des rejets industriels, varie beaucoup d'une ville à l'autre. Le climat, la saison, le degré de développement économique, la taille et la structure de la zone urbaine sont des facteurs qui influent sur cette quantité (Duchêne-Marullaz, 1980).

[11] En météorologie, l'advection constitue le déplacement dans le sens horizontal d'une masse d'air. En météorologie et en océanographie, l'advection se réfère surtout au transport horizontal de certaines propriétés par les fluides considérés donc le transport par le vent ou les courants : advection de vapeur d'eau, de chaleur, de salinité, etc.

Duchêne-Marullaz (1980) compare également les bilans hydriques urbain et rural en supposant que ΔA, le bilan net de la vapeur d'eau transportée par advection, est identique dans les deux cas. Les apports en eau sont pour Duchêne-Marullaz (1980) plus importants en raison des termes supplémentaires F et I. Il estime également que l'évapotranspiration E et le stockage ΔS sont inférieurs en zone urbaine en raison principalement de la nature des matériaux urbains. La quantité d'eau perdue Δr est ainsi plus importante qu'en zone rurale.

Cette analyse ne met cependant pas en valeur les modifications pluviométriques que peut engendrer la présence d'une ville.

Ce bilan permet d'expliquer certains cas d'îlots d'humidité qu'il est parfois possible d'observer dans les milieux urbains. Comme le signale Sacré (1983), « *l'air des villes est souvent plus sec le jour et un peu plus humide la nuit : ce phénomène apparaît le plus nettement en été, par beau temps* ». En effet l'évaporation comme l'évapotranspiration dépendent de facteurs météorologiques comme le vent, le rayonnement solaire, la température de l'air ou encore l'humidité de l'air. De nuit, à condition de vent équivalente l'évaporation et l'évapotranspiration sont ainsi moins importantes qu'en journée, avec un temps ensoleillé. L'îlot d'humidité décrit par Sacré (1983) peut ainsi s'expliquer en partie par une baisse de l'humidité en zone rurale, due à la diminution de l'évapotranspiration, alors qu'en zone urbaine les rejets de vapeur d'eau continuent (processus de combustion notamment).

II.4 Rôle de différents facteurs dans la formation du climat urbain

Selon Rizwan *et al.* (2008), l'îlot de chaleur urbain est la réponse mutuelle de plusieurs facteurs qui peuvent être répartis entre ceux qui sont contrôlables et ceux qui ne le sont pas (figure 4). « *Les facteurs contrôlables et incontrôlables peuvent également être classés comme des variables à effet temporaire, comme la vitesse du vent et la couverture nuageuse, des variables à effet permanent comme les espaces végétalisés, les matériaux des bâtiments et le facteur de vue du ciel, et des variables à effet cyclique comme le rayonnement solaire et les sources de chaleur anthropique* » (Rizwan *et al.*, 2008).

Givoni (1998) a également effectué cette distinction soulignant ainsi que certains des facteurs qui influencent l'îlot de chaleur urbain sont météorologiques et ne peuvent donc a priori pas être modifiés par des interventions humaines. C'est le cas de la couverture nuageuse et de la vitesse régionale du vent. En revanche, d'autres facteurs peuvent être modifiés par l'action humaine et il est intéressant d'en tenir compte et de les connaître pour améliorer les pratiques dans l'aménagement urbain et l'architecture. Ces facteurs incluent les couleurs des bâtiments (qui déterminent en partie la fraction de rayonnement solaire réfléchi), la quantité et la distribution de la végétation urbaine, l'utilisation d'énergie pour le chauffage et l'air conditionné (influencés par l'architecture des bâtiments et le comportement des occupants), la densité construite et les formes, types et natures des bâtiments (qui influencent la quantité de rayonnement solaire atteignant le sol et la perte radiative nocturne), ainsi que l'orientation des rues (qui influence, avec la direction prédominante du vent, la vitesse du vent près du sol). Le rôle relatif de ces facteurs dans la formation de l'îlot de chaleur dépend par ailleurs du climat (sec ou humide), de la saison, et de la nature des activités de la ville.

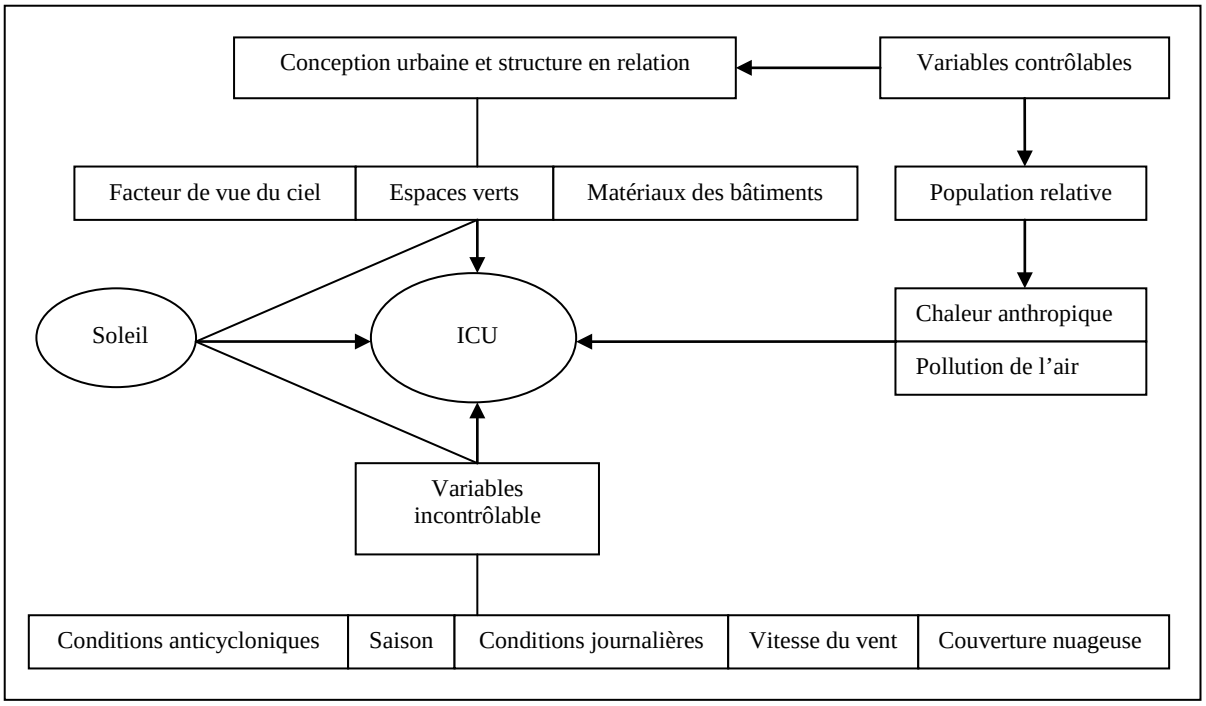


Figure 4 : Formation de l'îlot de chaleur urbain (D'après Rizwan et al. (2008)).

Giridharan *et al.* (2007) se sont intéressés aux éléments de la conception urbaine influençant l'intensité de l'îlot de chaleur à Hong Kong (Chine), qui offrent des environnements urbains très denses et avec des immeubles de grande hauteur. L'objectif de leur étude a été d'identifier les variables clés de la conception urbaine qui influencent l'îlot de chaleur urbain de la journée et de la nuit, et ce pour des zones résidentielles de la côte de Hong Kong. Leur recherche montre, qu'en ce qui concerne la conception urbaine, des variables telles que le facteur de vue du ciel[12], l'albédo de la surface, l'altitude, la végétation de plus de un mètre de haut, le ratio hauteur moyenne sur aire du sol, ou encore la proximité de la mer sont les variables les plus pertinentes pour atténuer à la fois l'îlot de chaleur urbain de la journée et de la nuit. D'autres variables, comme la vélocité du vent et le rayonnement solaire, ont leur importance mais, comme nous l'avons déjà dit, les aménageurs n'ont pas de contrôle sur elle.

Les différents facteurs urbains, contrôlables, comprennent à la fois

- La nature de la surface urbaine : bâtiments, pavage, végétation, sol naturel ou surface d'eau (la couverture du sol, avec sa part de sols artificiels et de sols nus, enherbés ou végétalisés, joue un rôle important).
- Les activités humaines, sources de pollution atmosphérique et de rejets de chaleur.
- La structure urbaine ou encore le tissu constructif dans lesquels sont inclus la morphologie du cadre bâti, la géométrie urbaine (hauteur et largeur des bâtiments, espacement entre ces derniers, largeurs des rues, etc.) et les matériaux utilisés pour construire la ville.

[12] Le facteur de vue du ciel est la mesure de l'angle solide de vue du ciel depuis un espace urbain. Il est une mesure de l'ouverture vers le ciel d'une texture urbaine et a une influence sur divers phénomènes climatologiques tels que l'îlot de chaleur urbain, l'éclairage naturel et l'absorption de chaleur.

De nombreuses recherches ont permis d'éclairer le rôle de ces différents facteurs.

Sthülpnagel (1987), Taha (1996), Bernatzky (1982), Oke (1979), et d'autres encore ont étudié l'influence des arbres et des espaces végétalisés notamment sur la température. Sthülpnagel (1987) montre par exemple qu'il faut 10ha d'espace vert pour perdre 1°C, 50ha pour 2°C et 200ha pour 3°C.

Fan et Sailor (2005), Ichinose *et al.* (1999), ou encore Taha *et al.* (1992b) ont évalué l'intensité des rejets de chaleur anthropiques et leur influence sur l'îlot de chaleur. Taha *et al.* (1992b) montre par exemple qu'au centre d'une grande ville Q_F peut participer à l'intensité de l'îlot de chaleur à hauteur de 2-3°C à la fois le jour et la nuit.

L'influence de la morphologie ou géométrie urbaine a également été très étudiée. Oke (1988) a mis en relation le rapport H/W (avec H la hauteur des bâtiments et W la largeur de la rue) et l'intensité maximale de l'îlot de chaleur : quand le premier augmente, le second augmente également. Yamashita *et al.* (1986) ont également mis en avant pour plusieurs villes de la banlieue ouest de Tokyo le fait que le facteur de vue du ciel est un indicateur pertinent pour qualifier l'effet de l'urbanisation sur l'intensité de l'îlot de chaleur. L'intensité de l'îlot de chaleur a ainsi tendance à croitre, plus ou moins fortement, selon la ville avec la diminution du facteur de vue du ciel.

Les propriétés thermiques et radiatives des matériaux utilisés en milieu urbain ont une incidence importante sur le bilan thermique de ce dernier. La réflectivité (ou albédo) des matériaux vis-à-vis du rayonnement solaire, tout comme leur émissivité, sont les paramètres radiatifs les plus importants. Pomerantz *et al.* (2000) ont travaillé sur les effets des températures des chaussées sur la température de l'air dans les grandes villes, mettant ainsi en relation l'albédo des rues et la variation journalière de la température de l'air. Asaeda *et al.* (1996) ont pour leur part observé le comportement thermique du béton, de l'asphalte et d'un sol nu. Taha (1997b) a pour sa part modélisé l'effet d'une augmentation de l'albédo de 0,15 et de 0,30 des surfaces minérales sur le bassin californien et constaté que, dans le cas extrême, une diminution de température de 4,5°C pouvait avoir lieu au centre du bassin.

II.5 Synthèse

A partir de l'observation du climat urbain jusqu'à la modélisation plus ou moins fine des phénomènes physiques en jeu, les climatologues ont pu décrire et comprendre avec de plus en plus de précision la formation du climat urbain. Si les premiers travaux étaient avant tout consacrés à l'îlot de chaleur urbain observé globalement sur toute l'agglomération, les climatologues se sont progressivement intéressés à d'autres paramètres climatiques puis à des échelles inférieures à la ville mettant ainsi en exergue l'importance de la géométrie urbaine et des propriétés physiques des matériaux de construction.

Les recherches concernant la diminution de l'îlot de chaleur urbain permettent de comparer l'influence des différents facteurs urbains en tenant compte de la possibilité de mettre en œuvre ces différentes modifications. Actuellement, les modélisations effectuées pour tester la sensibilité du climat et de l'îlot de chaleur urbain à certaines actions (végétalisation des espaces, variation des flux de chaleur d'origine anthropique, augmentation de l'albédo des surfaces, etc.) se concentrent majoritairement sur les situations estivales. Or, les modifications

du cadre bâti ou non bâti et des rejets de chaleur anthropique influencent l'intensité de l'îlot de chaleur à la fois en été et en hiver. Cette dernière saison ne peut être négligée si nous voulons intégrer de nouveaux éléments et critères dans la conception et la gestion de l'espace urbain.

Les modélisations mettent également l'accent principalement sur l'albédo des matériaux (toit et voirie notamment) et sur la végétalisation des espaces. Cela peut s'expliquer par la difficulté à modifier une morphologie urbaine compte tenu de l'inertie de l'évolution du tissu urbain.

Pour compléter la connaissance offerte par les différentes études menées jusqu'à présent sur l'influence de différents leviers d'action, nous avons décidé d'effectuer nos propres tests de sensibilité du climat urbain à la modification de certains facteurs.

III. METHODE ET MODELE

Les mesures sur site, la simulation en soufflerie ou en tunnel aéraulique ou encore les simulations numériques sont des méthodes d'analyse ayant permis aux scientifiques de mieux comprendre les mécanismes de formation du climat urbain. Pour les besoins de cette thèse, nous avons choisi de nous appuyer sur la simulation numérique.

Plusieurs études se sont appuyées sur la modélisation de différentes stratégies pour diminuer l'intensité de l'îlot de chaleur (diminution de l'albédo de la voirie, des toits ou encore des murs, et augmentation de la végétation) dans plusieurs villes. Nous pouvons citer l'étude de Rosenfeld *et al.* (1995) qui a notamment permis de modéliser les effets climatiques d'une augmentation de l'albédo des surfaces à Los Angeles, l'étude de Santamouris *et al.* (2004) sur les stratégies pour réduire l'impact de la demande croissante de climatisation dans l'Union Européenne, ou encore l'étude de Rosenzweig *et al.* (2006) sur les stratégies de diminution de l'îlot de chaleur de New-York, stratégies comprenant les forêts urbaines, les toits verts et les surfaces claires.

En plus de contribuer à la connaissance ainsi acquise, l'objectif ici est de s'enquérir des possibles effets d'une modification plus profonde de l'aménagement : changement des hauteurs constructibles, des prospects de rue, de l'isolation du bâti, etc. Il ne s'agit plus ici de proposer uniquement des stratégies envisageables à court et moyen termes (augmentation des espaces végétalisés, augmentation de l'albédo des surfaces), mais également de comprendre si des stratégies à plus long terme ont leur place du fait de leur effet potentiellement important sur l'intensité du climat urbain et plus particulièrement de l'îlot de chaleur urbain.

Pour examiner ces questions, nous avons précisé les domaines d'action permettant d'influer sur le climat urbain, choisi un modèle de simulation numérique, et élaboré un plan d'expériences pour exploiter ce modèle. Ces étapes abouties, les simulations et l'analyse des résultats ont pu être effectuées.

III.1. Choix du modèle

Nous avons effectué des tests de sensibilité du bilan d'énergie thermique de la ville à plusieurs variables, avec le schéma *Town Energy Balance*. Ce modèle numérique est un schéma de

surface développé par Masson (2000) au CNRM (Centre National de Recherche Météorologique) de Toulouse pour paramétrer les échanges en énergie et en eau entre les surfaces bâties et l'atmosphère

Le schéma de ville TEB permet de simuler les flux turbulents de surface en milieu urbain et peut contribuer à paramétrer une partie de la surface d'un modèle atmosphérique de méso-échelle. Il permet de paramétrer les échanges d'énergie et les échanges en eau (vapeur d'eau et neige inclus) ayant lieu entre les surfaces bâties et l'atmosphère. TEB ne prend en compte que les surfaces urbaines minérales. Pour tenir compte des surfaces végétales, hydriques ou naturelles (sol nu) pouvant exister en milieu urbain, TEB peut fonctionner en parallèle avec le schéma ISBA (pour Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère) (Noilhan et Planton, 1989), pour les espaces naturels, et des modules pour l'eau et la mer. L'ensemble compose le logiciel SURFEX. Pour la maille modélisée, les bilans d'énergie calculés pour chaque type de sol sont moyennés au prorata de leur surface pour obtenir le bilan du milieu (figure 5). Il n'y a en effet pas d'échanges horizontaux au sein de SURFEX entre les différents types de surface. Ceci ne permet donc pas de connaitre l'influence d'une position particulière (nord, sud, est, ouest) d'un point d'eau ou d'un espace vert sur le milieu urbain.

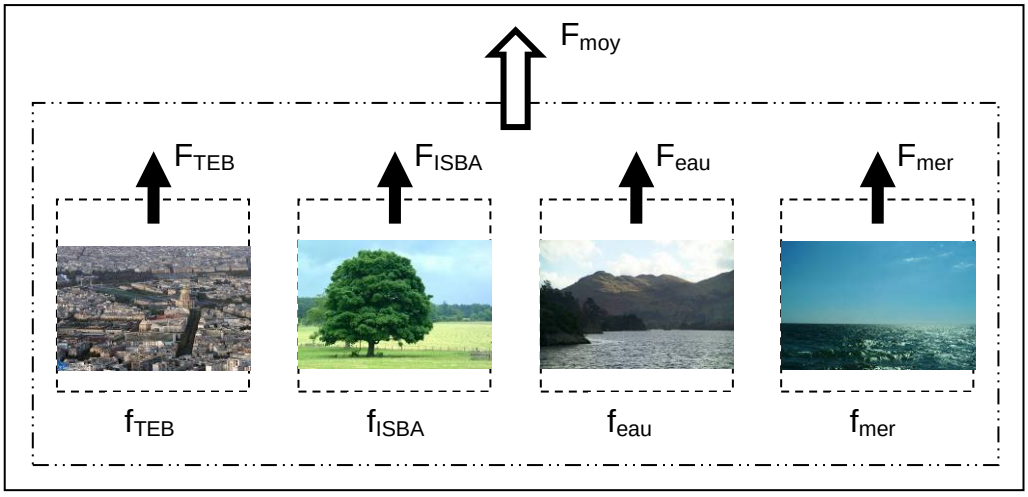
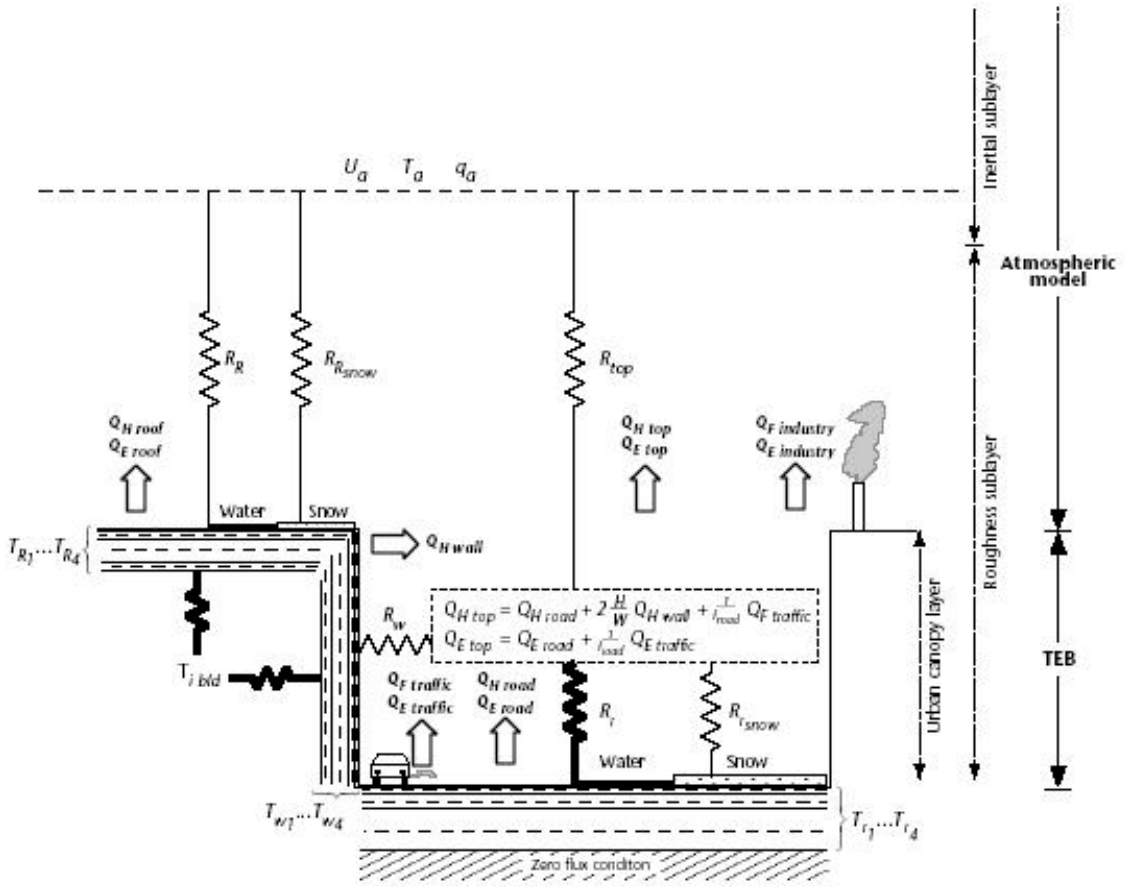


Figure 5 : Représentation des flux de surfaces moyens. D'après Lemonsu (2003).

SURFEX peut être utilisé en mode forcé. Dans ce cas, des paramètres atmosphériques (rayonnements incidents, température et humidité de l'air, vent, pressions, précipitations, etc.) sont imposés à une altitude de référence (10 m au-dessus des bâtiments par exemple). Il peut également être couplé avec un modèle météorologique tel que Méso-NH (modèle atmosphérique non-hydrostatique de méso-échelle de Météo-France) (Lafore *et al.*, 1998) ou encore AROME (le dernier modèle de prévision de Météo-France, opérationnel depuis fin 2008).

TEB simplifie considérablement la morphologie urbaine puisqu'il applique le concept de canyon urbain (Oke, 1978) pour toute la surface urbaine, c'est-à-dire qu'il considère le milieu urbain comme un groupe de rues identiques où toutes les directions sont équiprobables. Trois types de surfaces sont définies (mur, route, toit) et pour chacune d'elles est calculé un bilan d'énergie surfacique (deux bilans d'énergie peuvent être ajoutés en cas de neige sur les toits et

les routes). Le canyon est défini à partir de la largeur des rues, de la hauteur des murs et de la largeur des immeubles, qui sont constantes sur une maille du schéma. Le schéma considère des flux de chaleur anthropiques, tels que les flux de chaleur sensible et latente du trafic et de l'industrie (figure 6 et 7). Cette simplification permet cependant de représenter les phénomènes physiques urbains de façon relativement satisfaisante pour les climatologues. Des validations en mode forcé ont eu lieu à Marseille dans le cadre de la campagne ESCOMPTE-CLU (Lemonsu, 2003. Mestayer *et al.*, 2005), dans le centre-ville de Mexico (Masson *et al.*, 2002), pour un site industriel de Vancouver (Masson *et al.*, 2002), et pour un bassin versant périurbain (Lemonsu *et al.*, 2002).



U_a est la vitesse du vent au premier niveau atmosphérique, T_a est la température de l'air, q_a est l'humidité de l'air (U_a, T_a et q_a sont imposés à une altitude référence fixée par l'utilisateur), Q_H est le flux de chaleur sensible, Q_E est le flux de chaleur latente, R est la résistance aérodynamique utilisée pour les échanges.

Figure 6 : Les résistances aérodynamiques, les flux de chaleurs sensibles et latentes et les paramètres climatiques intervenant au sein du schéma TEB (Masson et al., 2002).

Pour décrire cette géométrie, TEB impose la définition de plusieurs paramètres que sont :

- la longueur de rugosité dynamique du couvert urbain[13] ($z_{0mville}$) ;
- la fraction occupé par les bâtiments ($a_{bât}$ = surface de toit / surface de toit et route) ;
- la hauteur du bâti ($z_{bât}$) ;
- et le facteur de forme du bâti (surface de mur / surface de route et toit = $(z_{bât}/W)*(1-a_{bât})$).

A ces paramètres géométriques s'ajoutent les paramètres radiatifs et thermiques des matériaux qui constituent le cadre bâti de chaque maille. Ces différents paramètres sont identiques sur toute la maille.

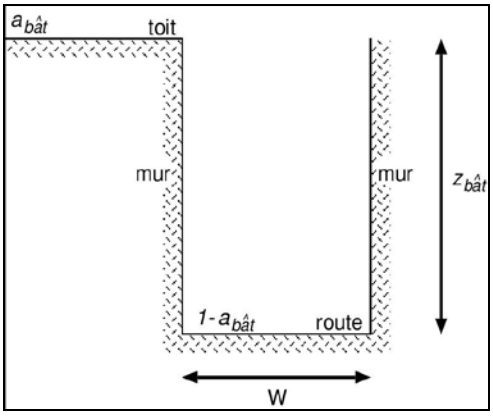


Figure 7 : Schématisation du canyon urbain dans TEB - avec W la largeur moyenne des rues, abât la fraction de bâtiment et zbât la hauteur moyenne des bâtiments (Lemonsu, 2003).

Nous avons effectué nos modélisations avec un forçage appliqué à 10m au-dessus des toits. Ce forçage comprend plusieurs paramètres climatiques dont la température de l'air, le rayonnement solaire, et la vitesse du vent. Nos modélisations ont montré que la température à 2m au sein du canyon suit de façon très proche les valeurs de la température de l'air en forçage, ce qui ne permet pas d'obtenir des écarts significatifs entre les différentes simulations. Nous avons donc privilégié l'analyse du bilan d'énergie qui a l'avantage d'apporter des informations supplémentaires puisqu'un bilan d'énergie comprend l'évolution du rayonnement net, des flux de chaleur sensible et latent, des flux de chaleur anthropique et des flux de chaleur stockée.

SURFEX simplifie en effet l'équation du bilan d'énergie en négligeant le flux de chaleur advectif ΔQ_A, ce qui nous donne l'équation suivante :

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S \quad (W.m^{-2})$$

Q^* est le rayonnement net, Q_F le flux de chaleur d'origine anthropique dû aux industries et au trafic dans le cas de TEB (le chauffage est pris en compte en supposant que la température intérieure des bâtiments ne peut descendre en dessous de 18°C), Q_H le flux turbulent de

[13] Pour nos modélisations, nous avons fixé la longueur de rugosité à 1/10 de la hauteur de bâti.

chaleur sensible, Q_E le flux turbulent de chaleur latente et ΔQ_S la variation de la quantité de chaleur stockée par la zone urbaine.

III.2. Choix du site

L'objectif des modélisations climatiques effectuées dans le cadre de cette thèse est de quantifier l'incidence climatique liée à la modification de facteurs urbains. Afin d'évaluer les influences des différents paramètres, il a été décidé de procéder en premier lieu à une variation unique de ces derniers, c'est-à-dire à des tests de sensibilité, puis ensuite à des variations de plusieurs paramètres comme nous le verrons. Une ville-témoin a été définie pour servir de point de départ, de cas-témoin. Il a été décidé de choisir Paris pour cas-témoin de nos modélisations.

Dans le cadre d'une convention, le bureau d'étude de Météo-France de la région Ile-de-France Centre nous a donné accès aux données météorologiques de l'année 2006 de la station Montsouris de Paris.

Préalablement à la mise en place de nos modélisations, nous avons proposé une description moyenne de Paris (tableau 1).

Tableau 1 : Valeurs des critères de description pour Paris.

Désignation	Valeur proposée pour Paris	Unité
COUVERTURE DU SOL		
Fraction de mers/océans	*0*	-
Fraction de lacs	0,03	-
Fraction de villes (TEB)	0.80	-
Fraction de sol nu/végétation (ISBA)	0.17	-
STRUCTURE URBAINE ET TISSU CONSTRUCTIF		
longueur de rugosité dynamique du couvert urbain - $z0m_{ville}$	3	m
la fraction occupée par les bâtiments (= surface de toit/surface de toit et route) – $a_{bât}$	0.5	-
la hauteur des bâtiments – $z_{bât}$	30	m
le facteur de forme du bâti (= surface des 2 murs/surface de route et toit = $2(z_{bât}/W)*(1-a_{bât})$)	2	-
PARAMETRES RADIATIFS ET THERMIQUES DES MATERIAUX URBAINS		
Toit		
nombre de couches pour le toit	3	-
albédo du toit - α_t	0.60	-
émissivité du toit - ε_t	0.10	-
capacité thermique des i couche de toit (de l'extérieur vers l'intérieur) - Ct_i	$2{,}74\ 10^6$ (zinc), $1.12\ 10^6$ (bois), $0.1\ 10^6$ (isolation)	$J.m^{-3}.K^{-1}$
conductivité thermique des i couche de toit - λt_i	110, 0.18, 0.04	$W.m^{-1}.K^{-1}$
épaisseur des n couche de toit - dt_i	0.0007, 0.02, 0.1	m
Route		
nombre de couches pour la route (j)	4	-
albédos de la route - α_r	0,10	-
émissivité de la route - ε_r	0.94	-
capacité thermique des j couche de route - Cr_j	$2.0\ 10^6$ (béton bitumineux), $2.0\ 10^6$ (béton bitumineux), $2.0\ 10^6$ (béton), $1{,}28\ 10^6$ (sol sec)	$J.m^{-3}.K^{-1}$
conductivité thermique des j couches de route - λr_j	2.0, 2.0, 1.35, 0.25	$W.m^{-1}.K^{-1}$
épaisseur des j couches de route - dr_j	0.01, 0.15, 0.25, 1.0	m

Désignation	Valeur proposée pour Paris	Unité
Murs		
nombre de couches pour les murs (k)	3	-
albédos des murs - α_m	0.40	-
émissivité des murs - ε_m	0.90	-
capacité thermique des k couches des murs - Cm_k	2 10^6, 2 10^6, 2 10^6 (béton)	$J.m^{-3}.K^{-1}$
conductivité thermique des k couches des murs - λm_k	1.35, 1.35, 1.35[14]	$W.m^{-1}.K^{-1}$
épaisseur des k couches des murs - dm_k	0.02, 0.2, 0.05	m
ACTIVITES HUMAINES : LES FLUX D'ORIGINE ANTHROPIQUE		
Le flux de chaleur sensible dû au trafic[15] - $Q_{Htrafic}$	37	$W.m^{-2}$
Le flux de chaleur latente dû au trafic- $Q_{Etrafic}$	3	$W.m^{-2}$
Le flux de chaleur sensible d'origine industrielle - Q_{Hindus}	0	$W.m^{-2}$
Le flux de chaleur latente d'origine industrielle. Q_{Eindus}	0	$W.m^{-2}$

III.3. Choix des simulations

Pour nos simulations, nous avons choisis deux forçages climatiques (une journée d'été et une journée d'hiver). Les données de forçage sont constituées par les paramètres recueillis à la station Montsouris de Paris, station située au cœur du parc de Montsouris. Les paramètres mis à disposition par Météo-France sont : la hauteur de précipitations horaire (millimètres), la température sous abri horaire (°C), la vitesse du vent horaire (m/s), la direction du vent a 10 m horaire (rose de 360), l'humidité relative horaire (%), la durée d'insolation horaire (minutes), le rayonnement global horaire (J/cm^2) et la nébulosité totale horaire (octas[16]).

Le forçage est appliqué 10 m au-dessus des toits et des surfaces végétales ou d'eau.

III.3.1 Une journée estivale

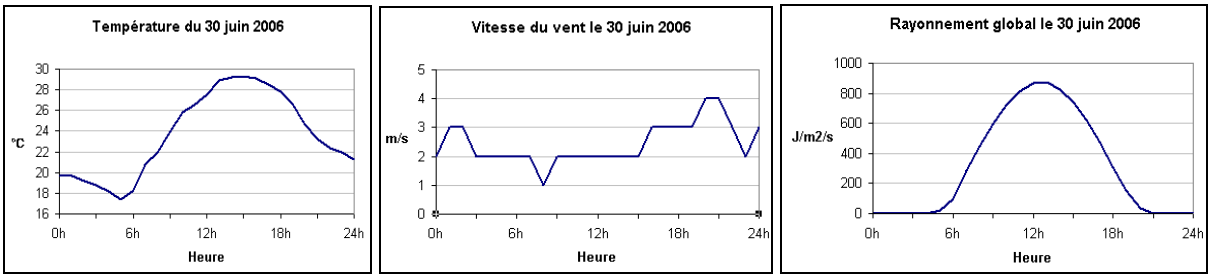


Figure 8 : Température (°C), vent (m/s) et rayonnement solaire ($J/m^2/s$) à la station Montsouris (Paris) le 30 juin 2006.

[14] Soit une résistance thermique de 0,37 $K.m^2.W^{-1}$, avec résistance superficielle liée à la convection de 0,17 $K.m^2.W^{-1}$ incluse.

[15] Les flux de chaleur sensible et latente dus au trafic sont supposés n'avoir lieu qu'entre 6h et 18h d'où une multiplication par deux par rapport aux chiffres calculés précédemment qui correspondait à une moyenne journalière.

[16] Un octa représente 1/8ème de la voûte céleste. Ainsi 8 octas équivaut à un ciel entièrement couvert.

Notre étude s'est appuyée sur la journée estivale du 30 juin 2006, journée ensoleillée et sans précipitation (nébulosité nulle hormis en tout début de matinée), d'où notre choix, dont les principales données climatiques sont présentées au sein de la figure 8.

III.3.2 Une journée hivernale

Notre étude s'est également appuyée sur la journée hivernale du 30 janvier 2006, journée ensoleillée, sans nuage (nébulosité nulle) et précipitation, d'où notre choix, permettant ainsi à la ville de s'échauffer. Les données climatiques de cette journée sont présentées au sein de la figure 9.

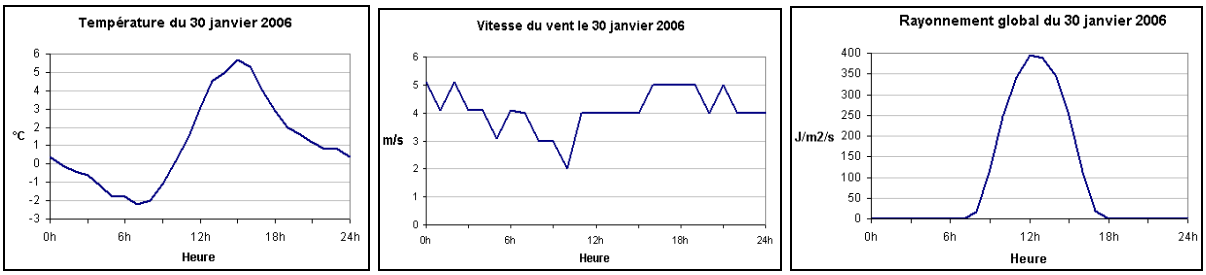


Figure 9 : Température (°C), vent (m/s) et rayonnement solaire (J/m^2/s) à la station Montsouris (Paris) le 30 janvier 2006.

Nous avons fixé à 18°C la température minimale à l'intérieur des bâtiments.

III.3.3 Tests de sensibilité

A partir de la description de Paris présentée précédemment, nous avons testé la sensibilité du bilan d'énergie de la ville à différents paramètres du cadre bâti et non bâti.

A notre connaissance, peu d'études de sensibilité du bilan d'énergie ont été effectuées. Nous pouvons néanmoins citer celle de Hamdi et Schayes (2008) effectuée avec le modèle FVM de Martilli, modèle qui considère explicitement les effets des bâtiments, des rues et autres matériaux artificiels sur le bilan énergétique de surface du milieu urbain, comme le fait le schéma de surface TEB.

L'objectif de l'ensemble de ces scénarii est de connaître la sensibilité du bilan d'énergie de différents paramètres de surface correspondant en grande partie aux différents critères utilisés au sein de TEB pour décrire une surface urbaine. En grande partie car, pour la forme urbaine, a été privilégiée la variation de la largeur des rues et de la profondeur de bâtiments, plutôt que celle de la fraction occupée par les bâtiments et du facteur de forme du bâti.

Cinq domaines d'action, en adéquation avec la manière dont se conçoit et se gère les milieux urbains, ont été proposés : le bâtiment (les caractéristiques techniques, physiques et de l'occupation du bâtiment), l'espace public (la nature et la conception de la voirie et des espaces végétalisés), l'organisation spatiale (l'organisation des bâtiments et de l'espace public dans la ville), ou encore les activités industrielles et les transports.

Les différentes valeurs utilisées sont présentées au sein du tableau 2. Chaque paramètre a été modifié un par un excepté dans le cas des simulations « bâtiments conformes à la RT 2005 » (Rth(toit) = 3,92 K.m^2.W^{-1} ; Rth(mur) = 1,21 K.m^2.W^{-1}), « Bâtiments conformes aux standards Minergie et Minergie P » (Rth(toit) = 5,05 ou 8,41 K.m^2.W^{-1} ; Rth(mur) = 1,90 ou

3,15 $K.m^2.W^{-1}$) et « bâtiments de couleur claire et très claire » (albédo des toits et des murs de 0,75 ou 0,85). Nous avons également simulé le cas d'un bâtiment Minerpie P de couleur très claire.

Cette étude de sensibilité s'appuie ainsi sur environ 80 simulations augmentant ou diminuant la valeur des paramètres. Des cas extrêmes sont proposés et s'appuient, selon les paramètres, sur des limites physiques et/ou sur un choix personnel.

Tableau 2 : Valeurs utilisées pour les différents facteurs dans l'étude de sensibilité.

BATIMENT		**GEOMETRIE URBAINE**	
Albedo des toits	0.05 < 0.45 < **<u>0.60</u>*** < 0.75 < 0.90 < 0.95	Largeur des rues (m)	10 < **<u>15</u>** < 30 < 45 < 60
Emissivité des toits	0.05 < **<u>0.1</u>** < 0.3 < 0.7 < 1	Hauteur des bâtiments (m)	10 < 15 < **<u>30</u>** < 45 < 60 < 100
Résistance thermique des toits ($K.m^2.W^{-1}$) – isolation thermique	0.28 < 1.39 < **<u>2.78</u>** < 5.28 < 6.94 < 10.28	Profondeur, largeur des bâtiments (m)	10 < **<u>15</u>** < 30 < 45 < 60
Capacité thermique des toits (10^6 $J.m^{-3}.K^{-1}$) – inertie	0.01 < 0.05 < **<u>0.1</u>** < 1 < 2 < 5	Fractions de végétation (non arrosée) (-)	0 < 0,09 < **<u>0,17</u>** < 0,26 < 0,34 < 0,50
Albédo des murs	0.05 < 0.25 < **<u>0.40</u>** < 0.55 < 0.70 < 0.95	Fractions d'eau (-)	0 < 0,01 < **<u>0,03</u>** < 0,06 < 0,12 < 0,20
Emissivité des murs	0.05 < 0.3 < 0.6 < **<u>0.9</u>** < 1	**ESPACES PUBLICS**	
Résistance thermiques des murs ($K.m^2.W^{-1}$) – isolation thermique	**<u>0.37</u>** < 2.04 < 3.70 < 5.37	Albédo des rues	0.05 < **<u>0.1</u>** < 0.25 < 0.40 < 0.95
Capacité thermique des murs (10^6 $J.m^{-3}.K^{-1}$) – inertie	0.01 < 1 < **<u>2</u>** < 3 < 4 < 5	Emissivité des rues	0.05 < 0.3 < 0.6 < **<u>0.94</u>** < 1
Bâtiments conformes à la RT 2005 (toits et murs)		Capacité thermqiue des rues (10^6 $J.m^{-3}.K^{-1}$) – inertie	0.1 < 1 < **<u>2</u>** < 3 < 4 < 5
Bâtiments Minergie or Minergie P (toits et murs)		**INDUSTRIES ET TRANSPORT**	
Bâtiments de couleur claire (toits et murs)		Trafic (Q_H / Q_E) ($W.m^{-2}$)	0 < 10 < 20 < **<u>37</u>** < 55 < 100 / 0 < 1.5 < **<u>3</u>** < 5 < 15
** En gras et souligné, les valeurs pour Paris.*		Industries (Q_H and Q_E)	**<u>0</u>** < 20 < 40

III.4. Choix de l'acteur : collectivités locales

Le changement climatique, auquel les villes peuvent se révéler mal adaptées, représente un enjeu et un challenge pour les aménageurs et architectes du milieu urbain, mais également des opportunités importantes de créer des environnements urbains innovants et attractifs. Aménageurs et architectes doivent ainsi faire preuve de créativité pour s'assurer que le cadre bâti sera adapté à une nouvelle donne climatique (Shaw *et al.*, 2007), mais également qu'il l'est au climat actuel. La structure de la ville peut être modifiée par l'aménagement urbain et l'architecture, qui sont en partie encadrés et/ou influencés par les politiques urbaines et la conception de nouveaux quartiers (Givoni, 1998). Il est alors possible d'agir sur le climat urbain au travers de ces politiques et de ces nouvelles conceptions.

L'avenir de la ville et son attractivité ne se trouvent ainsi plus uniquement dans la croissance économique qu'elle offre mais également dans la prise en compte des performances environnementales (énergie, pollution, sols, climat, etc.), comme en témoignent les nombreux éco-quartiers construits ou en cours de construction en France et en Europe. Cette évolution vers une meilleure prise en compte de l'environnement répond par ailleurs à une demande sociale de plus en plus forte d'amélioration du cadre de vie et de l'environnement.

La problématique du climat urbain est différente de celles de la qualité de l'air intérieur, des consommations énergétiques, du confort climatique intérieur, etc., dans le sens où le climat urbain est créé et influencé par l'ensemble de la ville plus que par un bâtiment en particulier. En effet, un bâtiment seul, ou une surface seule, ne peut pas modifier le profil climatique et le comportement thermique d'une ville (Poli *et al.*, 2007). En revanche, la somme de ces modifications le peut. L'action individuelle, qui est en premier lieu motivée par les besoins de l'utilisateur, induit une modification du bilan énergétique de la ville. Un bâtiment ou un aménagement devraient donc être conçus consciemment de façon à former une partie qui s'intègre dans un système plus complexe, et être évalué par rapport à son impact énergétique sur la ville (Poli *et al.*, 2007). Ce principe peut également s'appliquer à d'autres aspects comme l'efficacité énergétique et met en relief le rôle fondamental du bâtiment et de l'architecture en perpétuelle relation avec ce qui fait la ville, son cadre bâti, son environnement, ses habitants, etc. Il est cependant difficile de sensibiliser tous les acteurs de la construction à l'importance de la prise en compte du climat urbain s'ils ne peuvent percevoir ou évaluer individuellement les conséquences de leurs choix. De plus, les gains à l'échelle du bâtiment sont encore peu valorisables même s'ils existent. On peut citer, par exemple, la diminution des consommations énergétiques pour la climatisation en période estivale (Rosenfeld *et al.*, 1998). Les pouvoirs publics, avec leur vision d'ensemble et leurs activités au service de l'intérêt général, sont sans doute les acteurs les mieux à même pour commencer à intégrer dans la conception urbaine des éléments relatifs au climat urbain.

En ce qui nous concerne, nous nous sommes concentrés plus particulièrement sur la possibilité et la capacité des collectivités territoriales à pouvoir prendre en compte des enjeux du climat urbain au sein de leurs projets d'aménagement. Les collectivités territoriales ont la possibilité d'être à la fois exemplaires sur leur domaine de compétence mais également d'être organisatrices et responsables de l'aménagement du territoire ainsi que d'être incitatrices vis-à-vis des autres acteurs de la ville (architectes, urbanistes, habitants, promoteurs, employeurs, etc.).

IV. RESULTATS

IV.1. Simulations

L'ensemble des modélisations effectuées ont permis de chiffrer dans des conditions particulières les effets de certains facteurs sur le bilan d'énergie d'un milieu urbain. Le milieu urbain en question est Paris, ou plutôt une représentation simplifiée de Paris, et les conditions climatiques choisies sont deux journées de l'année 2006, l'une représentative de l'hiver et l'autre de l'été.

Les résultats exposés dans ce chapitre permettent de hiérarchiser en partie différents facteurs ou tout au moins de faire ressortir ceux ayant une influence prédominante par rapport aux autres. Les variations de paramètres n'ont ainsi pas eu, comme nous avons pu le constater, la même influence, le même effet sur le bilan d'énergie. Certains paramètres ont une influence faible en été comme en hiver, d'autres une influence essentiellement à l'une des deux saisons ou encore d'autres une influence à la fois en été et en hiver (tableau 3).

Par ‘peu d’influence’ ou ‘influence faible’, nous entendons le fait qu’entre chaque modélisations de la même série, hormis les cas très extrêmes (nous conservons uniquement en plus de Paris trois modélisations), les différences entre les moyennes des différents flux sont inférieures à 10 $W.m^{-2}$. Les influences très fortes correspondent, dans les mêmes conditions à l’apparition de différences, pour l’une des moyennes, de plus de 50 $W.m^{-2}$.

L’apparition dans l’une ou l’autre catégorie est dépendante de nos choix de valeurs pour les différentes modélisations et nous devons en tenir compte. Cependant, cela permet d’avoir un premier regard sur ces différents facteurs et leur plus ou moins grande influence sur le bilan d’énergie.

Comme le montre le tableau 3, les facteurs ayant l’impact le plus important sur le bilan d’énergie ne sont pas identiques en hiver et en été.

En été, les facteurs perturbant le bilan radiatif, c'est-à-dire le rayonnement net, sont ceux qui ont la plus grande influence sur le bilan d’énergie. C’est le cas de l’albédo des toits, de l’émissivité des murs et, par voie de conséquence, des bâtiments de couleurs claires et très claires (qui correspond globalement à une augmentation des albédos des murs et des toits). L’apport de rayonnement solaire est le double en été par rapport à l’hiver dans le cas de nos simulations, ce qui explique la prédominance de ces facteurs radiatifs principalement en été.

En été, l’influence moindre de l’albédo des murs par rapport à celui des toits s’expliquent par l’effet de piégeage du canyon (les rues modélisées sont très encaissées : 30m de hauteur et 15m de largeur), c'est-à-dire qu’une majorité des rayonnements réfléchis en plus grâce à un albédo plus élevé est renvoyée non pas vers l’atmosphère mais vers les surfaces voisines, c'est-à-dire le mur d’en face et la voirie. Cette situation se retrouve en hiver.

L’influence de l’émissivité des murs ou des toits sur le bilan d’énergie est dépendante de l’évolution de la température des surfaces. Cette température dépend de plusieurs éléments tels que la conduction de la chaleur au sein du mur ou du toit, de l’albédo de la surface et du rayonnement auquel elle est soumise. L’albédo des murs est de 0,40, celui des toits de 0,60. En plus du rayonnement solaire, les murs, contrairement aux toits, sont soumis au rayonnement solaire réfléchi par les murs voisins et la voirie ainsi qu’au rayonnement infrarouge de ces surfaces. Ceci peut permettre d’expliquer le fait que l’émissivité des murs ait une si grande influence durant l’été contrairement à l’émissivité des toits.

Tableau 3 : Influence sur le bilan d’énergie de différents facteurs selon la saison (hiver et été).

	Influence en hiver	**Influence en été**
BÂTIMENT		
Albédo des toits		
Emissivité des toits		
Isolation des toits		
Inertie des toits		
Type de toits		
Albédo des murs		
Emissivité des murs		
Isolation des murs		

Inertie des murs		
Bâtiments conforme à la RT 2005		
Bâtiments conformes aux standards Minergie et Minergie P		
Bâtiments de couleurs claires et très claires		
ESPACES PUBLICS		
Albédo des rues		
Emissivité des rues		
Inertie des rues		
Fractions de ville et de végétation (non arrosée)		
Fraction de villes et d'eau		
ORGANISATION SPATIALE		
Largeur des rues		
Hauteur des bâtiments		
Profondeur des bâtiments		
Organisation urbaine		
ACTIVITES INDUSTRIELLES ET TRANSPORT		
Trafic		
Industries		
	Influence faible (< 10W.m^{-2})	
	Influence peu importante (10W.m^{-2} ≤ < 30W.m^{-2})	
	Influence forte (30W.m^{-2} ≤ < 50W.m^{-2})	
	Influence très conséquente (≥ 50W.m^{-2})	

En hiver, ce sont les facteurs ayant une action sur les rejets d'origine anthropique (chauffage notamment) qui ont le plus d'influence sur le bilan d'énergie. Ces facteurs comprennent ainsi l'isolation des murs, les bâtiments conformes aux standards Minergie et Minergie P, qui modifient l'isolation des murs, et la hauteur des bâtiments, qui modifient proportionnellement la surface de murs par rapport aux deux autres types de surfaces (toits, routes), murs au sein desquels on observe le transfert de la chaleur intérieure du bâtiment vers l'extérieur. L'influence en relatif des caractéristiques radiatives de surface, même si elle est moindre que pour ces précédents facteurs, ne peut cependant être négligée.

En hiver, l'influence plus faible de l'isolation des toits par rapport à l'isolation des murs s'explique par deux aspects. Tout d'abord, la surface de toit est plus faible que la surface de mur donc les toits proposent une surface d'échange avec l'air plus petite que pour les murs. Secondement, l'isolation des toits dans le cadre de nos simulations est initialement meilleure que celles des murs (2,78 K.m^2.W^{-1} pour les toits et 0,37 K.m^2.W^{-1} pour les murs).

D'une manière générale, la forme du cadre bâti, sa géométrie, influencent la quantité et la proportion de surfaces de murs, de routes et de toits. Ainsi les modifications de celles-ci entraînent des variations du bilan d'énergie dues à la fois à une modification de l'accès au rayonnement solaire des différentes surfaces mais également à la modification de leur

proportion sachant que chaque surface possède ses propres caractéristiques physiques et donc un comportement thermique différent.

Il est intéressant de remarquer, qu'en hiver, une meilleure isolation entraîne moins de perte de chaleur au sein du milieu urbain et, par conséquent, une diminution de l'intensité de l'îlot de chaleur. Les mesures actuelles mis en œuvre pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments devraient donc conduire, principalement en hiver, à une différence de températures moindre entre l'espace urbain et les zones rurales voisines.

Hormis pour la végétation, que nos simulations ne nous ont pas permis de prendre en compte comme nous l'aurions souhaité notamment du fait de nos conditions initiales (sol sec), nous retiendrons que nos résultats concordent avec les études actuelles privilégiant pour diminuer l'îlot de chaleur urbain estivale une augmentation de l'albédo et de la surface végétalisée. Les conséquences sur le bilan d'énergie en hiver de cette augmentation d'albédo sont moindres et l'îlot de chaleur est principalement influencé durant cette saison par les flux de chaleur anthropique dus au chauffage.

Si aujourd'hui certaines villes sont construites presque entièrement à neuf (Dubaï au sein des Emirats arabes unis, Dongtan en Chine), ce n'est pas le cas des villes, notamment des pays développés, comme Paris. Pour ces villes, dont le cadre bâti est aujourd'hui presque entièrement figé, les marges de manœuvre pour s'adapter sont plus limitées du fait par exemple du caractère historique de nombreux bâtiments.

La question de savoir comment intégrer de nouveaux critères climatiques contraignants à l'aménagement urbain se pose.

Nous ne nous sommes pas attachés à l'ensemble des leviers d'action évoqués mais concentrés principalement sur deux d'entre eux : l'albédo des toits et les espaces végétalisés qui ont une influence importante principalement en été. En effet, l'îlot de chaleur urbain devient problématique particulièrement lors des vagues de chaleur et l'objectif principal est alors une diminution de son intensité durant l'été. Ces deux leviers n'influencent pas seulement le climat urbain et peuvent avoir des conséquences positives sur d'autres aspects. Il peut être intéressant de mettre ces avantages conjoints en avant pour valoriser ce qui pourrait être des stratégies ayant une double dividende ou « sans regret », de la même manière que les solutions proposées par exemple actuellement dans le domaine de l'efficacité énergétique qui permettent à la fois de diminuer les rejets en gaz à effet de serre et lutter ainsi contre le changement climatique mais également de diminuer les dépenses énergétiques. Rosenfeld *et al.* (1998) ont par exemple analysé les économies d'énergie qu'engendrerait pour Los Angeles (Etat-Unis) la mise en œuvre des stratégies suivantes : mise en place de matériaux de toits réfléchissants[17], mise en place de matériaux de voirie plus clairs et plantation d'arbres. Des questions complémentaires peuvent également apparaître avant de mettre en œuvre ces différentes stratégies : celles concernant l'éventuel surcoût des matériaux (Bretz *et al.*, 1997), celles concernant la performance sur le long terme de ces matériaux (Bretz et Akbari, 1997.

[17] Le toit réfléchissant ou « *cool roof* » est un système de toit qui possède une réflectance (ou albédo) élevée (abilité à réfléchir le rayonnement visible, infrarouge et ultraviolet du soleil et réduisant les transferts de chaleur vers le bâtiment) et une émissivité thermique élevée (capacité à rejeter une part importante de l'énergie solaire absorbé ou non réfléchi).

Akbari *et al.*, 2001) ou encore celles concernant le coût de plantation et d'entretien des arbres (Akbari *et al.*, 2001).

IV.2. Réflexions sur les moyens à disposition des collectivités territoriales françaises pour intégrer dans la conception urbaine des critères permettant d'influer sur l'environnement climatique

De son élaboration à sa mise en œuvre, un projet de territoire est l'occasion de prendre en compte les intérêts et points de vue multiples et parfois contradictoires (politiques et techniques, publics et privés, particuliers et collectifs, etc.), d'intégrer les différentes échelles du territoire (la ville, le quartier, l'espace d'activité, le secteur en développement, etc.), d'articuler les différents horizons temporels (préoccupations du quotidien, mandature, long terme). L'objectif est alors d'atteindre le difficile équilibre des composantes du développement durable : l'économique, le social et l'environnemental, tout en encourageant la participation des citoyens à l'avenir de leur territoire au travers de la gouvernance.

Pour la majorité des grandes villes des pays urbanisés, en particulier des pays européens, l'aménagement urbain ne sera pas fait majoritairement d'une nouvelle urbanisation ou de nouvelles constructions mais plutôt de réhabilitation, de rénovation, de transformation : il va falloir reconstruire plutôt que construire, il va falloir réaménager l'existant et l'adapter aux nouveaux besoins. A l'échelle nationale, selon la conjoncture, le bâtiment neuf représente chaque année de 1 à 1,5% du parc. Ce faible pourcentage représente par ailleurs pour la majeure partie une extension du parc existant et le taux de renouvellement, avec destruction du parc correspondant, serait de l'ordre de 0,1 à 0,2% par an (Carassus, 2007). Pour des villes comme Paris où il reste peu de places à l'extension du parc existant, on comprend, avec ces chiffres, à quel point la réhabilitation est un enjeu considérable.

Malgré ce frein à la mise en œuvre de modifications lourdes du cadre bâti, les villes ne sont pas pour autant démunies et il leur est possible de maîtriser l'aménagement ou la réhabilitation de leur territoire. Reste à apprécier la portée et les limites de ces documents d'urbanisme et à les employer au mieux pour promouvoir un aménagement durable, et, plus particulièrement dans notre cas, soucieux du climat de la ville.

Le dispositif législatif et réglementaire encadrant l'aménagement du territoire en France a évolué en fonction de différents facteurs tels que la prise en compte de l'environnement ou la décentralisation. Le dispositif actuel s'appuie sur trois types d'outils :

- Les outils de la planification avec les schémas de cohérence territoriale (SCOT), les plans locaux d'urbanisme (PLU) et les directives territoriales d'aménagement (DTA), qui organisent le territoire à différentes échelles. Ces échelles sont pour le SCOT un ensemble de communes, pour le PLU la commune ou le groupement de communes (communauté urbaine, communauté d'agglomérations) et pour la DTA un territoire de taille importante (exemples : le département des Alpes-Maritimes, les bassins miniers nord lorrains, l'estuaire de la Loire, ou encore l'aire métropolitaine lyonnaise) ;

- Le principe de contractualisation qui engage les différents acteurs sur des projets à financer en tenant compte des priorités de chacun (contrats entre les collectivités locales et l'état, contrats entre les collectivités publiques et les acteurs privés, etc.) ;
- Des outils programmatiques et sectoriels qui, par domaine, permettent d'étudier et d'organiser un ensemble cohérent de projets hiérarchisés pour prendre en compte les priorités et les moyens à y affecter (plan de déplacement urbain, plan local de l'habitat, etc.).

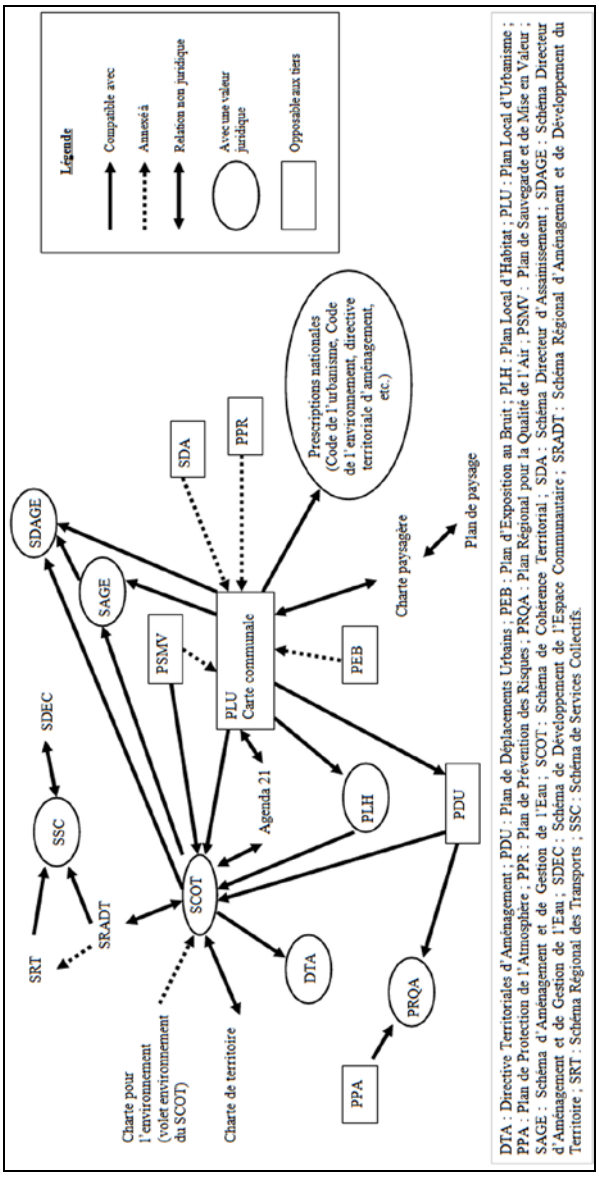


Figure 10 : Relations entre les documents d'urbanisme réglementaires et incitatifs en lien avec l'aménagement du territoire, l'urbanisme, le foncier, l'habitat, la gestion de la qualité de l'air, des déchets et de l'eau, l'environnement, les paysages, le patrimoine et le développement durable (Colombert, 2008).

Pour répondre aux attentes multiples et légitimes des populations tout en tenant compte des conséquences variées et complexes qu'elles peuvent avoir, l'élu et la collectivité doivent

opérer des choix et définir des orientations pour aménager le cadre de vie de leurs citoyens. Pour cela, de nombreux outils sont à leur disposition (figures 10 et 11) et il est nécessaire de penser la planification à une échelle territoriale pertinente (SCOT), locale (PLU, carte communale) en lien avec l'aménagement opérationnel (ZAC, lotissement, etc.).

La liste étant longue des documents s'attachant à différents aspects de la question environnementale, nous nous sommes attachés plus particulièrement aux Schémas de Cohérence Territoriale (SCOT) et aux Plans Locaux d'Urbanisme (PLU), qui jouent un rôle central (figures 10 et 11) dans le paysage de l'aménagement urbain et de l'environnement[18]. Nous avons également étudié comment pouvait être géré l'environnement par le biais de l'urbanisme opérationnel, c'est-à-dire lors de la création de projets d'aménagements de type Zone d'Aménagement Concerté (ZAC).

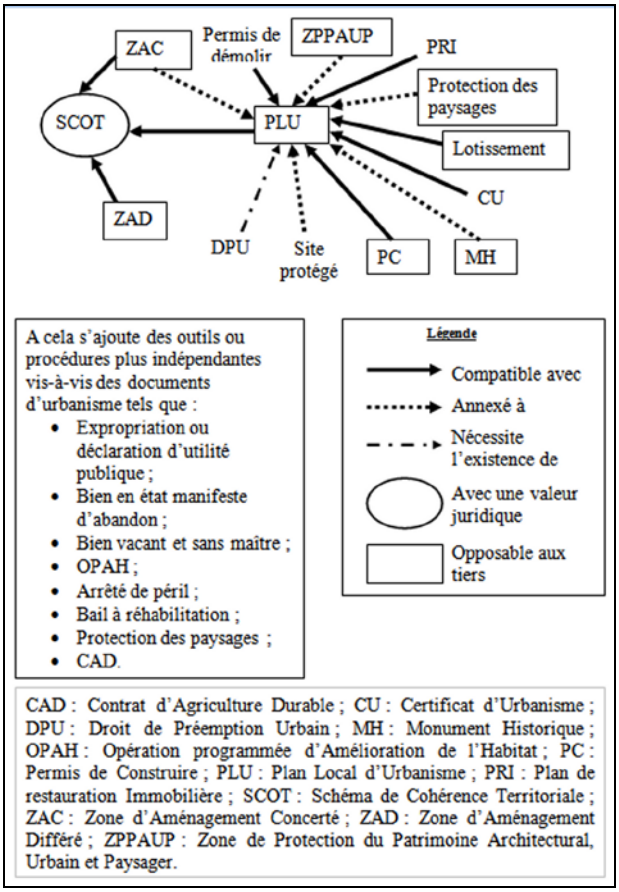


Figure 11 : Relations entre les outils opérationnels, les procédures à disposition des collectivités et le PLU et le SCOT, deux documents d'urbanisme réglementaires et incitatifs (Colombert, 2008).

Le PLU a une incidence forte sur l'aménagement et la qualité des bâtiments puisque c'est lui qui sert de référence obligatoire à l'instruction des diverses demandes d'occupation ou

[18] Il existe déjà des documents intégrant des préoccupations environnementales comme la Charte de l'environnement (qui peut correspondre au volet environnemental du SCOT) ou la charte paysagère mais ces documents, s'ils ne sont pas intégrés aux documents réglementaires, restent de simples recommandations et rien n'oblige à les prendre en compte.

d'utilisation des sols comme les permis de construire, les déclarations de travaux, les permis de démolir. Le SCOT agit plus en amont avec des directives plus générales que le PLU doit respecter. Regardons la possible prise en compte de l'environnement climatique qu'ils offrent.

IV.2.1 PLU, SCOT et ZAC : quelle influence possible sur l'environnement climatique ?

Le SCOT et le PLU comme la carte communale doivent répondre à des objectifs communs précisés à l'article L 121-1 du code de l'urbanisme et qui concerne autant la diversité des fonctions urbaines et la mixité sociale dans l'habitat, que l'équilibre et la gestion durable des espaces urbains et ruraux.

Le SCOT et le PLU ont ainsi un rôle stratégique pour le territoire. Ils permettent de définir un avenir possible, une évolution voulue et souhaitée du territoire. Ils sont l'expression des nombreuses volontés des collectivités mais surtout des volontés affichées en termes d'environnement, d'écologie, de cadre de vie. Un de leurs objectifs est en ce sens primordial : préservation de la qualité de l'air, préservation des espaces verts, prévention des risques naturels prévisibles, prévention des nuisances de toute nature ; tous ces éléments permettent aujourd'hui aux élus et aux collectivités de transcrire au sein de leur document la volonté d'une ville en adéquation avec son climat.

Le SCOT, dont l'objectif est de proposer un projet de territoire cohérent et partagé par les différentes collectivités, est plus adapté que le PLU pour aborder les grands enjeux d'équilibre, de développement et de protection des risques majeurs, de qualité de l'eau, et notamment sur les territoires particulièrement sensibles (montagne, littoral, périphérie des grandes agglomérations). C'est à cette échelle que se traitent de manière globale la consommation économe d'espace et l'organisation des déplacements sur la base des bilans des PDU lorsque ces derniers existent.

Le PLU est en revanche plus adapté pour transposer, au travers du plan de zonage, du règlement et des documents graphiques, les orientations générales d'aménagement ; il est l'outil par lequel on pourra protéger les espaces naturels sensibles, traiter des problèmes de nuisances sonores, développer les réponses adaptées en matière d'assainissement, d'eau et de gestion des déchets, protéger et mettre en valeur des espaces agricoles et naturels périurbains, etc. Le PLU réglemente l'usage des sols. Il influence donc très directement la vie quotidienne et le cadre de vie des habitants.

D'une manière générale, et quelle que soit l'échelle, l'élaboration de tout document d'urbanisme (SCOT, PLU, etc.) nécessite une approche globale et pluri-thématique qui ne simplifie pas nécessairement l'introduction d'une volonté aussi précise que la « maîtrise », et/ou la prise en compte de l'îlot de chaleur urbain, du climat urbain.

Nous avons regardé plus précisément la composition et les tenants et aboutissants du SCOT et du PLU, et le mode de fonctionnement d'une ZAC, outil de référence de l'urbanisme opérationnel. En effet, si ces premiers éléments nous confirment le fait que SCOT et PLU sont deux documents d'urbanisme qui semblent adaptés pour prendre en compte en leur sein la problématique du climat urbain, la question du « comment ? » reste posée. Pour cela, nous avons confronté différents domaines d'action (bâtiment, espace public, organisation spatiale) aux possibilités offertes par les SCOT, les PLU et les ZAC (tableau 4).

Tableau 4 : Atouts et limites des SCOT, des PLU et des ZAC pour la prise en compte de l'environnement climatique et la mise en œuvre de mesures pour influer sur le climat urbain (Colombert, 2008).

<table>
<tr><th>Domaines d'action</th><th colspan="2">Bâtiment</th><th colspan="2">Espace public</th><th colspan="2">Organisation spatiale</th></tr>
<tr><td></td><td>Forme du bâtiment</td><td>Composition du bâtiment</td><td>Forme, géométrie et composition des rues</td><td>Nature des espaces végétalisés</td><td>Densités (densité de construction, densité d'espaces végétalisés, etc.)</td><td>Agencement des espaces et forme et profil de l'espace urbain</td></tr>
<tr><td>SCOT
↓
Opposable</td><td colspan="4"></td><td colspan="2">[+] Etat initial qui peut être l'occasion d'effectuer une carte climatique du territoire. Document d'orientation générale avec de possibles recommandations relatives au climat urbain.
[–] Document non opposable aux tiers.</td></tr>
<tr><td>↓</td><td colspan="6">[+] Possibilité d'intégrer au rapport de présentation et au PADD des éléments sur les enjeux du climat urbain pour la collectivité.
[–] Documents non opposables aux tiers.</td></tr>
<tr><td>PLU
↓
Opposable</td><td>[+] Art. 6, 7, 8 et 10 (opposable aux tiers) du règlement sur l'implantation des constructions et la hauteur maximum des constructions.

[–] Taux de renouvellement du bâti <1% du bâti.</td><td>[+] Art. 11 (opposable aux tiers) sur l'aspect extérieur. Art. 14 : augmentation du COS si critères de performances énergétiques.
[–] Aucune possibilité d'intégrer des critères thermiques (limite droit d'urbanisme/ droit de la construction)</td><td>[+] Art. 6, 7, 8 et 10 (opposable aux tiers) du règlement sur l'implantation des constructions et la hauteur maximum des constructions. Gestion par les services de la ville.
[–] Taux de renouvellement du bâti <1% du bâti.</td><td>[+] Gestion par les services de la ville des espaces verts.</td><td>[+] Art. 9, 13 et 14 (opposable aux tiers) sur l'emprise au sol, les espaces libres et les plantations, et sur le COS.</td><td>[+] Zonage (zones urbanisés, à urbaniser, agricole, naturelles ou forestières).

[–] Taux de renouvellement du bâti <1% du bâti.</td></tr>
<tr><td>↓
ZAC</td><td colspan="5">[+] Règlement plus contraignant que celui du PLU et permettant d'introduire des exigences sur les caractéristiques thermiques et radiatives du bâtiment.

[–] Règlement sur un « morceau » de territoire.</td><td></td></tr>
<tr><td>Légende</td><td colspan="6">Echelle spatiale inappropriée.</td></tr>
</table>

Les communes et leurs regroupements ont acquis durant ces dernières décennies des compétences renforcées en matière d'environnement et d'urbanisme. L'outil essentiel mis à disposition des communes reste cependant le permis de construire dont l'instruction avant délivrance ou refus permet à l'autorité compétente de vérifier si le projet est en adéquation avec les textes en vigueur, avec le PLU. Tout projet architectural doit ainsi inclure un volet paysager qui précise son implantation, son organisation, son volume, le choix des matériaux

et des couleurs et doit être accompagné de documents graphiques ou photographiques précisant l'insertion dans l'environnement et l'impact visuel des bâtiments.

A ce renforcement des compétences en matière d'environnement, s'ajoute le fait que le travail et les différentes actions autour des problématiques environnementales en général ont permis de créer un terrain favorable à la prise en compte de situations particulières telles que l'îlot de chaleur urbain. Le rôle important de la communauté scientifique doit également être souligné. Les responsables des collectivités sont également rendus de plus en plus attentifs aux nécessités et possibilités offertes par les instruments juridiques existant dans le domaine de l'environnement.

Cependant, l'urbanisme réglementaire n'offre pas de réelles perspectives d'intégration de leviers d'action performants tels que l'albédo des surfaces. L'albédo étant une propriété physique des matériaux, imposer sa valeur au sein d'un PLU revient à empiéter sur le droit de la construction, ce qui n'est pas légal dans le contexte actuel. L'albédo étant intimement lié à la couleur, l'utilisation de ce critère, qui est plus de l'ordre de l'esthétique, est envisageable. Cependant, les murs et les toits, et donc leur couleur, font partie du paysage urbain et doivent s'intégrer harmonieusement au bâti existant, qui est de couleur plus ou moins claire selon les villes. Les marges de manœuvre sont ainsi peu conséquentes. Cependant, la possibilité d'un dépassement du COS pour des constructions remplissant des critères de performance énergétique (article L128-1 du code de l'Urbanisme) montre que des possibilités existent aujourd'hui pour favoriser des constructions plus performantes du point de vue de l'énergie. Il est à noter que ces performances ne concernent pas uniquement le chauffage, mais également les moyens d'assurer le confort d'été (climatisation par exemple), la ventilation, la production d'eau chaude sanitaire ou l'éclairage des locaux. Le besoin en climatisation, et par conséquent la consommation énergétique associée, étant influencé par la couleur des matériaux en façade ou sur les toits (Rosenfeld et *al.*, 1998), une brèche existe déjà pour privilégier des matériaux de surface clairs.

La collectivité peut également influencer au travers de son PLU la proportion d'espaces végétalisés ou encore la géométrie des rues. Cependant, pour ce dernier aspect, dont l'influence sur le climat urbain est par ailleurs complexe (Colombert, 2008), le taux de renouvellement du bâti inférieur à 1% dans des grandes villes ne permet pas réellement de mettre en œuvre une action déterminante.

Les projets d'aménagement et de développement durable des SCOT et des PLU peuvent intégrer des enjeux globaux relatifs au climat urbain et à l'îlot de chaleur, permettant ainsi une première sensibilisation des élus, des services techniques de la ville et des citoyens à la question.

Alors que les outils réglementaires offrent peu de possibilités, l'urbanisme opérationnel et, plus précisément, les ZAC, en permettant aux communes d'introduire un règlement plus contraignant que celui du PLU, peuvent être un premier outil adapté pour introduire de nouveaux critères sur l'environnement climatique. Il est possible, notamment par le biais de la question du confort d'été, de fixer des critères tels que : couleur claire pour les façades exposées au soleil et pour la toiture, toiture végétalisée, etc. Il est cependant nécessaire que les

élus ou les personnes en charge de l'écriture du règlement soient alors sensibilisés aux questions de climat urbain et d'îlot de chaleur.

IV.2.2 Démarches incitatives et informatives : des moyens à ne pas négliger

Échelon politique et administratif le plus proche des citoyens, les collectivités territoriales, et plus particulièrement les communes et leurs groupements, peuvent également inciter les citoyens en les informant ou en les soutenant dans la mise en œuvre des pratiques plus bénéfiques pour leur environnement climatique. La réglementation ne pouvant pas toujours favoriser la mise en œuvre de nos leviers d'action, l'incitation, par exemple, ou encore l'information sont des solutions que les collectivités peuvent mettre en place.

Les collectivités territoriales peuvent tout d'abord donner l'exemple en intégrant dans leur propre choix des critères permettant d'améliorer la qualité climatique du milieu urbain. Leurs compétences comprennent en effet la gestion et l'entretien de nombreux bâtiments publics (mairies, écoles, etc.), l'entretien de la voirie communale, et, bien sur, l'urbanisme. L'objectif, en étant exemplaire, est d'amorcer la demande de la part des citoyens, demande qui s'adresserait alors autant aux acteurs publics qu'aux acteurs privés de la construction et de l'aménagement urbain.

Les thèmes de développement durable et de changement climatique ont intégré les politiques publiques ces dernières années et ont donné lieu à la création de deux dispositifs : l'agenda 21 local et le plan climat territorial, plus ou moins utilisés à l'heure actuelle pour intégrer des éléments propres au climat urbain par le biais notamment de l'adaptation au changement climatique.

Aujourd'hui, la plupart des plans climat territoriaux sont axés sur l'énergie et sa (sur)consommation, beaucoup plus que sur l'adaptation au changement climatique. Ce dernier thème revient par ailleurs souvent à traiter de la question du risque, notamment en période de crise, face aux inondations et aux canicules beaucoup plus qu'à réfléchir sur la nécessité de modifier notre façon d'aménager et de concevoir la ville. Le thème de l'adaptation est encore souvent perçu de façon négative et synonyme d'échec des moyens de lutte contre le changement climatique.

La France ayant un climat clément, cela explique peut-être également pourquoi la modification de ce dernier et l'adaptation qu'il faudrait mettre en œuvre ne préoccupent pas toujours les collectivités.

Malgré tout, certaines municipalités ont lancé ou participé à des évènements mettant en relation changements climatiques, adaptation et climat urbain. C'est le cas de Rennes et de Grenoble avec les travaux Rennes + 6°C et Grenoble + 6°C[19], qui ont permis de sensibiliser les citoyens, les élus, les services techniques et les entreprises à une thématique encore récente : l'adaptation de l'environnement à une nouvelle donne climatique. Ce travail de sensibilisation est encore partiel et l'apport de connaissances de la part des scientifiques

[19] Nous noterons que ces deux évènements ont été en premier lieu à l'initiative soit d'étudiants architectes en fin de cursus soit d'universités.

devrait permettre de l'améliorer[20]. L'expérience du groupe Descartes lors de la consultation sur le Grand Paris l'illustre bien. Des chercheurs de Météo-France ont participé au projet et montré qu'il est possible, à partir d'une régénération globale des forêts et des cours d'eau de la région parisienne alliée à un scénario de renouvellement des matériaux de surface des espaces publics et des bâtiments, de diminuer la température de Paris de 2°C.

En plus de devoir faire preuve d'un certain courage politique pour imposer la nécessité de penser l'adaptation au changement climatique, les maires doivent penser à long, voire très long, terme, ce qui n'est pas en adéquation avec les temps courts de la vie politique locale (environ 5 ans) et du planning de l'urbanisme (entre 10 et 30 ans). Cependant, l'adaptation au changement climatique ne doit pas se faire uniquement au travers des gestions de crise (canicule, inondation, etc.), et les plans climat territoriaux ou les agendas 21 locaux peuvent être perçus comme une porte d'entrée plus aisée, car non réglementaire, pour faire partager cette nouvelle préoccupation de l'environnement climatique actuel et futur. Les éléments tels que les toitures, les murs ou les voiries réfléchissantes ou claires peuvent ainsi y être valorisés au même titre que la végétalisation de l'espace urbain.

IV. CONCLUSION

A la manière de la ville, qui peut se comprendre et s'appréhender par les différentes relations entretenues par ses composantes, le climat urbain s'analyse aussi, comme nous l'avons constaté en première partie, à différentes échelles et par la mise en évidence de certaines relations de cause à effet. A l'échelle micro, c'est-à-dire à l'échelle de la rue, les principaux mécanismes physiques mis en jeu concernent les écoulements de l'air – fortement perturbés par le milieu urbain –, l'évapotranspiration – en nette diminution –, les apports anthropiques de chaleur, ou encore les perturbations radiatives et thermiques, dues principalement à la géométrie de la ville et aux propriétés radiatives des matériaux de construction.

L'ensemble de ces mécanismes physiques initiés à l'échelle de la rue engendre des phénomènes à l'échelle de la ville. Nous pouvons les expliciter au travers du bilan radiatif – dont l'ensemble des termes est affecté par le milieu urbain du fait de sa géométrie, des matériaux ou de la pollution atmosphérique –, du bilan énergétique –dont l'étude permet d'expliquer notamment la formation de l'îlot de chaleur urbain –, du bilan hydrique, de la circulation atmosphérique et des précipitations et averses orageuses.

La ville influence ainsi, plus ou moins significativement, l'ensemble de ces phénomènes dont l'appréciation nécessite de tenir compte de la situation géographique et de la topographie (montagne, vallée, plaine, etc.).

Plusieurs facteurs participent à la formation du climat urbain :

- des facteurs naturels : les conditions anticycloniques, la saison, les conditions météorologiques de la journée, la vitesse du vent, la couverture nuageuse, etc.

[20] Le 5ème symposium de la recherche urbaine sur le thème « villes et changement climatique : répondre à un agenda urgent » qui a eu lieu à Marseille les 28, 29 et 30 juin 2009 participe à ce travail de sensibilisation des acteurs de la ville.

- et des facteurs urbains : la couche superficielle du sol (présence plus ou moins importante de surfaces végétales ou d'eau), les activités humaines (rejets de chaleur anthropique et de polluants), et la structure urbaine (morphologie du cadre bâti, matériaux de construction).

L'îlot de chaleur est un des aspects du climat urbain les plus perceptibles. Des recherches sont menées pour comparer l'influence de plusieurs critères pour permettre une diminution de l'îlot de chaleur urbain. Différentes études mettent ainsi en évidence l'influence de la végétalisation des espaces, de la variation des flux de chaleur d'origine anthropique, et de l'augmentation de l'albédo des surfaces.

Les tests de sensibilité, à partir d'une proposition de domaines d'action qui sont le bâtiment, l'espace public, l'organisation spatiale, les activités industrielles et le transport, complètent ces informations par le biais d'une modélisation du bilan d'énergie de plusieurs milieux urbains. Comme le signale SASAKI *et al.* (2008), le bilan d'énergie permet de mettre en avant les facteurs qui gouvernent l'augmentation et la diminution de la température de l'air. Cette modélisation permet ainsi de tester la sensibilité du climat urbain à la variation de différents facteurs.

Nos simulations ont permis de confirmer le rôle prédominant des paramètres radiatifs dans le bilan d'énergie de la ville en été. Durant l'hiver, c'est un autre paramètre thermique, l'isolation, qui a la plus grande influence. Hormis pour la végétation, que nos simulations ne nous ont pas permis de prendre en compte comme nous l'aurions souhaité, nos résultats concordent avec les études actuelles privilégiant pour l'été une augmentation de l'albédo et de la surface végétalisée pour diminuer l'îlot de chaleur urbain. Les conséquences sur le bilan d'énergie en hiver de cette augmentation d'albédo sont moindres et l'îlot de chaleur est principalement influencé, durant cette saison, par les flux de chaleur anthropique dus au chauffage.

La forme du cadre bâti influence la quantité et la proportion de surfaces de murs, de routes et de toits. Ainsi, les modifications de cette forme entraînent des variations du bilan d'énergie dues à la fois à une modification de l'accès au rayonnement solaire des différentes surfaces mais également à la modification de leur proportion sachant que chaque surface possède ses propres caractéristiques physiques et donc un comportement thermique différent. L'influence de la forme du cadre bâti sur le bilan d'énergie est donc complexe.

Enfin, nous avons montré que les collectivités territoriales ne peuvent pas œuvrer librement pour intégrer dans la conception urbaine des critères permettant d'influer sur l'environnement climatique. Ceci s'explique principalement par les limites entre droit de l'urbanisme, qui s'apparente à une forme de droit d'affectation des sols, garant de l'équilibre et de l'esthétique des lieux, et droit de la construction et de l'habitat. En effet, le PLU, dont les tenants et aboutissants sont réglementés par le droit de l'urbanisme, ne peut fixer à l'heure actuelle de règles concernant des propriétés radiatives de matériaux ou alors, de manière détournée, par le biais de la couleur ou encore de l'efficacité énergétique d'été.

Toutefois, le PLU permet d'influer sur la forme du cadre bâti et des rues notamment au travers de la réglementation concernant le prospect des rues. Le très faible taux de

renouvellement du bâti et l'influence complexe de la forme du cadre bâti sur le bilan d'énergie n'en fait cependant pas un levier facile à mettre en œuvre. Le PLU permet également d'influer sur la présence d'espaces végétalisés par le biais des articles de son règlement concernant l'emprise au sol, le coefficient d'imperméabilisation ou encore le pourcentage d'emprise d'espaces végétalisés.

Ainsi, si le PLU permet, tout comme d'ailleurs le SCOT, d'inscrire au travers de son projets d'aménagement et de développement durable des enjeux globaux relatifs au climat urbain et à l'îlot de chaleur, la mise en pratique sur le terrain n'est pas évidente.

Malgré tout, aujourd'hui, plusieurs outils sont à la disposition des collectivités territoriales. C'est le cas notamment des ZAC, qui offrent une plus grande liberté pour les prescriptions inscrites dans leur règlement et peuvent ainsi recommander des couleurs claires pour les façades exposées au soleil et la mise en œuvre de toitures végétalisées. C'est également le cas des agendas 21 locaux et des plans climats territoriaux, même si aujourd'hui peu d'entre eux abordent les questions d'îlot de chaleur urbain ou, plus globalement, de climat urbain. L'adaptation aux impacts du changement climatique, thème qui peut être abordé par les plans climat comme les agendas 21, peut en effet permettre une meilleure compréhension de l'enjeu du climat urbain. Ces plans et agendas permettent ainsi aux collectivités de s'engager dans différentes actions pour favoriser une meilleure prise en compte du climat.

Le travail et les différentes actions autour des problématiques environnementales en général ont ainsi permis de créer un terrain favorable à la prise en compte de questions plus précises telles que l'îlot de chaleur urbain. De plus, les compétences des collectivités territoriales en matière de gestion et d'entretien de nombreux bâtiments publics et de la voirie communale offrent aux collectivités la possibilité d'occuper un rôle de premier plan en étant elles-mêmes exemplaires.

Ainsi des moyens et des outils, avec leur portée et leurs limites, sont disponibles pour intégrer dans la conception urbaine des critères permettant d'influer sur l'environnement climatique.

Ce travail de recherche a investigué des domaines de connaissance distincts que sont la climatologie urbaine et l'urbanisme. Il s'inscrit ainsi dans un cadre pluridisciplinaire tendant à créer une passerelle entre deux champs qui ont encore peu l'habitude de se côtoyer. Cette thèse ne clôt pas la problématique des facteurs influençant le climat urbain et sur lesquels l'homme peut agir au travers de l'aménagement des villes. Elle ouvre au contraire plusieurs perspectives de recherche sur ce sujet.

La première perspective est directement liée à un choix de recherche : l'étude du bilan d'énergie. Pour permettre une meilleure sensibilisation des politiques, comme des aménageurs, des urbanistes, des architectes ou, plus simplement, des citoyens à l'influence de certains facteurs sur le climat, il est nécessaire de présenter des résultats relatifs aux températures. Des simulations utilisant *Town Energy Balance* en mode couplé avec un modèle atmosphérique peuvent le permettre. Ce travail va être en partie effectué dans le cadre d'un projet de recherche (EPICEA - Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne) réunissant Météo-France et le CSTB.

Ce projet s'appuiera, entre autres, sur les résultats issus du travail de recherche présenté ici. L'objectif est dans un premier temps de modéliser, à partir d'une description de Paris avec un maillage ayant une échelle de 250*250m, la situation durant la canicule de 2003. Ensuite, une sélection de stratégies, permettant principalement de diminuer l'intensité de l'îlot de chaleur urbain, sera effectuée à partir notamment des résultats des simulations présentées dans la troisième partie de cette thèse. Leur simulation durant la vague de chaleur de 2003 permettra d'analyser, pour une situation de canicule, la sensibilité du climat urbain à différents facteurs, qui comprendront notamment la part d'espaces verts et l'albédo des surfaces.

Dans un deuxième temps, il serait également intéressant de connaître pour chaque ville les possibilités effectives d'intervention compte tenu de son architecture, de sa forme urbaine, etc., afin d'identifier les leviers stratégiques et pertinents. A ces caractéristiques « physiques » s'ajoutent également des contraintes économiques et sociales qu'il serait intéressant d'identifier puisqu'elles pourraient constituer un frein à la mise en œuvre efficace d'une nouvelle politique attentive au climat. Inversement, ces différentes stratégies peuvent apporter des bénéfices supplémentaires qu'il est possible de valoriser.

A ces perspectives, principalement du domaine des sciences physiques, s'ajoutent la nécessité d'interroger d'autres domaines tels que la politique urbaine ou l'économie. En effet, la question du climat urbain, pour être intégrer consciemment à la pratique de l'aménagement urbain, doit devenir un enjeu politique. Cela nécessite de comprendre comment se crée une nouvelle préoccupation, pourquoi les politiques portent un intérêt important à telle problématique et un intérêt moindre à une autre. L'économie peut également aider, au même titre que pour la diminution des rejets en gaz à effet de serre, à réfléchir sur la création d'outils permettant de favoriser la mise en œuvre de différents leviers permettant d'agir sur le climat urbain.

La question du climat urbain et plus particulièrement de l'îlot de chaleur s'inscrit dans le sujet plus général de l'adaptation aux impacts des changements climatiques. Les collectivités territoriales sont aujourd'hui en demande croissante de connaissances sur les impacts mais également sur les moyens disponibles et les solutions locales à envisager.

Cette thèse a ainsi contribué à une meilleure compréhension de la capacité du milieu urbain à appréhender certains impacts des changements climatiques.

BIBLIOGRAPHIE

Ademe. Gestion du risque climatique et adaptation aux changements, *Ademe et vous – Recherche*, n°1, 25 juillet 2007. Disponible sur : http://www2.ademe.fr

Akbari, h. Pomerantz, m. Taha, h. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, vol.70, n°3, 2001, p. 295-310.

Asaeda, Takashi. CA, Vu Thanh. WAKE, Akio. Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. *Atmospheric Environment*, vol.30, n°3, 1996, p. 413-427.

Bernatzky, Aloys. The contribution of trees and green spaces to a town climate. *Energy and Buildings*, vol.5, 1982, p. 1-10.

Bertrand, F., Larrue, C., 2007. *Gestion territoriale du changement climatique, une analyse à partir des politiques régionales. Rapport final, volume 1, synthèse, programme GICC-2*. Laboratoire Ville-Société-Territoire, UMR CITERES 6173, Université de Tours.

Besancenot, J.P., 2002. Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines, *Environnement, Risques et Santé*, vol.1, n°4, 229-240.

Bitan, Arieh. The high climatic city of the future. *Atmospheric Environment*, vol.26B, n°3, 1992, p. 313-329.

Bretz, S.E. Akbari, H. Long-term performance of high albedo roof coatings. *Energy and Buildings*, vol.25, 1997, p. 159-167.

Buechley, Robert W. Van Bruggen, John. Truppi, Lawrence E. Heat island = Death island? *Environmental research*, vol. 5, 1972, p. 85-92.

Cantat, Olivier. Conséquences climatiques des variations du bilan d'énergie en région parisienne. *Géographie physique et environnement*, 1993, n°1, p. 19-36.

Carassus, J. Trois modèles de maîtrise de l'énergie dans les bâtiments, une comparaison internationale, Les Annales de la Recherche Urbaine**,** n° 103, 2007, p. 87-94.

Chimklai, Parichart. Hagishima, aya. Tanimoto, Jun. A computer system to support Albedo Calculation in urban areas. *Building and Environment*, vol.39, 2004, p. 1213-1221.

Christen, A. Vogt, r. Rotach, M.W. Profile measurements of selected turbulence characteristics over different urban surfaces. In: Actes du 4th International Conference on Urban Air Quality, *Prague, 25-27 mars 2003*, p. 408-411.

Colombert, Morgane. *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville*. Thèse de doctorat, spécialité : génie Urbain, Université Paris-Est, 2008, 537 p.

Duchêne-Marullaz, Philippe. *Recherche exploratoire en climatologie urbaine*. CSTB, 1980, 86 p.

Escourrou, Gisèle. *Climat et environnement, les facteurs locaux du climat*. Masson, 1981, 168 p. (Géographie)

Escourrou, G., 1991. *Le climat et la ville*, Paris, Éditions Nathan.

Fan, h. Sailor, D. J. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: A comparison of implementations in two PBL schemes. *Atmospheric Environment*, 2005, vol.39, n°1, p. 73-84.

Giridharan, R. Lau, S.S.Y. Ganesan, S. Givoni, B. Urban design factors influencing heat island intensity in high-rise high density environments of Hong Kong. *Building and Environment*, vol.42, 2007, p. 3669-3684.

Givoni, B. *L'Homme, l'Architecture et le Climat*, Paris, Éditions du Moniteur, 1978.

Givoni, B. *Climate considerations in building an Urban Design*, John Wiley & Sons, 1998.

Golany, Gideon S. urban design morphology and design performance. *Atmospheric Environment*, vol.30, n°3, 1996, p. 455-465.

Goldreich, Yair. Urban climate studies in Johannesburg, a sub-tropical city located on a ridge – review. *Atmospheric Environment*, vol.26B, n°3, 1992, p.407-420.

Griffiths, John F. *Climate and the Environment, The atmospheric impact on man*. London: Paul Elek, 1976, 148 p.

Hamdi, R. Schayes, G. Sensitivity study of the urban heat island intensity to urban characteristics. *International journal of climatology*, vol.28, 2008, p. 973-982.

Ichinose, Toshiaki. Shimodozono, Kazuhiro. Hanaki, Kazuhiro. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmospheric Environment*, vol.33, 1999, p. 3897-3909.

Jauregui, E., Romales, E. Urban effects on convective precipitation in Mexico city, *Atmospheric Environment*, vol.30, n°20, 1996, p. 3383-3389.

Kerschgens, Michael J. Kraus, Helmut. On the energetics of the urban canopy layer. *Atmospheric Environment*, vol.24B, n°2, 1990, p.321-328.

Lafore, P. Stein, J. Asencio, N. *et al*. The Meso-NH Atmospheric Simulation System. Part I: adiabatic formulation and control simulations. *Annales Geophysicae*, 1998, vol.16, n°1, p.90-109.

Landsberg, H.E. Atmospheric changes in a growing community (the Columbia, Maryland experience), *Urban Ecology*, vol.4, 1979, p. 53-81.

Landsberg, H.E. The urban climate. *International Geophysics Series*, vol.28, Academic Press, New York, 1981.

Lemonsu, Aude. *Modélisation des processus de surface et de la couche limite en milieu urbain*. Thèse : météorologie urbaine, Toulouse III, 2003, 242 p.

Lemonsu, Aude. Masson, Valery. Noilhan, Jacques. Hydrological Validation of The Teb Scheme On A Suburban Basin. In: EGS XXVII General Assembly, *Nice, 21-26 avril 2002*.

Lemonsu, A. Bastin, S. Masson, V. Drobinski, P. Study of the stratification of the urban boundary layer of Marseille under sea-breeze condition. In: Fifth Conference on Urban Environment, *Vancouver, Canada, 23-27 août 2004*.

Leroyer, Sylvie. *Simulations numériques de l'atmosphère urbaine avec le modèle SUBMESO : application a la campagne CLU-Escompte sur l'agglomération de Marseille*. Thèse : dynamique des fluides et des transferts, École Centrale de Nantes et Université de Nantes, 2006, 262p.

Masson, V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, n°94, 2000, p. 357-397.

Masson, V. Grimmond, CSB. Oke, TR. Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) Scheme with Direct Measurements from Dry Districts in Two Cities. *Journal of Applied Meteorology*, vol.41, n°10, 2002, p. 1011-1026.

Mestayer, PG. Durand, P. Augustin, P. *et al*. The urban boundary-layer field campaign in marseille (ubl/clu-escompte): set-up and first results. *Boundary-Layer Meteorology*, vol.114, n°2, 2005, p. 315-365.

Najjar, G. Kastendeuch, P.P. Ringenbach, N. Colin, J.R. Stoll, M. P. Nerry, F. Bernard, J. De Hatten, A. Luhahe, R. Viville, D. Bilans radiatif et d'énergie dans un canyon urbain. *Annales de l'Association Internationale de Climatologie*, vol.2, 2005.

Noilhan, J. Planton, S. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly Weather Review*, 1989, vol.117, n°3, p.536-549.

Nunez, M. Oke, T.R. The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied climatology*, vol.16, n°1, 1977.

Oke, T.R. *Boundary Layer Climates*. London: Methuen & Co Ltd, 1978, 372 p.

Oke, T.R. Advectively-assisted evapotranspiration from irrigated urban vegetation. *Boundary-Layer Meteorology*, vol.17, n°2, 1979, p. 167-173.

Oke, T.R. Overview of interactions between settlements and their environments, WMO experts meeting on Urban and building climatology. *WPC-34, WMO, Genève*, 1982.

Oke, T.R. *Boundary Layer Climates.* 2e éd. London: Routledge, 1987, 435 p.

Oke, T.R. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, vol.11, n°1-3, 1988, p. 103-113.

Oke, T.R. Sitting and exposure of meteorological instruments at urban sites. In: 27th NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application, *Banff, 25-29 octobre 2004.*

Oke, TR. Zeuner, G. Jauregui, E. The surface energy balance in Mexico City. *Atmospheric Environment*, vol.26B, n°4, 1992, p.433-444.

Oke, T.R. Spronken-Smith, R.A. Jauregui, E. Grimmond, C.S.B. The energy balance of central Mexico City during the dry season. *Atmospheric Environment*, vol. 33, 1999, p. 3919-3930.

Pagney, Pierre. *La climatologie*. 7e éd. Paris : Presse Universitaire de France, 2000, 127 p. (Que sais-je ?)

Pigeon, G. Legain, D. Durand, P. Masson, V. Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France). *International Journal of Climatology*, vol.27, n°14, 2007, p.1969-1981

Piringer, M. Joffre, S. (éds.). The urban surface energy budget and mixing height in European cities: data, models and challenges for urban meteorology and air quality. Final Report of Working Group 2 of Cost-715 Action, 2005, 198 p.

Poli, T., Gattoni, L.P., Arlunno, R., Pansa, G., Zappala, D. The influence of albedo of surfaces on microclimatic modifications. New scenarios for Milano. In: PLEA 2007, The 24th Conference on Passive and Low Energy Architecture, *Singapore*.

Pomerantz, M. Pon, B. Akbari, H. Chang, S.-C. *The Effect of Pavements' Temperatures On Air Temperatures in Large Cities* [en ligne]. Avril 2000, [réf. du 10 octobre 2008], 22 p. Disponible sur: http://eetd.lbl.gov/HeatIsland/PUBS/2000/43442rep.pdf

Puygrenier, V. Lohou, F. Campistron, B. Sarda, F. Pigeon, G. Benech, B. Serça, D. investigation on the fine structure of sea-breeze during ESCOMPTE experiment. *Atmospheric Research*, vol.74, 2005, p.329-353.

Ringenbach, Nicolas. *Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur Strasbourg*. Thèse : climatologie et temps, Strasbourg I, 2004, 167 p.

Rizwan, Ahmed Memon. Denis, Y.C. Leung. Liu, Chumbo. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, vol.20, 2008, p. 120-128.

Roberts, Sarah M. Oke, TR. Voogt, JA. Grimmond, CSB. Lemonsu, A. Energy storage in a european city center. In: Fifth International Conference on urban climate, *Lodz, Pologne, 1-5 septembre 2003*.

Roberts, Sarah M. Oke, TR. Lemonsu, A. Grimmond, CSB. Jackson, P. Sensitivity of surface-atmosphere energy exchanges within urban areas derived from simulations. In : 84th AMS Annual Meeting : Symposium on planning, nowcasting, and forecasting in the urban zone, *Seattle, Etat-Unis, 12-15 janvier 2004*.

Rosenfeld, A.H., Akbari, H., Bretz, S., *et al*. Mitigation of urban heat island: materials, utility programs, updates, *Energy and Buildings*, n°22, 1995, p. 255-265.

Rosenfeld, A., Akbari, H., Romm, J., Pomerantz, M. Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction, *Energy and buildings*, vol.28, 1998, p. 51-62.

Rosenzweig, Cynthia. Solecki, William D. Parshall, Lily. *Et al*. Characterizing the urban heat island in current and future climates in New-Jersey. *Environmental Hazards*, 2005, n°6, p. 51-62.

Rosenzweig, C., Solecki, W., Parshall, L., *et al*. Mitigating New York City's heat island with urban forestry, living roofs, and light surfaces. In: 86th American Meteorological Society Annual Meeting, *Atlanta, Georgia*, 2006.

Sacré, Christian. *Le confort dans les espaces extérieurs : analyse microclimatique.* Rapport, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Nantes, 1983.

Sailor, D.J. Fan, H. Modeling the diurnal variability of effective albedo for cities. *Atmospheric Environment*, vol.36, n°4, 2002, p. 713-725.

Santamouris, M., Adnot, J., Alvarez, S. *et al*. *Cooling the cities – rafraichir les villes*, Paris, École des Mines de Paris-Les Presses, 2004.

Sarrat, C. Lemonsu, A. Masson, V. Guedalia, D. Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. *Atmospheric Environment*, vol.40, 2006, p. 1743-1758.

Shaw, R., Colley, M., Connell, R., *Climate change adaptation by design: a guide for sustainable communities*, London, Town and Country Planning Association (TCPA), 2004.

Shepherd, J.M., Pierce, H., Negri, A.J. Rainfall Modification by Major Urban Areas: Observations from Spaceborne Rain Radar on the TRMM Satellite, *Journal of Applied Meteorology*, vol.41, n°7, 2002, p. 689-701.

Steemers, Koen. Human comfort and urban form. In: 6th International Conference on Urban Climate, *Göteborg, Suède,* 12-16 juin 2006.

Sthüpnagel, A. *Klimatische Veränderungen in Ballungsgebieten unter besonderer Berücksichtigung der Ausgleichswirkung von Grünflächen, dargestellt am Beispiel von Berlin (West).* Diss. am Fachbereich 14 der Technischen Universität Berlin, Berlin, 1987.

Sukopp, Herbert. Human-caused impact on preserved vegetation. *Landscape and urban planning*, vol.68, 2004, p. 347-355.

Taha, H. Modeling the impacts of increased urban vegetation on the ozone air quality in the South Coast Air Basin. *Atmospheric Environment*, vol.30, n°20, 1996, p. 3423–3430.

Taha, Haider. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings.* vol.25, n°2, 1997(a), p. 99-103.

Taha, Haider. Modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the south coast air basin. *Atmospheric Environment*, vol.31, n°11, 1997(b), p. 1667-1676

Taha, H. Akbari, H. Sailor, D. Ritschard, R. *Causes and effects of heat islands: sensitivity to surface parameters and anthropogenic heating*, Lawrence Berkeley Laboratory Report, 1992.

Yamashita, Shuji. Sekine, Kiyoshi. Shoda, Masahiro. Yamashita, Kohji. Hara, Yoshio. On relationships between heat island and sky view factor in the cities of Tama river basin, Japan. *Atmospheric Environment*, vol.20, n°4, 1986, p. 681-686.