



HAL
open science

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

Morgane Colombert

► **To cite this version:**

Morgane Colombert. Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. Autre. Université Paris-Est, 2008. Français. NNT : 2008PEST0233 . tel-00470536

HAL Id: tel-00470536

<https://theses.hal.science/tel-00470536>

Submitted on 6 Apr 2010

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

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



Université Paris-Est

École Doctorale Ville et Environnement

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Paris-Est

Spécialité : Génie urbain

présentée et soutenue publiquement par

Morgane Colombert

le 8 décembre 2008

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

Contribution to the analysis of various means to take into account urban climate
in urban planning

Directeur de thèse

Youssef Diab

Jury

ACHARD Gilbert

ADOLPHE Luc

DIAB Youssef

MASSON Valéry

MORAND Denis

SALAGNAC Jean-Luc

TASSIN Bruno

Rapporteur

Rapporteur

Directeur de thèse

Examineur

Examineur

Examineur

Président du jury

Avant propos

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre d'une thèse financée par une Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE).

Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), l'Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP) et le laboratoire de recherche Génie Urbain, Environnement et Habitat (LGUEH) de l'Université Paris Est ont constitué avec l'Agence Nationale de la Recherche Technique (ANRT) les partenaires de ce projet de recherche.

La thèse a été réalisée en majorité au sein du laboratoire Services, Process, Innovation (LSPI) du département Economie et Sciences Humaines du CSTB.

Remerciements

Je souhaite exprimer ici toute ma reconnaissance et mon estime à Youssef Diab pour avoir accepté de diriger ce travail de thèse.

Que Jean-Luc Salagnac, qui a co-encadré mon travail de thèse au CSTB, soit également remercié pour sa disponibilité et ses relectures attentives durant ces trois années.

Que Denis Morand, qui a co-encadré pour l'université mon travail de thèse, soit également convaincu de toute ma gratitude, et qu'il soit remercié pour ses nombreux conseils tout au long de ma réflexion et de la rédaction.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury qui ont accepté de participer à mon jury de thèse : Gilbert Achard, Luc Adolphe, Valéry Masson et Bruno Tassin.

Je tiens également à remercier Patrick Lemoigne, Aude Lemonsu, et Grégoire Pigeon du CNRM qui m'ont accueilli avec Valéry Masson à Toulouse pour m'initier à TEB et m'ont apporté durant ces trois ans une aide précieuse pour mettre en œuvre mes modélisations numériques.

Je remercie également les personnes ayant participé à mon comité de thèse et contribué ainsi à m'ouvrir aux problématiques qui se posent dans leur métier : André-Marie Bourlon, Marc Gillet, Jacques Rilling et Christian Thibault.

Durant cette thèse, j'ai eu l'occasion d'interagir avec de nombreuses personnes que je tiens également à remercier : Vincent Becue, Benoit Bernard, Serge Bethelot, Nathalie Bintner, Thomas Bonierbale, Daniel Cadé, Julien Desplat, Yann Françoise, Marc Gayda, Pierre Kermen, Raphaëlle Kounkou-Arnaud, Frédéric Jacques, Sophie Labbouz, Sophie Morel, Didier Olivry, Bertrand Riffiod, Claire Saint-Pierre, Serge Salat, Taoufik Souami, Nicolas Texier, Nathalie Touze-Foltz, Damien Serre, François Wouts, et tous les autres que je ne cite pas mais n'oublie pas.

Merci à l'ensemble de mes (ex)collègues du CSTB et du 4 avenue Recteur Poincaré, et tout particulièrement Frédéric, Anne-Lyse et Nathalie, pour leur soutien de chaque instant et les bons moments passés ensemble : Barbara Allen, Marguerite Bonnin, Michel Bonetti, Joël Boutigny, Jean Bouvier, Jean Carassus, Orlando Catarina, José Carvalho, Marc Colombard-

Prout, Sophie Cruz, Claude Da Costa, Anne-Lyse Desnottes, Laurence Dubois, Hervé Duret, Patrick Elias, José Fontan, Sophie Grillat, Haitham Joumni, Françoise Jovelet, Joëlle Laffitte, Lydie Laigle, Mireille Lauffenburger, Marie Llorente, Emmanuelle Loyson, Dorothée Marchand, Marinette Orlach, Pascale Pagliarini, Dominique Pompini, Nadine Roudil, Maëva Sabre, Christian Sacré, José Sebbane, Samer Sliteen, Nicolas Taillefer, Nicole Tolle, Mélanie Tual, Xavier Desjardin, Céline Varenio, Nathalie Weiss, et tous les autres.

Merci également à mes amis pour les moments de décompression. C'est essentiel !

Mes plus grands remerciements vont à ma famille, Colette, Delphine et Thierry, qui m'ont encouragé à me lancer dans cette aventure et ont su m'apporter un soutien sans faille. Je n'oublie pas non plus Jean-François, Marianne et Nicolas, ainsi que mes grands-parents Aline, Elise, Jean et Yves.

Enfin, un immense remerciement à celui sans qui ces trois années auraient paru bien longues, sans qui le courage m'aurait sans doute parfois manqué, avec qui j'ai pu partager les doutes et les joies du travail de thèse : Antoine.

Résumé

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-clés

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

Abstract

Urbanization, with artificial surfaces replacing natural land, more anthropogenic heat and urban geometry, modifies the micro and meso scale climate. Such modifications do alter the radiative, thermal, moisture and aerodynamics properties of the urban environment.

The study of energy balance could help understanding most of these changes. In this thesis, we used the urban surface exchange parameterization of Météo-France: Town Energy Balance, which computes water and energy exchanges between urban surfaces and atmosphere. In order to study the significance of different factors, we made a sensitivity study. Factors are filed in five fields: building, public space, land use, industrial activities and transports.

Our simulations showed that radiative parameters are the most influential during the summer. During winter, other thermal parameters (insulation) are the most influential.

French local authorities could use several tools and means to act in favor of their climatic environment: their fields of direct jurisdiction (roads, parks, buildings which are owned by the community, etc.), guidance documents (SCOT and PLU), development procedures (urban development zone and building plotting), and incitement and pieces of information for their citizens and their agencies (local Agenda 21, Plan Climat, Approche Environnementale de l'Urbanisme). They can not work completely freely because of the boundary between urban planning law and building and dwelling law.

Keywords

Urban climatology, urban heat island, energy balance, numerical modelling, regulatory urban planning, operational urban planning, Agenda 21.

Table des matières

| | |
|--|------------|
| <i>Introduction</i> | 31 |
| Première partie : Contexte et analyse bibliographique | 37 |
| I Introduction | 38 |
| II Climatologie urbaine : une science en évolution | 40 |
| II.1 Naissance et évolution de la climatologie urbaine | 40 |
| II.2 Climatologie urbaine : une science pluridisciplinaire ? | 44 |
| II.3 Prise en compte du climat urbain dans l'aménagement et l'architecture : quelques exemples | 45 |
| II.4 Rafraîchissement des villes : quelques exemples | 49 |
| II.5 La ville « idéale » | 53 |
| II.6 Conclusion | 58 |
| III Préambule à l'explication des phénomènes physiques à l'origine de la formation du climat urbain | 60 |
| IV Phénomènes engendrés à l'échelle de la rue | 64 |
| IV.1 Impacts sur les écoulements de l'air | 64 |
| IV.2 Modification de l'évapotranspiration | 65 |
| IV.3 Apports anthropiques de chaleur | 66 |
| IV.4 Impacts radiatifs et thermiques | 68 |
| V Phénomènes engendrés à l'échelle de la ville | 75 |
| V.1 Modification du bilan radiatif de la ville | 77 |
| V.1.1 Rayonnement solaire incident (K_{\downarrow}) | 77 |
| V.1.2 Rayonnement solaire réfléchi (αK_{\downarrow}) | 79 |
| V.1.3 Rayonnement thermique atmosphérique descendant de grande longueur d'onde (L_{\downarrow}) | 80 |
| V.1.4 Rayonnement thermique ascendant (L_{\uparrow}) | 81 |
| V.1.5 Rayonnement net (Q^*) | 83 |
| V.2 Modification du bilan d'énergie thermique de la ville | 84 |
| V.2.1 Flux de chaleur d'origine anthropique (Q_F) | 85 |
| V.2.2 Variation de la quantité de chaleur stockée (ΔQ_S) | 86 |
| V.2.3 Flux de chaleur sensible (Q_H) | 86 |
| V.2.4 Flux de chaleur latente (Q_E) | 86 |
| V.2.5 Flux de chaleur advectif (ΔQ_A) | 87 |
| V.2.6 Synthèse | 87 |
| V.3 Modification du bilan hydrique de la ville | 89 |
| V.4 Mouvements des masses d'air et rugosité du milieu urbain | 91 |
| V.5 Précipitations et les averses orageuses | 94 |
| V.6 Variations journalières et saisonnières de l'intensité des modifications climatiques | 99 |
| VI Rôle de différents facteurs dans la formation du climat urbain | 104 |

| | | |
|---|---|------------|
| VI.1 | Couche superficielle du sol | 106 |
| VI.1.1 | Surfaces végétales | 106 |
| VI.1.2 | Surfaces d'eau | 109 |
| VI.2 | Activités humaines | 109 |
| VI.2.1 | Activités polluantes | 109 |
| VI.2.2 | Sources de chaleur | 110 |
| VI.3 | Structure urbaine | 112 |
| VI.3.1 | Morphologie du cadre bâti | 112 |
| VI.3.2 | Matériaux de surface | 114 |
| VII | Synthèse | 124 |
| Deuxième partie : Méthodes et modèles de simulation numérique | | 127 |
| I | Déroulement de la recherche et méthodes utilisées | 128 |
| II | Modèles de simulation numérique du climat urbain | 130 |
| II.1 | Modèles climatiques à échelle locale | 130 |
| II.1.1 | ENVI-met (Environmental Meteorology) | 130 |
| II.1.2 | SOLENE | 133 |
| II.2 | Modèles climatiques de l'échelle locale à la méso-échelle | 136 |
| II.2.1 | Modèles empiriques | 136 |
| II.2.2 | Modèles d'espaces végétalisés adaptés pour inclure des surfaces urbanisées | 139 |
| II.2.3 | Modèles de la canopée urbaine | 143 |
| Troisième partie : Quantification des effets de différents facteurs sur le climat urbain | | 151 |
| I | Introduction | 152 |
| II | Proposition de domaines d'actions et de leviers pour agir sur le climat urbain | 153 |
| II.1 | Bâtiment | 153 |
| II.2 | Espace public | 154 |
| II.3 | Organisation spatiale | 155 |
| II.4 | Synthèse des leviers d'actions et des critères d'évaluation en relation avec la climatologie urbaine | 158 |
| III | Choix d'un modèle de simulation numérique et analyse de sa portée et de ses limites | 162 |
| III.1 | Choix d'un modèle de simulation numérique selon sa portée | 162 |
| III.2 | Hypothèses et limites du modèle choisi | 164 |
| IV | Choix d'une ville-témoin : Paris ou 'urbain dense' | 168 |
| IV.1 | Paris, une ville très minérale | 168 |
| IV.2 | Morphologie et géométrie de Paris | 171 |
| IV.2.1 | Hauteur moyenne des bâtiments et longueur de rugosité dynamique du couvert urbain | 173 |
| IV.2.2 | Fraction occupée par les bâtiments | 174 |
| IV.2.3 | Facteur de forme | 175 |
| IV.3 | Flux de chaleur liés aux différentes activités de Paris | 176 |
| IV.4 | Matériaux de constructions parisiens | 179 |
| IV.4.1 | Hypothèses de calcul | 179 |
| IV.4.2 | Caractéristiques thermiques et radiatives des murs | 180 |
| IV.4.3 | Caractéristiques thermiques et radiatives de la voirie | 183 |
| IV.4.4 | Caractéristiques thermiques et radiatives des toits | 185 |

| | | |
|--|--|------------|
| IV.5 | Description de Paris et comparaison avec les valeurs de l'urbain dense | 189 |
| IV.6 | Comparaison des résultats des simulations pour les modèles Paris et urbain dense et choix d'une 'ville-témoin' | 192 |
| V | <i>Présentation des différentes simulations</i> | 197 |
| V.1 | Etude de sensibilité du bilan d'énergie : variation simple des paramètres de SURFEX | 197 |
| V.1.1 | Couverture du sol | 197 |
| V.1.2 | Structure urbaine et tissu constructif | 198 |
| V.1.3 | Paramètres radiatifs et thermiques des matériaux urbains | 200 |
| V.1.4 | Activités humaines : les flux de chaleur anthropique | 203 |
| V.2 | Etude de sensibilité du bilan d'énergie à la variation de multiples paramètres en relation avec les domaines d'action identifiés | 204 |
| V.2.1 | Bâtiment | 204 |
| V.2.2 | Espaces publics | 207 |
| V.2.3 | Organisation urbaine | 207 |
| VI | <i>Résultats des simulations</i> | 209 |
| VI.1 | Cadre des simulations | 209 |
| VI.1.1 | Situations climatiques choisies | 209 |
| VI.1.2 | Conditions initiales | 210 |
| VI.1.3 | Forme des résultats | 211 |
| VI.2 | Variation simple des paramètres de SURFEX | 215 |
| VI.2.1 | Couverture du sol | 215 |
| VI.2.2 | Structure urbaine et tissu constructif | 218 |
| VI.2.3 | Paramètres radiatifs et thermiques des matériaux urbains | 222 |
| VI.2.4 | Activités humaines : les flux d'origine anthropique | 231 |
| VI.3 | Variation de multiples paramètres de SURFEX | 232 |
| VI.3.1 | Bâtiment | 232 |
| VI.3.2 | Organisation urbaine | 234 |
| VI.4 | Conclusion | 234 |
| VII | <i>Synthèse</i> | 238 |
| <i>Quatrième partie : Réflexion sur les moyens à disposition des collectivités territoriales françaises pour intégrer dans la conception urbaine des critères permettant d'influer sur l'environnement climatique</i> | | 241 |
| I | <i>Introduction</i> | 242 |
| II | <i>Possibilités offertes par l'urbanisme réglementaire et opérationnel pour intégrer des critères permettant d'améliorer l'environnement climatique</i> | 246 |
| II.1 | Généralités | 248 |
| II.2 | Schéma de Cohérence Territoriale | 253 |
| II.3 | Plan Local d'Urbanisme | 255 |
| II.4 | Perspectives et limites du SCOT et du PLU | 264 |
| II.5 | Urbanisme opérationnel : cas de la Zone d'Aménagement Concerté et du lotissement | 267 |
| II.6 | Conclusion | 269 |
| III | <i>Démarches incitatives et informatives à disposition des collectivités pour intégrer des critères permettant d'améliorer l'environnement climatique</i> | 272 |

| | | |
|--------------|--|------------|
| III.1 | Une ville exemplaire dans son domaine de compétence | 272 |
| III.1.1 | Infrastructures et parc immobilier | 273 |
| III.1.2 | Les démarches d'accompagnement pour un urbanisme plus conscient de l'environnement : cas de l'approche environnementale de l'urbanisme (AEU) | 275 |
| III.2 | Démarches et documents incitatifs et informatifs | 280 |
| III.2.1 | Agenda 21 local | 281 |
| III.2.2 | Plan Climat territorial | 282 |
| III.2.3 | Regards sur les travaux de la Grande-Bretagne | 288 |
| III.3 | Conclusion | 290 |
| IV | <i>Synthèse</i> | 292 |
| | <i>Conclusion</i> | 297 |
| | <i>Lexique</i> | 305 |
| | <i>Bibliographie</i> | 315 |
| | <i>Annexes</i> | 343 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau 1 : Stratégies de diminutions de l'îlot de chaleur (Rosenzweig <i>et al.</i> , 2006)..... | 52 |
| Tableau 2 : Pourcentages pour chaque type de surface et potentiel pour intégrer des moyens de diminuer l'îlot de chaleur urbain (Rosenzweig <i>et al.</i> , 2006)..... | 52 |
| Tableau 3 : Réduction de la température près du sol (en °F) pour différents scénarii de réduction de l'îlot de chaleur urbain, en moyenne durant la journée et à 3h00 (Rosenzweig <i>et al.</i> , 2006). | 53 |
| Tableau 4 : Résumé des outils (diagonale en gris) utilisés aux échelles du bâtiment, du groupe de bâtiment, de l'implantation urbaine, pour répondre aux objectifs climatiques à ces échelles (Mills, 2003)..... | 57 |
| Tableau 5 : Chaleur anthropique (QF) et rayonnement net toutes longueurs d'onde comprises (Q*) dans plusieurs villes dans plusieurs villes du Monde (D'après Oke (1978)). | 67 |
| Tableau 6 : Albédos de différentes zones urbaines (Taha, 1997a)..... | 80 |
| Tableau 7 : Nombre d'arbres plantés dans chaque zone métropolitaine et leurs effets simulés sur la réduction des températures ambiantes d'après Taha (1996) (Akbari, 2001)..... | 107 |
| Tableau 8 : Types de densité et indicateurs (Allain, 2004)..... | 156 |
| Tableau 9 : Part du sol occupé par la voirie (%) (Allain (2004), d'après Métropolis, OCDE, Banque Mondiale). | 156 |
| Tableau 10 : Domaines, leviers d'actions et critères descriptifs des leviers..... | 158 |
| Tableau 11 : Critères disponibles ou non pour différents modèles et schémas climatiques (ENVI-met, SOLENE, NARP-LUMPS, SM2-U, TEB, FVM). | 163 |
| Tableau 12 : Nombre et part de bâtiments parisiens selon la période de construction (APUR, 2007)..... | 180 |
| Tableau 13 : Résistance thermique des parois (APUR, 2007). | 181 |
| Tableau 14 : Classification des matériaux en trois catégories en fonction de leur albédo (Scudo <i>et al.</i> , 2004). | 182 |
| Tableau 15 : Valeurs de l'albédo des matériaux âgés ou non pour l'ensemble des longueurs d'onde..... | 185 |
| Tableau 16 : Conductivité et capacité thermiques de différents matériaux de toiture. | 188 |
| Tableau 17 : Valeurs des critères de description de TEB et ISBA pour l'urbain dense de Météo-France et notre proposition pour Paris..... | 190 |
| Tableau 18 : Initialisation des températures pour les modélisations (Ta ₁ est la température de l'air du premier pas de temps du forçage utilisé)..... | 211 |
| Tableau 19 : Influence sur le bilan d'énergie de différents facteurs selon la saison (hiver et été). | 236 |
| Tableau 20 : 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 influencer sur le climat urbain. | 271 |
| Tableau 21 : L'AEU, des modalités d'assistance diverses, adaptables à la nature et au rythme des projets (ADEME, 2003)..... | 279 |
| | |
| Tableau A 1 : Tableau synthétique des modes d'intervention sur la forme urbaine visant la régulation du microclimat urbain (Benzerzour, 2004). | 353 |

| | |
|---|-----|
| Tableau A 2 : Evolution de différents paramètres climatiques, et plus particulièrement des températures, durant le XX ^e siècle. | 371 |
| Tableau A 3 : Diminution en pourcentage du rayonnement solaire global et UV d'un site urbain par rapport à un site rural proche à Saint-Louis (Missouri, Etats-Unis) (Peterson et Flowers, 1977). | 404 |
| Tableau A 4 : Durée d'insolation par an (moyenne 1971-1980) (Cantat, 1986). | 405 |
| Tableau A 5 : Moyennes des durées des précipitations durant la période 1961-1980 (Escourrou, 1990). | 406 |
| Tableau A 6 : Diminution du nombre de degrés.jours chauffage et augmentation du nombre de degrés.jours climatisation du fait de l'urbanisation et des effets d'îlot de chaleur (Taha, 1997). | 412 |
| Tableau A 7 : Profils climatiques des principaux climats, problèmes associés, et réponses architecturales ou urbaines offertes conseillées (Golany, 1996). | 419 |
| Tableau A 8 : Classification en zone climatique de différentes formes urbaines triées de façon décroissante selon leur capacité à influencer le vent local, la température et l'humidité (Oke, 2004(a), 2004(b)) | 424 |
| Tableau A 9 : Formes distinctes des zones urbaines (Ellefsen, 1990/91) | 425 |
| Tableau A 10 : Identification et classification des différents types de zones urbaines trouvées à Saint-Louis –Etats-Unis) (Auer, 1978). | 426 |
| Tableau A 11 : Paramètres descriptifs du cadre bâti dans TEB. | 430 |
| Tableau A 12 : Les déplacements motorisés dans Paris, par mode, en 2000 (Prud'Homme <i>et al.</i> , 2005). | 457 |
| Tableau A 13 : Les déplacements sur le réseau viaire dans Paris, en 2000 (D'après les données de Prud'Homme <i>et al.</i> (2005)). | 458 |
| Tableau A 14 : Part de différents types de véhicules dans le parc roulant urbain (d'après Hugrel et Joumard (2004)). | 459 |
| Tableau A 15 : Répartition et kilométrages parcourus pour les différentes catégories de véhicules durant une journée sur le territoire de la Ville de Paris. | 459 |
| Tableau A 16 : Consommation de carburant en circulation urbaine et énergie rejetée par véhicule par kilomètre parcouru. | 461 |
| Tableau A 17 : Energie rejetée par véhicule par km parcouru et flux de chaleur rejetée. | 462 |
| Tableau A 18 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la fraction de végétation. | 463 |
| Tableau A 19 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la fraction d'eau. | 463 |
| Tableau A 20 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la largeur des rues. | 464 |
| Tableau A 21 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la hauteur des bâtiments. | 464 |
| Tableau A 22 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la profondeur des bâtiments. | 464 |
| Tableau A 23 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'isolation des toits. | 465 |
| Tableau A 24 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des toits. | 465 |
| Tableau A 25 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'albédo des toits. | 466 |
| Tableau A 26 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité des toits. | 466 |

| | |
|---|-----|
| Tableau A 27 : Expérience avec des toits tous en tuile (données de G. Pigeon, CNRM) ou en toiture terrasse (découpage de l'APUR et valeurs issues de la norme NF EN ISO 10456)... | 466 |
| Tableau A 28 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'isolation des murs..... | 467 |
| Tableau A 29 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des murs..... | 467 |
| Tableau A 30 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'albédo des murs..... | 467 |
| Tableau A 31 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité des murs..... | 468 |
| Tableau A 32 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des rues..... | 468 |
| Tableau A 33 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'albédo des rues..... | 468 |
| Tableau A 34 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité des rues..... | 468 |
| Tableau A 35 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie au flux de chaleur sensible dû au trafic..... | 469 |
| Tableau A 36 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie au flux de chaleur latente dû au trafic..... | 469 |
| Tableau A 37 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie au flux de chaleur sensible d'origine industrielle..... | 469 |
| Tableau A 38 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie au flux de chaleur latente d'origine industrielle..... | 469 |
| Tableau A 39 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à différentes améliorations thermiques..... | 470 |
| Tableau A 40 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à différentes orientations d'aménagement..... | 471 |
| Tableau A 41 : Résultat de la simulation du bilan d'énergie pour Paris (janvier 2006)..... | 473 |
| Tableau A 42 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la fraction de végétation (janvier 2006)..... | 474 |
| Tableau A 43 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la fraction d'eau (janvier 2006)..... | 475 |
| Tableau A 44 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la largeur des rues (janvier 2006)..... | 476 |
| Tableau A 45 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la hauteur des bâtiments (janvier 2006)..... | 477 |
| Tableau A 46 Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la profondeur des bâtiments (janvier 2006)..... | 478 |
| Tableau A 47 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'isolation des toits (janvier 2006)..... | 479 |
| Tableau A 48 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des toits (janvier 2006)..... | 480 |
| Tableau A 49 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'albédo des toits (janvier 2006)..... | 481 |
| Tableau A 50 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité des toits (janvier 2006)..... | 482 |
| Tableau A 51 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à un changement de types de toits (janvier 2006)..... | 483 |

| | |
|---|-----|
| Tableau A 52 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'isolation des murs (janvier 2006)..... | 484 |
| Tableau A 53 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des murs (janvier 2006). | 485 |
| Tableau A 54 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'albédo des murs (janvier 2006)..... | 486 |
| Tableau A 55 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité des murs (janvier 2006). | 487 |
| Tableau A 56 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des routes (janvier 2006). | 488 |
| Tableau A 57 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'albédo des routes (janvier 2006)..... | 489 |
| Tableau A 58 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité des rues (janvier 2006)..... | 490 |
| Tableau A 59 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie au flux de chaleur sensible lié au trafic (janvier 2006)..... | 491 |
| Tableau A 60 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie au flux de chaleur latente lié au trafic (janvier 2006). | 492 |
| Tableau A 61 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie aux flux de chaleur sensible et latente d'origine industrielle (janvier 2006). | 493 |
| Tableau A 62 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la structure du bâtiment (janvier 2006). | 494 |
| Tableau A 63 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'organisation urbaine (janvier 2006). | 495 |
| Tableau A 64 : Résultat de la simulation du bilan d'énergie pour Paris (juin 2006). | 496 |
| Tableau A 65 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la fraction de végétation (juin 2006). | 497 |
| Tableau A 66 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la fraction d'eau (juin 2006)..... | 498 |
| Tableau A 67 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la largeur des rues (juin 2006)..... | 499 |
| Tableau A 68 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la hauteur des bâtiments (juin 2006). | 500 |
| Tableau A 69 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la profondeur des bâtiments (juin 2006)..... | 501 |
| Tableau A 70 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'isolation des toits (juin 2006)..... | 502 |
| Tableau A 71 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des toits (juin 2006). | 503 |
| Tableau A 72 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'albédo des toits (juin 2006)..... | 504 |
| Tableau A 73 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité des toits (juin 2006). | 505 |
| Tableau A 74 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à un changement de types de toits (juin 2006)..... | 506 |
| Tableau A 75 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'isolation des murs (juin 2006)..... | 507 |
| Tableau A 76 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des murs (juin 2006). | 508 |

| | |
|--|-----|
| Tableau A 77 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'albédo des murs (juin 2006)..... | 509 |
| Tableau A 78 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité des murs (juin 2006). | 510 |
| Tableau A 79 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des routes (juin 2006). | 511 |
| Tableau A 80 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'albédo des routes (juin 2006). | 512 |
| Tableau A 81 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité des rues (juin 2006). | 513 |
| Tableau A 82 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie au flux de chaleur sensible lié au trafic (juin 2006). | 514 |
| Tableau A 83 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie au flux de chaleur latente lié au trafic (juin 2006). | 515 |
| Tableau A 84 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie au flux de chaleur sensible et latente d'origine industrielle (juin 2006). | 516 |
| Tableau A 85 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la structure du bâtiment (juin 2006). | 517 |
| Tableau A 86 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'organisation urbaine (juin 2006). | 518 |
| Tableau A 87 : Critères de la grille RST ₀₂ (CERTU, 2006). | 533 |
| Tableau A 88 : Questions et recommandations associées au critère 'impact sur l'environnement' dans la RST ₀₂ (CERTU, 2006). | 534 |
| Tableau A 89 : Exemple du tableau des performances pour les neuf premiers critères de la grille RST ₀₂ . Cas d'une grange requalifiée en logements locatifs et en café de pays (CERTU, 2006)..... | 534 |
| Tableau A 90 : Exemple d'une courbe de température avec la grille RST ₀₂ . Cas d'une grange requalifiée en logements locatifs et en café de pays (CERTU, 2006)..... | 535 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Evolution de l'intensité maximale de l'îlot de chaleur urbain en fonction de la population (Escourrou (1991) d'après les données de Oke (1973))..... | 42 |
| Figure 2 : 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))..... | 61 |
| Figure 3 : Cartographie européenne des rejets de chaleur d'origine anthropique (Chirkov, 2003)..... | 66 |
| Figure 4 : Le piège radiatif des rues (Griffiths, 1976). | 68 |
| Figure 5 : Rayonnement solaire et rayonnement infrarouge en milieu urbain..... | 69 |
| Figure 6 : Représentation du facteur de vue du ciel dans une rue canyon décrite par sa largeur (W) et les hauteurs des bâtiments l'encadrant (H1 et H2) (Oke, 1988). | 70 |
| Figure 7 : Facteurs de vue du ciel de différents sites à Hong Kong (Chine) (Giridharan <i>et al.</i> , 2007)..... | 70 |
| Figure 8 : L'albédo de l'environnement urbain (http://www.espere.net). | 71 |
| Figure 9 : Vue en plan du canyon (Nakamura et Oke, 1988)..... | 73 |
| Figure 10 : Elévation de la section du canyon avec les dimensions de ce dernier et la localisation des instruments de mesures (Nakamura et Oke, 1988)..... | 73 |
| Figure 11 : La brise de terre et la brise de mer (Météo-France)..... | 76 |
| Figure 12 : Bilan radiatif au-dessus d'une ville. | 77 |
| Figure 13 : Température moyenne de surface à partir d'images infrarouge lors de la canicule de 2003 (du 4 au 13 août) pour deux intervalles de temps (en journée de 12h à 15h et de nuit de 20h à 23h) (Dousset <i>et al.</i> , 2007)..... | 82 |
| Figure 14 : Classification de la nature de la surface de Paris à partir d'une image satellite (SPOT-4 HRV) le 13 juillet 2003. (Dousset <i>et al.</i> , 2007)..... | 82 |
| Figure 15 : Rayonnement thermique ($W.m^{-2}$) produit par le LIS (Land Information System) pour le 11 juin 2001 au niveau du nord-est des Etats-Unis (NASA/Goddard Space Flight Center)..... | 83 |
| Figure 16 : Schéma descriptif du bilan énergétique pour une zone urbaine (Duchêne-Marullaz, 1980)..... | 85 |
| Figure 17 : Les flux de chaleur en milieux urbain et rural (D'après Cantat (1993)). | 87 |
| Figure 18 : Cycle journalier moyen des flux mesurés du bilan énergétique de surface de Marseille pour les jours 183 à 192 de l'année 2001 (début juillet) (Roberts <i>et al.</i> , 2003)..... | 88 |
| Figure 19 : Schématisation des différents flux d'énergie et de rayonnement au-dessus d'une zone urbaine et rural pour une journée avec un ciel dégagé (Gill (2004), d'après Bridgman <i>et al.</i> (1995)). La largeur des flèches permet d'approcher l'importance des flux..... | 89 |
| Figure 20 : Schéma descriptif du bilan hydrique pour une zone urbaine, d'après Oke (Duchêne-Marullaz, 1980) | 90 |
| Figure 21 : Représentation schématique des basses couches troposphériques et profil de la vitesse du vent selon les différentes couches troposphériques (Leroyer, 2006). | 93 |
| Figure 22 : Profil de la vitesse du vent pour différentes surfaces (Chatelet <i>et al.</i> , 1998). | 93 |
| Figure 23 : Relations entre mouvements horizontaux et verticaux avec convergence des masses d'air (Vigneau, 2005)..... | 94 |
| Figure 24 : La classification des nuages (Vigneau, 2005). | 95 |
| Figure 25 : Du nuage à la pluie : les mécanismes (Vigneau, 2005). | 96 |

| | |
|--|-----|
| Figure 26 : Le « dôme » urbain : structure verticale de l'atmosphère pour des vents inférieurs à 3 m/s (Ringebach (2004), d'après Mestayer et Anquetin (1995)). | 99 |
| Figure 27 : Turbulence thermique au contact d'une surface surchauffée. | 100 |
| Figure 28 : Le « panache » urbain : structure verticale de l'atmosphère urbaine pour des vents supérieurs à 3m/s (Ringebach (2004), d'après Mestayer et Anquetin (1995)). | 101 |
| Figure 29 : Distribution décadaire de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain nocturne entre 1990 et 1999 (différences des températures minimales entre Paris-Saint-Jacques et Melun moyennées pour chaque décade) (Cantat, 2004). | 102 |
| Figure 30 : Formation de l'îlot de chaleur urbain (D'après Rizwan <i>et al.</i> (2008)). | 104 |
| Figure 31 : Relation empirique entre la géométrie du canyon urbain (H/W dans le centre urbain) et l'intensité maximale de l'îlot de chaleur ($\Delta T_{u-r(max)}$) (Oke, 1988). | 112 |
| Figure 32 : Influence de la géométrie urbaine, décrite par le ratio W_1/W_2 , et de l'angle du soleil θ sur l'albédo global. Fondée sur des simulations avec $H/W_2 = 1,0$ (Oke (1988), d'après Aida et Gotoh (1982)). | 113 |
| Figure 33 : Relation entre le facteur de vue du ciel et la température de surface (Eliasson, 1990/91). | 114 |
| Figure 34 : Températures de surface de chaussées en béton bitumineux en fonction de l'heure pour deux albédos différents, Concord (Californie, Etats-Unis), le 17 septembre 1998 (Pomerantz <i>et al.</i> , 2000). | 116 |
| Figure 35 : Température de surface d'une chaussée, insolation et température de l'air en fonction de l'heure à San José (Californie, Etats-Unis) le 17 septembre 1997 (Pomerantz <i>et al.</i> , 2000). | 116 |
| Figure 36 : Eléments composants l'expérience de Asaeda <i>et al.</i> (1996). | 118 |
| Figure 37 : Distribution des températures au sein des différents types de sol (observations de 1990) (Asaeda <i>et al.</i> , 1996). | 119 |
| Figure 38 : Bilan d'énergie à la surface du sol. (a) asphalte, (b) béton, (c) sol nu sec (Asaeda <i>et al.</i> , 1996). | 119 |
| Figure 39 : Flux de chaleur de conduction à 20cm de profondeur pour une surface en asphalte et une autre en béton (Asaeda <i>et al.</i> , 1996). | 120 |
| Figure 40 : Différence entre la température de surface et celle de l'air en fonction de l'albédo des peintures ou des matériaux de toits exposés au soleil (Rosenfeld <i>et al.</i> , 1995). | 121 |
| Figure 41 : Un exemple de l'éditeur utilisé pour créer les fichiers nécessaire à la simulation pour ENVI-met (Bruse, 2004). | 131 |
| Figure 42 : Trois scenarii et leurs profils des températures (limite basse : 303.45 K; limite haute : 301.8 K) pour $z = 2m$ à 06:00 h. (a) forêt d'origine, (b) pas de forêt, (c) des bâtiments (Yu et Hien, 2006). | 133 |
| Figure 43 : Températures et flux solaires calculés sur les surfaces des bâtiments, des arbres et sur le sol (UMR 1563 Ambiances architecturales et urbaines, 2002-2005). | 134 |
| Figure 44 : De la structure urbaine à la maille de simulation (Groleau <i>et al.</i> , 2003). | 135 |
| Figure 45 : Fonctionnement d'un couplage entre un modèle atmosphérique et un modèle de surface. | 136 |
| Figure 46 : Structure de NARP-LUMPS (d'après Grimmond et Oke, 2002). | 138 |
| Figure 47 : Schéma représentant les modèles de bilan d'énergie et hydrique de SM2-U avec huit types de surface (pav, cova, bare, nat, roof, vega, vegn, wat) et 3 couches de sols (Mestayer <i>et al.</i> , 2004). | 140 |
| Figure 48 : Bilan d'énergie sur les 4 différents quartiers de la ville (a) : zone pavillonnaire, (b) : centre ville, (c) : quartier des grands ensembles, (d) : zone industrielle & commerciale. R_n le rayonnement net, LE le flux de chaleur latente, H_s le flux de chaleur sensible et G la quantité de chaleur stockée (Leroyer, 2006). | 142 |

| | |
|---|-----|
| Figure 49 : Les résistances aérodynamiques, les flux de chaleurs sensibles et latentes et les paramètres climatiques intervenant au sein du schéma TEB (Masson <i>et al.</i> , 2002). | 145 |
| Figure 50 : Représentation schématique de la grille numérique du module urbain (Martilli <i>et al.</i> , 2002). | 147 |
| Figure 51 : Effets thermiques et mécaniques pris en compte dans le module urbain du <i>Finite Volume Model</i> (Krpou <i>et al.</i> , 2006). | 148 |
| Figure 52 : Simulation de la température au-dessus de la ville de Bâle (Suisse) sans (gauche) et avec (droite) une représentation de la ville par le biais du <i>Finite Volume Mode</i> . (Krpou <i>et al.</i> , 2006). La résolution est de 1km x 1km. | 149 |
| Figure 53 : Profils et domaines urbains (Allain (2004), d'après J.-P. Paulet, Géographie urbaine, Armand Colin, 2000). | 157 |
| Figure 54 : Volumétrie générale et éléments de façade (Allain, 2004). | 157 |
| Figure 55 : Schématisation du canyon urbain dans TEB - avec W la largeur moyenne des rues, $a_{bât}$ la fraction de bâtiment et $z_{bât}$ la hauteur moyenne des bâtiments (Lemonsu, 2003). | 165 |
| Figure 56 : Représentation des flux de surfaces moyens. D'après Lemonsu (2003). | 166 |
| Figure 57 : Flux du bilan d'énergie calculé par SURFEX ($Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S$). | 167 |
| Figure 58 : Les espaces verts parisiens et leurs aires d'influence. (Atelier parisien d'urbanisme, 2004). | 169 |
| Figure 59 : Estimation de la nature des surfaces et de la forme urbaine pour obtenir des données d'entrée nécessaire à SURFEX. | 172 |
| Figure 60 : Plan des hauteurs indiquant les hauteurs plafonds fixées pour l'application de l'article 10 du règlement du PLU de Paris (Ville de Paris). | 174 |
| Figure 61 : Vue du ciel d'un quartier du 5 ^{ème} arrondissement de Paris (Ville de Paris). | 186 |
| Figure 62 : Vue du ciel d'un quartier du 20 ^{ème} arrondissement de Paris (Ville de Paris). | 186 |
| Figure 63 : Coupe de toit correspondant à un bâtiment typique parisien, avec toiture zinc et comble (A Paris le terrasson est recouvert de zinc et généralement le brisis d'ardoises) (L'ANAH et le Ministère de l'Urbanisme et du Logement, 1984). | 187 |
| Figure 64 : Dessin d'un voligeage jointif (DICOBAT). | 189 |
| Figure 65 : Bilans d'énergie pour 'Paris' et 'urbain dense' le 30 juin 2006. | 192 |
| Figure 66 : Bilans énergétiques des toits pour 'Paris' et 'urbain dense' ($W.m^{-2}$) le 30 juin 2006. | 194 |
| Figure 67 : Bilans énergétiques des murs pour 'Paris' et 'urbain dense' ($W.m^{-2}$) le 30 juin 2006. | 195 |
| Figure 68 : Bilans énergétiques des routes pour 'Paris' et 'urbain dense' ($W.m^{-2}$) le 30 juin 2006. | 195 |
| Figure 69 : Représentation des fractions de ville (TEB), de végétation (ISBA) et d'eau selon les différentes expériences modélisées. | 198 |
| Figure 70 : Représentation des fractions de ville (TEB), de végétation (ISBA) et d'eau selon les différentes expériences modélisées. | 198 |
| Figure 71 : Schématisation du canyon urbain dans TEB - avec W la largeur moyenne des rues, $a_{bât}$ la fraction de bâtiment, $z_{bât}$ la hauteur moyenne des bâtiments et $z_{bât}$ la profondeur moyenne des bâtiments (D'après : Lemonsu, 2003). | 199 |
| Figure 72 : Représentation des formes du canyon selon les différentes expériences modélisées, c'est-à-dire en fonction de la largeur moyenne des rues W . | 199 |
| Figure 73 : Représentation des formes du canyon selon les différentes expériences modélisées, c'est-à-dire en fonction de la hauteur des bâtiments $z_{bât}$. | 200 |
| Figure 74 : Représentation des formes du canyon selon les différentes expériences modélisées, c'est-à-dire en fonction de la profondeur des bâtiments $P_{bât}$. | 200 |
| Figure 75 : Les standards Minergie et Minergie-P (MINERGIE). | 205 |

| | |
|--|-----|
| Figure 76 : Température (°C), vent (m/s) et rayonnement solaire (J/m ² /s) à la station Montsouris (Paris) le 30 juin 2006..... | 209 |
| Figure 77 : Température (°C), vent (m/s) et rayonnement solaire (J/m ² /s) à la station Montsouris (Paris) le 30 janvier 2006..... | 210 |
| Figure 78 : Variations journalière de la température de l'air dans chaque ville (°C) (comparaison des résultats simulés avec les mesures) : (a) températures simulées et (b) températures mesurées (Sasaki <i>et al.</i> , 2008)..... | 212 |
| Figure 79 : Mécanisme du bilan d'énergie au sein du milieu urbain (Sasaki <i>et al.</i> (2008), d'après Murakami <i>et al.</i> (2003)) | 212 |
| Figure 80 : Comparaison du bilan d'énergie au sol des trois villes (W/m ²) (Sasaki <i>et al.</i> , 2008)..... | 213 |
| Figure 81 : Variations journalières du bilan de chaleur sensible du C.V. par advection, diffusion turbulente et rejet de chaleur anthropique, et bilan de chaleur total (inclus la chaleur entrante pour le C.V.) : (a) centre de Tokyo, (b) centre de Sendai et (c) centre de Haramachi. | 214 |
| Figure 82 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour différents pourcentages d'espaces végétalisés le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006. | 216 |
| Figure 83 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour différents pourcentages d'espaces végétalisés arrosés pour la journée du 30 juin 2006..... | 216 |
| Figure 84 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour différents pourcentages d'espaces végétalisés très arrosés pour la journée du 30 juin 2006..... | 217 |
| Figure 85 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différents pourcentages d'eau le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006..... | 218 |
| Figure 86 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différentes largeurs de rues le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006. | 219 |
| Figure 87 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différentes hauteurs de bâtiments le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006..... | 220 |
| Figure 88 : Coordonnées solaires et courbes solaires en projection cylindrique (Paris). (Liebard et De Herde, 2006). | 220 |
| Figure 89 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différentes profondeurs de bâtiments le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006. | 221 |
| Figure 90 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différents albédos de toit le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006. | 224 |
| Figure 91 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différentes émissivités de toit le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006..... | 225 |
| Figure 92 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et ses toits en zinc et les modélisations avec différents types de toit (tuiles ou terrasses) le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006..... | 226 |
| Figure 93 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différentes isolations des murs le 30 janvier 2006. | 227 |
| Figure 94 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différents albédos de murs le 30 juin 2006. | 228 |
| Figure 95 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différentes émissivités de mur le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006..... | 229 |
| Figure 96 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différents flux de chaleur sensible dû au trafic le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006. | 231 |
| Figure 97 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différents flux de chaleur sensible d'origine industrielle le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006. | 232 |

| | |
|--|-----|
| Figure 98 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différents flux de chaleur latente d'origine industrielle le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006. | 232 |
| Figure 99 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et les modélisations 'Bâtiments Minergie' et 'Bâtiments Minergie Plus' le 30 janvier 2006. | 233 |
| Figure 100 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et les modélisations avec différents types de bâtiments (Minergie, Minergie Plus, Bâtiments très clairs et Bâtiments Minergie Plus très clairs) le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006..... | 234 |
| Figure 101 : Les 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. | 251 |
| Figure 102 : Les relations entre les outils opérationnels, les procédures à disposition des collectivités et le PLU et le SCOT, deux documents d'urbanisme réglementaires et incitatifs. | 251 |
| Figure 103 : Les documents du PLU..... | 259 |
| Figure 104 : Influences permettant de favoriser la réflexion autour de problématiques telles que le changement climatique ou le climat urbain. | 275 |
| Figure 105 : Ensemble des actions et techniques disponibles pour augmenter la capacité d'adaptation d'une ville aux fortes températures (Shaw <i>et al.</i> , 2007)..... | 289 |
| | |
| Figure A 1 : Habitat traditionnel selon les régions du Monde (Griffiths, 1976)..... | 345 |
| Figure A 2 : Interactions traditionnelles entre le climat (intérieur comme extérieur), les personnes et les bâtiments qui influencent nos besoins énergétiques (D'après Roaf <i>et al.</i> , 2005)..... | 348 |
| Figure A 3 : La cité jardin circulaire d'Ebenezer Howard (www.library.cornell.edu/Reps/DOCS/howard.htm)..... | 351 |
| Figure A 4 : Les projets de Le Corbusier. | 352 |
| Figure A 5 : Le triangle du risque (Crichton, 2008)..... | 356 |
| Figure A 6 : Les inondations de Nîmes du 3 octobre 1988 : un sinistre exceptionnel pour une inondation en France, 9 morts, 4 milliards de francs de dégâts (http://www.prim.net/)..... | 357 |
| Figure A 7 : Excès de décès observé quotidiennement en France pendant le mois d'août 2003 et relevé des températures extérieures (Hémon et Jougla, 2003). | 363 |
| Figure A 8 : Nombre de décès observés sur nombre de décès attendus au cours de la période du 1 ^{er} au 20 août 2003 en France en fonction de la tranche d'unité urbaine (D'après Hémon et Jougla, 2003). | 365 |
| Figure A 9 : Excès de risque (%) liés à l'ozone et à la température et représentation des parts relatives de chaque facteur pour la population tous âges. Période du 3 au 17 août 2003. (INVS, 2004). | 366 |
| Figure A 10 : Evolution du front d'expansion de la chenille processionnaire du pin dans le Bassin Parisien entre 1972 et 2004 (ONERC, d'après INRA – Orléans). | 374 |
| Figure A 11 : Impacts fondamentaux en fonction de l'accroissement de température moyenne planétaire (les impacts varieront en fonction de l'étendue de l'adaptation, du rythme de variation de température, du scénario socio-économique) (GIEC (2007(b))). | 377 |
| Figure A 12 : Intensité de l'îlot de chaleur de Londres aujourd'hui et dans le futur (Roaf <i>et al.</i> (2005), d'après R.L. Wilby, The Environment Agency). | 379 |
| Figure A 13 : Changement climatique et îlot de chaleur urbain (Best et Betts, 2004). | 380 |
| Figure A 14 : Changements climatiques — un cadre intégré (GIEC). | 383 |

| | |
|--|-----|
| Figure A 15 : Les horizons d'influence, d'attention et de responsabilité dans le temps et l'espace. Les points indiquent la distance dans le temps et l'espace de différents intérêts humains (Bossel (1999), d'après Meadows <i>et al.</i> (1972)). | 385 |
| Figure A 16 : Série des températures moyennes annuelles à la station de Montsouris à Paris (Dettwiller, 1978). | 395 |
| Figure A 17 : Evolution des minima de température depuis 1946 au centre de Paris, station de la tour Saint-Jacques (Escourrou, 1991). | 396 |
| Figure A 18 : Valeur de l'îlot de chaleur maximum à Columbia en 1967, 1970, 1972 et 1974 en fonction de la population, avec une extrapolation pour anticiper la taille « finale » (Landsberg, 1979). | 397 |
| Figure A 19 : Nombre d'évènements de pluie intense (>20mm.h ⁻¹) au sein de Mexico de juillet à septembre pour la période 1939-1989 (D'après Jauregui et Romales (1996)). | 398 |
| Figure A 20 : Profil d'un îlot de chaleur (http://www.espere.net , mars 2006). | 400 |
| Figure A 21 : Températures saisonnières minimales en région parisienne (1971-1980) (D'après Cantat (1986)). | 401 |
| Figure A 22 : Thermographie infrarouge de New-York. | 402 |
| Figure A 23 : Différences moyennes des humidités absolue et relative entre la zone urbaine et la zone rurale à Edmonton (Canada) en fonction du mois pour les années 1961-66 et 1967-73. A gauche durant la nuit (23h à 5h) et à droite en journée (11h à 17h) (Hage, 1975). | 403 |
| Figure A 24 : Précipitations par masses d'air instable dans l'agglomération parisienne en juin 1983 (Escourrou, 1991). | 406 |
| Figure A 25 : Résultats de l'étude de Shepherd <i>et al.</i> (2002) sur les villes américaines d'Atlanta (Georgie), de Montgomery (Alabama) et de San Antonio, Waco et Dallas (Texas). | 407 |
| Figure A 26 : Phénomène d'amplification de l'îlot de chaleur urbain et système de climatisation (Bozonnet, 2005). | 412 |
| Figure A 27 : Relation entre la température et la mortalité journalière dans le Grand Londres entre 1991 et 1996 (Roaf <i>et al.</i> (2005) d'après San Kovats). | 416 |
| Figure A 28 : Relation entre la mortalité et la température moyenne (le ratio de mortalité correspond au nombre de morts observés un jour <i>i</i> divisé par le nombre moyen de morts sur toute la période étudiée) (Huynen <i>et al.</i> , 2001). | 416 |
| Figure A 29 : Les domaines d'action pour influencer sur le climat urbain. | 427 |
| Figure A 30 : Graphe arborescent. | 428 |
| Figure A 31 : Schématisation du canyon urbain dans TEB - avec <i>W</i> la largeur moyenne des rues, <i>a_{bât}</i> la fraction de bâtiment et <i>z_{bât}</i> la hauteur moyenne des bâtiments (Lemonsu, 2003). | 429 |
| Figure A 32 : Représentation des couches de matériaux constituant les surfaces du canyon (Lemonsu, 2003) | 431 |
| Figure A 33 : Représentation des échanges en eau dans le canyon urbain (Lemonsu, 2003). | 433 |
| Figure A 34 : Rayonnement solaire incident (Lemonsu, 2003). | 435 |
| Figure A 35 : Représentation du système de résistances aérodynamiques associées au canyon urbain (Lemonsu, 2003). | 439 |
| Figure A 36 : Représentation du vent au-dessus et à l'intérieur du canyon urbain (Lemonsu, 2003). | 440 |
| Figure A 37 : Les résistances aérodynamiques, les flux de chaleurs sensibles et latentes et les paramètres climatiques intervenant au sein de du schéma TEB. (Masson <i>et al.</i> , 2002) | 442 |
| Figure A 38 : Représentation des flux de surfaces moyens. D'après Lemonsu (2003). | 444 |
| Figure A 39 : Comparaison entre la température du forçage et la température moyenne à 2m pour la modélisation de Paris le 30 juin 2006. | 447 |

| | |
|---|-----|
| Figure A 40 : Comparaison entre la température du forçage et la température moyenne à 2m pour la modélisation de Paris le 30 juin 2006 pour urbain dense, Paris avec un albédo de toit à 0,90 et Paris avec 50% d'espaces végétalisés. | 448 |
| Figure A 41 : Comparaison entre les températures moyenne à 2m au-dessus de la végétation (T2M_ISBA), au-dessus de la surface minérale (T2M_TEB) et au-dessus de l'eau (T2M_WAT) pour Paris les 30 janvier et 30 juin 2006. | 449 |
| Figure A 42 : Comparaison entre les températures moyenne à 2m au-dessus de la végétation (T2M_ISBA) très arrosé, au-dessus de la surface minérale (T2M_TEB) pour Paris les 30 janvier et 30 juin 2006..... | 450 |
| Figure A 43 : Représentation des échanges dans le schéma de surface ISBA (Lemonsu, 2003). | 453 |
| Figure A 44 : Température (°C), vent (m/s) et rayonnement solaire (J/m ² /s) à la station Montsouris (Paris) le 30 janvier 2006. | 472 |
| Figure A 45 : Température (°C), vent (m/s) et rayonnement solaire (J/m ² /s) à la station Montsouris (Paris) le 30 juin 2006..... | 472 |
| Figure A 46 : Domaines environnementaux pouvant concernés l'évaluation environnementale (Ministère de l'équipement et Ministère de l'Ecologie et du développement Durable, 2007). | 531 |
| Figure A 47 : Exemple d'un escalier de la gouvernance avec la grille RST ₀₂ . Cas d'une grange requalifiée en logements locatifs et en café de pays (CERTU, 2006)..... | 535 |

Liste des annexes

| | |
|--|-----|
| Annexe 1 Prise en compte du climat dans la conception des villes | 344 |
| Annexe 2 Perturbations climatiques : sources d'instabilité à gérer par la ville | 355 |
| Annexe 3 Modifications climatiques engendrées par la présence d'un milieu urbain | 393 |
| Annexe 4 Conséquences économiques, environnementales et humaines du climat urbain | 409 |
| Annexe 5 Proposition de Golany (1996) pour prendre en compte les particularités de certains climats dans l'architecture et l'urbanisme | 419 |
| Annexe 6 Ecoulement de l'air autour d'un ou plusieurs bâtiments | 421 |
| Annexe 7 Classification en zone climatique | 423 |
| Annexe 8 Graphe arborescent : Diminution de la température en milieu urbain | 427 |
| Annexe 9 Présentation du schéma de ville TEB | 429 |
| Annexe 10 Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère (ISBA) | 452 |
| Annexe 11 Calcul du flux de chaleur dû au trafic pour Paris | 456 |
| Annexe 12 Paramètres de SURFEX modifiés pour chacune des modélisations réalisées | 463 |
| Annexe 13 Courbes de résultats des simulations numériques effectuées les 30 janvier et 30 juin 2006 | 472 |
| Annexe 14 Contexte législatif et juridique encadrant la protection et l'amélioration de l'environnement | 519 |
| Annexe 15 Grille RST ₀₂ | 532 |
| Annexe 16 Dépliant 'Pour ma santé, pour mon milieu de vie, je verdis' | 536 |

Nomenclature

Lettres latines

| Symbole | Nom | Unité |
|-----------------------|---|---|
| ΔA | Variation du bilan net de la vapeur d'eau transportée par advection | m^3 |
| $a_{bât}$ | Fraction occupée par les bâtiments sur une parcelle, un quartier ou la ville | - |
| C_d | Coefficient de trainée | - |
| C_m, C_r, C_t | Capacité thermique volumique du mur, de la route et du toit | $J.m^{-3}.K^{-1}$ |
| d_m, d_r, d_t | Épaisseur du mur, de la route et du toit | m |
| E | Quantité de vapeur d'eau échangée dans les processus d'évaporation, d'évapotranspiration et de condensation | m^3 |
| G | Quantité d'énergie reçue du soleil | $kWh.m^{-2}$ |
| h_i et h_e | Coefficient de convection intérieur et extérieur | $W.m^{-2}.°C^{-1}$ |
| I | Quantité d'eau apportée artificiellement par les canalisations | m^3 |
| K_{\downarrow} | Rayonnement globale solaire reçu sur une surface horizontale | $W.m^{-2}$ |
| L_{\uparrow} | Rayonnement de grande longueur d'onde émis par le sol | $W.m^{-2}$ |
| L_{\downarrow} | Rayonnement atmosphérique descendant de grande longueur d'onde | $W.m^{-2}$ |
| L_m^*, L_r^*, L_t^* | Rayonnement infrarouge net reçu par le mur, la route et le toit | $W.m^{-2}$ |
| L_v | Chaleur latente de vaporisation | $J.kg^{-1}$ |
| $M_m^{S\uparrow}$ | Rayonnement solaire total réfléchi par le mur lors des réflexions sur la route et les murs | $W.m^{-2}$ |
| $M_r^{S\uparrow}$ | Rayonnement solaire total réfléchi par la route lors des réflexions sur la route et les murs | $W.m^{-2}$ |
| N | Nébulosité | - |
| P | Quantité de précipitations | $kg.m^{-2}.s^{-1}$ ou mm ou $mm.h^{-1}$ |
| p_s | Pression près de la surface | Pa |
| Q^* | Rayonnement net | $W.m^{-2}$ |
| ΔQ_A | Variation du flux de chaleur advectif | $W.m^{-2}$ |
| q_a | Humidité spécifique de l'air au premier niveau atmosphérique | - |
| q_{can} | Humidité spécifique de l'air à l'intérieur du canyon | - |
| Q_E ou Q_{LE} | Flux turbulent de chaleur latente | $W.m^{-2}$ |

| | | |
|---|---|-------------------------------|
| Q_f ou Q_F | Flux de chaleur d'origine anthropique (chaleur artificiel due aux processus de combustion, au métabolisme et aux rejets thermiques) | $W.m^{-2}$ |
| Q_H | Flux turbulent de chaleur sensible | $W.m^{-2}$ |
| Q_{Hindus} | Flux de chaleur sensible d'origine industrielle | $W.m^{-2}$ |
| Q_{Hm} | Flux turbulent de chaleur sensible entre le mur et l'air du canyon | $W.m^{-2}$ |
| Q_{Hr} | Flux turbulent de chaleur sensible entre la route et l'air du canyon | $W.m^{-2}$ |
| Q_{Ht} | Flux turbulent de chaleur sensible entre le mur et l'atmosphère | $W.m^{-2}$ |
| $Q_{Htrafic}$ | Flux de chaleur sensible dû au trafic | $W.m^{-2}$ |
| Q_{Hville} | Flux de chaleur sensible issus des zones urbaines vers l'atmosphère | $W.m^{-2}$ |
| $Q_{LEindus}$ | Flux de chaleur latente d'origine industrielle | $W.m^{-2}$ |
| Q_{LEm} | Flux turbulent de chaleur latente entre le mur et l'air du canyon | $W.m^{-2}$ |
| Q_{LEr} | Flux turbulent de chaleur latente entre la route et l'air du canyon | $W.m^{-2}$ |
| Q_{LEt} | Flux turbulent de chaleur latente entre le mur et l'atmosphère | $W.m^{-2}$ |
| $Q_{LEtrafic}$ | Flux de chaleur latente dû au trafic | $W.m^{-2}$ |
| $Q_{LEville}$ | Flux de chaleur latente issus des zones urbaines vers l'atmosphère | $W.m^{-2}$ |
| ΔQ_S | Variation de la quantité de chaleur stockée / flux de chaleur stockée | $W.m^{-2}$ |
| q_{sat} | Humidité spécifique de saturation | - |
| $\Delta Q_{Sm}, \Delta Q_{Sr}, \Delta Q_{St}$ | Variation du flux de chaleur par conduction à l'intérieur du mur, de la route et du toit | $W.m^{-2}$ |
| R | Quantité d'eau perdue par ruissellement et évacuation | m^3 |
| RES_m, RES_r, RES_t | Résistance aérodynamique du mur, de la route et du toit | $s.m^{-1}$ |
| R_g | Rayonnement globale solaire horaire | $J.cm^{-2}$ |
| R_{ican} | Nombre de Richardson calculé les parois et l'air dans le canyon | - |
| R_{itop} | Nombre de Richardson calculé entre le toit et l'atmosphère | - |
| R_r, R_t | Ruissellement de surface pour la route et pour le toit | m^3 |
| R_{th} | Résistance thermique | $K.m^2.W^{-1}$ |
| ΔS | Variation de la quantité d'eau emmagasinée | m^3 |
| S_{\downarrow} | Rayonnement solaire direct | $W.m^{-2}$ |
| S_m^* | Rayonnement solaire net reçu par le mur | $W.m^{-2}$ |
| $S_{m\downarrow}$ | Rayonnement solaire direct reçu par le mur sans réflexion préalable par les différentes surfaces | $W.m^{-2}$ |
| S_r^*, S_t^* | Rayonnement solaire net reçu par la route et par le toit | $W.m^{-2}$ |
| $S_{r\downarrow}, S_{t\downarrow}$ | Rayonnement solaire direct reçu par la route et par le toit sans réflexion préalable par les différentes surfaces | $W.m^{-2}$ |
| T | Température | $^{\circ}C, K$ ou $^{\circ}F$ |
| T_a | Température de l'air au premier niveau atmosphérique | $^{\circ}C, K$ ou $^{\circ}F$ |

| | | |
|-------------------------------|--|-------------------|
| T_{can} | Température au milieu du canyon | °C, K ou °F |
| T_m, T_r, T_t | Température intérieure du mur, de la route et du toit | °C, K ou °F |
| T_{mi}, T_{ri}, T_{ti} | Température de la $i^{\text{ème}}$ couche du mur, de la route et du toit | °C, K ou °F |
| T_s | Température de surface | °C, K ou °F |
| U | Coefficient de transmission thermique surfacique | $W.m^{-2}.K^{-1}$ |
| u^* | Vitesse de frottement | $m.s^{-1}$ |
| U_a | Vitesse du vent au premier niveau atmosphérique (z_{ref}) | $m.s^{-1}$ |
| U_{can} | Composante horizontale de la vitesse du vent dans le canyon | $m.s^{-1}$ |
| U_{eff} | Vent effectif dans le canyon | $m.s^{-1}$ |
| U_{top} | Vent à l'altitude $z_{bât}$ | $m.s^{-1}$ |
| V | Vitesse du vent | $m.s^{-1}$ |
| W | Largeur de la rue | m |
| W_{can} | Composante verticale de la vitesse du vent le long des murs | $m.s^{-1}$ |
| w_r | Quantité d'eau se trouvant sur la route | $kg.m^{-2}$ |
| w_{rmax} | Capacité maximale d'interception en eau de la route | $kg.m^{-2}$ |
| w_t | Quantité d'eau se trouvant sur le toit | $kg.m^{-2}$ |
| w_{tmax} | Capacité maximale d'interception en eau du toit | $kg.m^{-2}$ |
| z | Hauteur, altitude | m |
| z_0 | Longueur de rugosité | m |
| z_{0h} | Longueur de rugosité thermique | m |
| z_{0m} | Longueur de rugosité dynamique | m |
| $z_{bât}$ | Hauteur du bâti | m |
| $z_{ohcan}, z_{ohr}, z_{oht}$ | Longueur de rugosité thermique du canyon, de la route et du toit | m |
| z_{omr}, z_{omt} | Longueur de rugosité dynamique de la route et du toit | m |
| z_{ref} | Niveau d'altitude de référence | m |

Lettres grecques

| Symbole | Nom | Unité |
|-----------------------------------|---|-------------------|
| α | Albédo | - |
| δ_t | Fraction de toit humide | - |
| ε | Emissivité | - |
| θ | Angle entre la direction du soleil et l'axe du canyon | degrés (°) |
| θ_0 | Angle critique d'orientation du canyon au-delà duquel la rue passe dans l'ombre | degrés (°) |
| λ | Longueur d'onde | m |
| $\lambda_m, \lambda_r, \lambda_t$ | Conductivité thermique du mur, de la route et du toit | $W.m^{-1}.K^{-1}$ |

| | | |
|----------------------|---|---------------------------------|
| ρ_a | Densité de l'air au premier niveau atmosphérique | kg.m^{-3} |
| σ | Constante de Stefan-Boltzmann | $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ |
| φ | Angle zénithal limite des rayons du soleil | degrés (°) |
| φ_0 | Angle zénithal au-deçà duquel la rue est illuminée | degrés (°) |
| Ψ_{ciel} | Facteur de vue du ciel | - |
| Ψ_m, Ψ_r | Facteur de vue du ciel relatif aux murs et à la route | - |

Abréviations

| | |
|--------|---|
| ADEME | Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie |
| AEU | Approche Environnementale sur l'Urbanisme |
| AFNOR | Association Française de Normalisation |
| APUR | Atelier Parisien d'Urbanisme |
| CERTU | Centre d'études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques |
| CITEPA | Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique |
| CLA | Couche Limite Atmosphérique |
| CLU | Couche Limite Urbaine |
| CNRM | Centre Nationale de Recherches Météorologiques |
| COS | Coefficient d'Occupation des Sols |
| CPCU | Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain |
| CSTB | Centre Scientifique et Technique du Bâtiment |
| DTA | Directive Territoriale d'Aménagement |
| DTU | Documents Techniques Unifiés |
| EPCI | Etablissement Publics de Coopération Intercommunale |
| GIEC | Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat |
| GNV | Gaz Naturel pour Véhicules |
| GPL | Gaz de Pétrole Liquéfié |
| IFEN | Institut Français de l'Environnement |
| INRA | Institut National de la Recherche Agronomique |
| INSEE | Institut National de la Statistique et des Études Économiques |
| ISBA | Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère |
| LAURE | Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie |
| LOADDT | Loi d'Orientation pour l'Aménagement et le Développement Durable du Territoire |
| MH | Monument Historique |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| OCDE | Organisme de Coopération et de Développement Economique |
| ONERC | Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique |
| ONU | Organisation des Nations Unies |

| | |
|-------|---|
| PADD | Plan d'Aménagement et de Développement Durable |
| PDU | Plan de Déplacements Urbains |
| PIB | Produit Intérieur Brut |
| PLH | Plan Local de l'Habitat |
| PLU | Plan Local d'Urbanisme |
| POS | Plan d'Occupation des Sols |
| PPR | Plan de Prévention des Risques |
| PRQA | Plan Régional pour la Qualité de l'Air |
| PTAC | Poids Total Autorisé en Charge |
| RATP | Régie Autonome des Transports Parisiens |
| SCOT | Schéma de Cohérence Territorial |
| SDAGE | Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion de l'Eau |
| SIG | Système d'Information Géographique |
| SRU | Solidarité et Renouvellement Urbain |
| SSC | Schéma de Services Collectifs |
| TEB | Town Energy Balance |
| ZAC | Zone d'Aménagement Concerté |

Introduction

La civilisation sumérienne, au III^e millénaire avant Jésus-Christ, a marqué au Moyen Orient la fin de la préhistoire et a constitué l'une des premières civilisations urbaines (Bonello, 1998). Ce qui fut exceptionnel à l'époque est devenu le précurseur pour de nombreuses autres civilisations. Ainsi, au fil des siècles, les villes se sont multipliées et sont devenues des organisations de plus en plus complexes. Aujourd'hui, la population urbaine a dépassé en nombre la population rurale et à l'horizon 2030 elle devrait atteindre cinq milliards d'individus pour huit milliards d'habitants sur la planète (ONU). Cette croissance de la population urbaine s'accompagne d'une urbanisation galopante, notamment dans les pays en développement mais également, même si c'est en moindre mesure, au sein des pays développés avec le phénomène de l'étalement urbain. L'enjeu des villes du Nord réside ainsi dans la transformation et le renouvellement des tissus urbains, contrairement aux villes du Sud qui doivent, elles, faire face à une croissance urbaine à la fois très soutenue et le plus souvent incontrôlée.

La ville est un écosystème complexe que la multiplicité des définitions reflète bien. Elle est « *territoire et population, cadre matériel et unité de vie collective, configuration d'objets physiques et nœuds de relations entre sujets sociaux* » (Grafmeyer, 1995). La ville, pour reprendre les représentations systémiques et éco-système existantes (Bossel, 1999. Bonan et al., 2004), allie ainsi à la fois des dimensions fonctionnelles (l'habitat, les loisirs, l'éducation, l'emploi), une diversité de lieux (bâti, non bâti, etc.) et des groupes sociaux (des individus d'origines diverses et ayant des intérêts différents). De plus, la ville évolue au sein d'un environnement « naturel » avec lequel elle interagit en permanence. Le climat fait partie intégrante de cet environnement et, par le passé, la conception des bâtiments et, par extension, des villes s'est souvent faite avec une volonté d'adéquation avec celui-ci (Givoni, 1978). L'empirisme puis l'approche scientifique de la construction ont ainsi permis de répondre en partie aux besoins humains de sécurité et de confort vis-à-vis d'un climat pas toujours clément. Il est constaté que les villes, en plus d'être influencées par le climat, influent elles-mêmes sur celui-ci. Elles modifient ainsi localement les paramètres climatiques. Ces modifications peuvent être constatées soit par comparaison avec les zones plus rurales voisines, soit par comparaison avec leur propre situation (moins urbanisée et/ou moins dense) dans le passé. La ville induit ainsi, au sein de son territoire, une augmentation des températures (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 (Stemmers, 2006a), la santé (Buechley *et al.*, 1972) ou encore la faune et la flore (Sukopp, 2004).

Souvent présentées comme des lieux où se concentrent la majorité des émissions de gaz à effet de serre, les villes sont également en partie à l'origine de modifications climatiques mondiales. Ce changement climatique devrait, selon toutes vraisemblances, accroître la fréquence des événements extrêmes tels que les vagues de chaleur selon le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Au regard des événements récents, tels que la canicule de 2003 en Europe, les villes se révèlent mal adaptées à de telles conditions de chaleur (Besancenot, 2002). Le climat urbain a pour effet principal de limiter la baisse des températures durant la nuit, diminution qui, lors des vagues de chaleur, devient vitale pour permettre aux organismes humains une récupération des fortes chaleurs du jour. A cela s'ajoute l'influence éventuelle des changements climatiques globaux sur l'intensité de l'îlot de chaleur dont nous ne mesurons pas encore toute l'importance (Roaf *et al.*, 2005. Best et Betts, 2004. Rosenzweig *et al.*, 2005).

A l'heure actuelle, si les collectivités territoriales françaises ont commencé à s'organiser pour limiter les rejets de gaz à effet de serre, la réflexion autour de l'adaptation nécessaire au changement climatique se limite souvent à améliorer la politique existante de prévention et de gestion des risques de catastrophes naturelles. Face à l'incertitude, justifiée, des prévisions concernant l'évolution du climat de la part des climatologues, les collectivités territoriales hésitent à s'engager dans des actions encore aujourd'hui peu valorisantes et valorisables auprès des citoyens et synonymes d'échec des moyens de lutte contre le changement climatique (Bertrand et Larrue, 2007). Pourtant des dispositifs peuvent être envisagés tels que : l'institutionnalisation d'un planning sur le long terme pour anticiper les problèmes et y apporter des réponses adéquates ; les stratégies « sans regret »¹, qui réduisent la vulnérabilité à un coût négatif, nul ou négligeable ; le choix de stratégies réversibles ; etc. (Hallegatte, 2008). Le manque d'anticipation et d'intérêt, les forts conflits d'intérêts locaux, ou encore l'incapacité à s'approprier la responsabilité du problème des impacts du changement climatique de la part des politiques freinent la réflexion autour de la question de l'adaptation

¹ Le terme stratégie « sans regret » est utilisé pour des stratégies qui en plus d'apporter une solution à un problème donné (ici le changement climatique) peuvent être valorisées par les bénéfices conjoints qu'elles offrent. Elles sont « sans regret » dans le sens où si le changement climatique n'a pas lieu, nous ne regretterons cependant pas d'avoir mis en place de telles stratégies.

(ADEME, 2007) et, par conséquent, l'intégration de l'enjeu du climat urbain dans cette problématique.

Pour améliorer la qualité environnementale des écosystèmes urbains et minimiser les impacts humains sur la nature et donc, en retour, sur l'espèce humaine, il est nécessaire, comme le signale Bonan (2002), d'équilibrer les composantes naturelles et culturelles des paysages, ou encore d'équilibrer les faits scientifiques, la connaissance scientifique du milieu, et les valeurs de l'aménagement. Au sein de la climatologie urbaine, les différentes réflexions engagées par les climatologues, les géographes mais également les architectes et les urbanistes sur la relation entre leurs cœurs de métier, permettent aujourd'hui de percevoir le potentiel de réduction des températures en milieu urbain. A l'heure des changements climatiques, cette réflexion offre des perspectives de solutions d'adaptation intéressantes pour mieux se protéger des vagues de chaleur.

Les collectivités territoriales ont ainsi un intérêt à mieux connaître et à mieux intégrer les modifications climatiques locales que la ville provoque. 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 conséquences climatiques de leur(s) aménagement(s) mais également de savoir quels sont actuellement les moyens à leur disposition pour en tenir 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. Cette dernière question s'ancre dans les problématiques environnementales actuelles. En effet, la mise en pratique de principes pourtant approuvés par une majorité de la communauté scientifique nationale ou internationale est souvent mise à mal par le manque de volonté des élus ou encore le fonctionnement peu concluant de la diplomatie. Cela se retrouve au niveau du développement durable dont l'application pratique est l'Agenda 21 ou encore au niveau du changement climatique avec les difficultés entourant la mise en place du protocole de Kyoto. C'est

pourquoi la première étape, c'est-à-dire l'étude qualitative et quantitative de la contribution de différents facteurs au climat urbain, est nécessaire puisqu'elle permet une assise scientifique à notre problématique.

Le manuscrit s'organise en quatre parties aux objectifs distincts et complémentaires.

Dans la première partie, nous présentons 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. Dans un premier temps, nous présentons la manière dont les scientifiques ont abordé et abordent aujourd'hui la question du climat urbain et de l'îlot de chaleur et la façon dont ils les relient à la ville, à sa conception, à son architecture, à sa forme ou encore à sa géométrie. Dans un deuxième temps sont décrits les phénomènes climatiques engendrés à l'échelle micro, c'est-à-dire à l'échelle de la rue et du bâtiment. Puis sont présentés les phénomènes qui en découlent à l'échelle de la ville comme la modification du bilan d'énergie. Cette partie se termine par une première présentation des facteurs urbains et de leur influence dans la formation du climat urbain.

Les méthodes utilisées pour répondre à notre problématique ainsi qu'un état de l'art des modèles de simulation numérique du climat urbain sont exposés dans notre deuxième partie. En effet, à l'heure actuelle, de nombreux modèles existent et permettent une analyse des interactions du cadre bâti avec le climat à l'échelle locale ou à la méso-échelle. Chaque modèle repose sur des hypothèses, qui lui confèrent une portée et des limites qu'il est nécessaire d'analyser pour effectuer un choix.

La troisième partie présente tout d'abord une proposition de domaines d'action en adéquation avec la manière dont se conçoivent et se gèrent les milieux urbains. De chaque domaine 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 quatrième et dernière partie porte 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. Ces moyens peuvent être de nature réglementaire ou opérationnelle : ce sont les outils de planification urbaine tels que les schémas de cohérence territoriale et les plans locaux d'urbanisme, ou encore les procédures d'aménagement comme les zones d'aménagement concerté ou les lotissements. A cela s'ajoutent des moyens de l'ordre de l'incitation, de l'information, nécessitant de la part de la collectivité une certaine exemplarité sur ses propres domaines de compétence.

Le manuscrit s'achève sur une mise en perspective des différents résultats obtenus et des analyses et réflexions élaborées durant ce travail de thèse. Des propositions sur les études qui permettront de compléter et de poursuivre cette recherche sont également évoquées.

Première partie :
Contexte et analyse bibliographique

I Introduction

Notre recherche s'inscrit dans un contexte encore plus large que celui de la climatologie urbaine qui est la relation de la ville avec le climat. Certains éléments de cette relation ont été évoqués en introduction. Des études plus approfondies sur la prise en compte du climat dans la conception des villes, les perturbations climatiques comme sources d'instabilité à gérer par les villes, les modifications climatiques engendrées par la présence d'un milieu urbain, et les conséquences économiques, environnementales et humaines du climat urbain sont disponibles en annexes 1, 2, 3 et 4. Abordons maintenant le contexte plus précis de notre étude : la climatologie urbaine.

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.

Avant de présenter la manière dont les scientifiques ont abordé et abordent aujourd'hui la question du climat urbain et de l'îlot de chaleur et la façon dont ils les relient à la ville, à sa conception, son architecture, sa forme ou encore sa géométrie, il est intéressant de présenter les échelles d'analyse utilisées en climatologie urbaine.

L'étude du climat urbain nécessite de distinguer différentes échelles horizontales et verticales (Oke, 2004, 1978). Les échelles verticales seront présentées dans le prochain chapitre, avant d'aborder les différents phénomènes physiques à l'origine de la formation du climat urbain. 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)² 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. Dans l'idéal, les stations urbaines devraient éviter ces influences microclimatiques mais, en réalité, ceci est difficilement réalisable.

L'échelle locale (10^2 à 5×10^4 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 2×10^5 m) correspond à la zone influencée par exemple par la présence d'une agglomération. Une unique station ne peut pas représenter cette échelle.

² 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.

II Climatologie urbaine : une science en évolution

II.1 Naissance et évolution de la climatologie urbaine

Les premières études sur le climat urbain ou sur les conditions climatiques des villes datent d'avant Jésus Christ comme le constate Yoshino (1990/91) dans son article relatant les différentes études en climatologie urbaine depuis la nuit des temps jusqu'aux années 1980. Vitruve ou Marcus Vitruvius Pollio (75-26 avant Jésus Christ), architecte et ingénieur romain, a écrit sur les relations entre l'aménagement des villes et les conditions climatiques, ou encore Manasara Silpasatra (avant JC), un indien, a écrit sur la prise en compte des conditions de luminosité et de ventilation pour la conception d'aménagement. L'étude du climat urbain est également très liée à l'intérêt pour la pollution de l'air. Horace (65-68 avant JC) décrit celle de Rome tout comme Circa (3 avant JC - 65). Sir John Evelyn écrit au XVII^{ème} siècle sur la pollution de l'air, le vent, la température de la ville et le brouillard fumeux ou smog de Londres. C'est à partir de la fin du XVIII^{ème} siècle que naît vraiment la climatologie urbaine, avec l'arrivée progressive des mesures instrumentales. Cotte (1774) va ainsi décrire le climat de Paris à partir d'observation et Howard (1818, 1833) celui de Londres. En 1927, la première traversée en voiture avec un équipement de mesures mobile est effectuée par Schmidt et Pepler ; en 1927, Geiger publie un ouvrage sur les microclimats en incluant la climatologie urbaine ; en 1937, Kratzer publie le premier ouvrage sur la climatologie urbaine. La recherche en climatologie urbaine va alors s'accélérer durant la deuxième partie du XX^{ème} siècle (Yoshino (1990/91), Duchêne-Marullaz (1980)), et des études détaillées vont montrer, par le biais de mesures, la particularité climatique des villes : New-York (Bornstein, 1968), Paris (Escourrou, 1986), etc.

Yoshino (1990/91) estime que les progrès effectués dans cette discipline s'expliquent et se perçoivent par l'apparition progressive des éléments et évènements suivants : 1) Les observations se sont élargies à la troisième dimension au-dessus de la ville. 2) Les méthodes de télédétection (cf. lexique) et l'interprétation des photographies aériennes ont été introduites. 3) Les simulations numériques ou les études de modélisation ont été employées en utilisant un ordinateur. 4) Les analyses et la cartographie sont faites en relation avec la pollution atmosphérique et les conditions topoclimatiques. 5) Des ouvrages, articles à comité de lecture, et bibliographies en climatologie urbaine ont été publiés. 6) Les effets de la ville sur les précipitations ont été étudiés avec l'îlot de chaleur urbain. 7) Les îlots de chaleur sont

considérés en relation à la densité bâtie, le paramètre de rugosité, le facteur de vue du ciel³ (*sky view factor*), la population, etc. 8) La climatologie urbaine n'a plus été étudiée uniquement dans les pays développés, mais également dans les pays en développement. 9) les problèmes environnementaux dans les villes sont réapparus. 10) Une insistance a été donnée aux travaux portant sur les processus comme les études des bilans d'énergie et en eau.

Nous pouvons résumer que la connaissance en climatologie urbaine est issue à la fois des mesures sur sites, de la simulation en soufflerie ou en tunnel aéraulique et des simulations numériques (Peneau, 1995). Ainsi, de l'observation du climat urbain grâce entre autres à de nombreuses campagnes de mesures⁴ à la modélisation plus ou moins fines des phénomènes physiques en jeu, les climatologues ont pu décrire et comprendre avec de plus en plus de précisions la formation du climat urbain. Si les premiers travaux étaient avant tout concentrés sur l'îlot de chaleur urbain observé globalement sur toute l'agglomération, les climatologues se sont progressivement intéressés à des échelles inférieures mettant ainsi en exergue l'importance de la géométrie urbaine (Aida et Gotoh (1982), Oke (1988), Giridharan *et al.* (2007), Yamashita *et al.* (1986), Ali Toudert (2005)) et des matériaux de construction (Taha *et al.* (1988), Rosenfeld *et al.* (1995)).

Aujourd'hui, la compréhension du bilan d'énergie, c'est-à-dire des échanges d'énergie entre l'atmosphère et la surface urbaine est au cœur de nombreuses recherches sur la modélisation (informatique ou non) du climat urbain. Mais avant cela la relation entre le milieu urbain et sa température a été largement simplifiée par les climatologues et les modèles des différents chercheurs ont principalement estimé la différence de températures maximales entre zones urbaine et rurale la nuit (c'est le moment où l'îlot de chaleur est le plus conséquent).

Givoni (1998) cite par exemple l'équation de Sundborg (1950) qui relie l'intensité de l'îlot de chaleur nocturne d'Uppsala (Suède) avec les éléments météorologiques suivants : la

³ Le facteur de vue du ciel correspond à la portion de ciel observable à partir de la surface considérée. Ce facteur est égal à 1 dans le cas d'une surface plane sans obstacle et varie entre 0 et 1.

⁴ Campagne METROMEX - METROpolitan Meteorological EXperiment – à Saint-Louis (Etats-Unis) en 1971 : Changnon *et al.* (1971, 1977) et Ackeman *et al.* (1978) ; Campagne ECLAP - Etude de la Couche Limite en Agglomération Parisienne – à Paris en 1994/95 : Menuet (1997) ; Campagne NANTES'99 à Nantes en 1999 : Vachon *et al.* (2000) ; Campagne ESCOMPTE - Expérience sur Site pour CONtraindre les Modèles de Pollution atmosphérique et Transport des espèces – à Marseille en 2001 : Lemonsu (2003), et Cros *et al.* (2004) ; Campagne BUBBLE - Basel Urbain Boundary Layer Experiment – à Bâle (Suisse) en 2001/02 : Roulet (2004), Christen *et al.* (2003), Vogt *et al.* (2003), et Rotach *et al.* (2003) ; Campagne CAPITOUL - Canopy and Aerosol Particles Interactions in Toulouse Urbain Layer – à Toulouse en 2004/05 : <http://medias.cnrs.fr/capitoul/index.jsp> ; et encore bien d'autres à Birmingham (Royaume-Uni), Bologne (Italie), Cracovie (Pologne), Helsinki (Finlande), Copenhague (Danemark) ou encore Hanovre (Allemagne) (Piringer et Joffre, 2005).

nébulosité (N), la vitesse du vent (V), la température (T), et l'humidité spécifique (q). La formule trouvée est :

$$\Delta T_{max} = 2.8 - 0.1 N - 0.38 V - 0.02 T + 0.03 q \quad (\text{Formule 1})$$

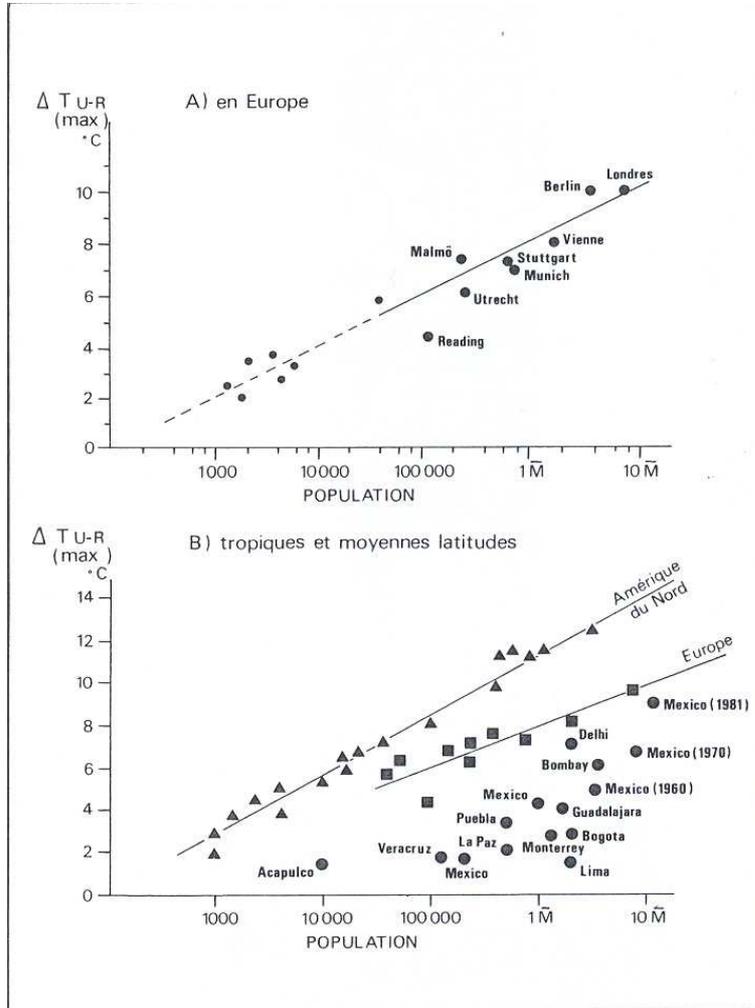


Figure 1 : Evolution de l'intensité maximale de l'îlot de chaleur urbain en fonction de la population (Escourrou (1991) d'après les données de Oke (1973)).

A partir de données sur des villes nord-américaines, Oke (1973) suggère la formule suivante permettant de lier population (P) et différence maximale de températures (de nuit, sans vent) entre le centre urbain et la campagne environnante :

$$\Delta T_{u-r(max)} = 2.96 \log P - 6.41 \quad (^\circ\text{C}) \quad (\text{Formule 2})$$

Son étude sur les villes européennes suggère une autre relation :

$$\Delta T_{u-r(max)} = 2.016 \log P - 4.06 \quad (^\circ\text{C}) \quad (\text{Formule 3})$$

Ces relations, que la figure 1 illustre, suggèrent entre autres que les conséquences climatiques d'une augmentation de population pour une ville moyenne sont plus conséquentes que pour une grande ville (croissance logarithmique).

Selon Santamouris (2001a) et Givoni (1998), Oke propose également d'autres formules pour calculer l'intensité maximale de l'îlot de chaleur. Ainsi Oke (1982) relie cette dernière pour des villes américaines (près du coucher du soleil et sous un ciel sans nuage) à la population mais également à la vitesse du vent régional :

$$\Delta T_{max} = P^{0.25} / (4V)^{0.5} \quad (K) \quad (\text{Formule 4})$$

Où ΔT est l'intensité de l'îlot de chaleur en Kelvin, P est la population et V la vitesse du vent non-urbain à l'échelle régionale en m/s à 10m de hauteur.

Oke (1981) a également fait une corrélation entre l'intensité maximale de l'îlot de chaleur urbain et la géométrie du canyon urbain, exprimée en fonction de la hauteur des bâtiments (H) et la distance entre les bâtiments (W) par le ratio H/W :

$$\Delta T_{max} = 7.54 + 3.97 \ln (H/W) \quad (^\circ C) \quad (\text{Formule 5})$$

Il a également utilisé le facteur de vue du ciel (Sky view factor – SVF) pour caractériser cette géométrie et suggéré ainsi la formule suivante :

$$\Delta T_{max} = 15.27 - 13.88 * SVF \quad (^\circ C) \quad (\text{Formule 6})$$

Cette dernière formule suppose en quelque sorte que l'îlot de chaleur urbain est principalement lié à la perte réduite de chaleur des rues étroites et encaissées par rapport à des milieux plus ouverts.

Selon Givoni (1998), Taha (1988) a également essayé de corréler l'îlot de chaleur urbain avec le facteur de vue du ciel. A partir de mesures de températures de l'air (à 1,5 mètres du sol) et de facteur de vue du ciel sur 126 points situés dans neuf rues de San Francisco (Etats-Unis) durant trois nuits claires (entre 20h et 2h). Pour chaque rue, une régression a été effectuée pour exprimer les températures en fonction du facteur de vue du ciel et la formule générale trouvé était de la forme suivante :

$$T = A - b * SVF \quad (^\circ C) \quad (\text{Formule 7})$$

Le coefficient de régression b représente l'effet du facteur de vue du ciel sur les différences de température, et, selon la rue, était compris entre 0,010 et 0,110. Comme le signale Givoni (1998), le ratio de 1/11 entre le minimum et le maximum de b semble indiquer que le facteur de vue du ciel seul n'est pas forcément un indicateur très pertinent pour estimer les différences de températures en milieu urbain.

Aujourd'hui les modèles informatiques sont plus complexes et prennent en compte de nombreux facteurs tant pour la géométrie urbaine que pour les matériaux urbains (cf. deuxième partie).

II.2 Climatologie urbaine : une science pluridisciplinaire ?

La climatologie urbaine est aujourd'hui un domaine de recherche investi à la fois par les climatologues et les géographes, mais également par les architectes et les urbanistes. Chacun d'eux s'est approprié ce sujet selon des échelles, des variables ou encore des objets d'étude différents (Ali Toudert, 2005).

Il est nécessaire aujourd'hui, comme l'ont déjà signalé de nombreux auteurs (Bitan, 1988. Katzschner, 1988. Oke, 1984, 1988, 2006. Arnfield, 1990. Eliasson, 2000. Alcoforado *et al.*, 2006) de mettre en place une démarche pluridisciplinaire et d'intégrer à la pratique de l'aménagement urbain et de l'architecture des éléments de climatologie urbaine. Cette ouverture d'esprit de la part des architectes, des urbanistes et des aménageurs à l'intégration de critères climatiques dans leurs pratiques sera bénéfique pour traiter les problèmes plus généraux que sont l'environnement et la qualité de vie.

Alors que les climatologues et géographes se sont penchés plus particulièrement sur la formation du climat urbain, les architectes se sont intéressés à l'impact des conditions climatiques et environnementales sur les bâtiments. Parallèlement, les architectes, focalisés initialement sur les questions de confort intérieur et sur les besoins énergétiques pour le maintenir, se sont ouverts progressivement aux conditions extérieures au bâtiment. Le contexte urbain, modifiant l'apport solaire et le comportement du vent, a ainsi progressivement intégré les pratiques (Ali Toudert, 2005).

Si aujourd'hui le climat urbain est perçu pour beaucoup de façon négative et comme quelque chose qu'il est nécessaire de maîtriser et de réduire, ce ne fut pas toujours le cas. Selon Landsberg (1981), Linke (1940) décrit le climat urbain comme un phénomène météorologique positif qui trouve son développement le plus important par temps calme et un ciel sans nuage.

D'une recherche fondée sur l'observation des différences climatiques entre le milieu urbain et le milieu rural environnant peu encline à distinguer la variété constructive des villes et leurs effets sur le climat urbain, nous sommes passés à des études interrogeant la relation entre la forme urbaine et différents paramètres climatiques du climat urbains (Givoni, 1998). Aujourd'hui, le fossé entre les études pointues mais théoriques en climatologie urbaine et la pratique de l'aménagement urbain tente d'être comblé par différents auteurs d'ouvrage et d'outil relatifs à la prise en compte du climat urbain dans l'aménagement et l'architecture (Katzschner (1988), Givoni (1998), Scherer *et al.* (1999), Adolphe *et al.* (2002), Dhakal et Hanaki (2002), Baumüller *et al.* (2005)) ou au rafraîchissement des villes (Rosenfeld *et al.* (1995), Santamouris *et al.* (2004), Sailor et Dietsch (2005), Alcoforado *et al.* (2006), Alcoforado (2006), Rosenzweig *et al.* (2006)).

II.3 Prise en compte du climat urbain dans l'aménagement et l'architecture : quelques exemples

L'étude de Katzschner (1988) concernant la ville de Hannoversch-Münden (Allemagne) se focalise sur la ventilation au sein de la ville et par voie de conséquence sur la dispersion des polluants. Une cartographie de la ville avec les zones de faibles ou fortes ventilations et les couloirs de ventilation permet à Katzschner (1988) de conclure que Hannoversch-Münden peut difficilement accueillir des industries polluantes à ses alentours sans risquer une pollution de l'air importante. Cette étude montre que de telles cartographies peuvent être mises en relation avec le zonage effectué régulièrement en aménagement urbain.

Givoni (1998) s'est intéressé aux considérations d'ordre climatique dans le bâtiment et l'aménagement urbain. Son ouvrage, conséquent, aborde à la fois la climatologie du bâtiment (notions de confort intérieur, éléments architecturaux influençant le confort intérieur, propriétés des matériaux et performance thermique des bâtiments, les systèmes de chauffage passif au soleil, le refroidissement passif, ou encore les caractéristiques climatiques de maisons types) et la climatologie urbaine (caractéristiques générales, effets de l'aménagement urbain, ou encore effets des espaces végétalisés) avant de proposer des indications pour la construction des bâtiments et l'aménagement urbain. La structure d'une ville peut être contrôlée par la planification urbaine et l'aménagement urbain ; il est alors possible selon Givoni (1998) de modifier le climat urbain par le biais des règles d'urbanisme et par la conception des zones périurbaines voisines et des nouvelles villes. Il met ainsi en avant différents critères tels que la localisation géographique de la ville, sa taille, la densité de constructions, la nature de la surface, la taille des bâtiments, l'orientation et la largeur des

rues, etc. Ses indications, qui concernent quatre types de climat (chaud et sec, chaud et humide, froid, et froid en hiver, chaud et humide en été), abordent à la fois le bâtiment et l'aménagement urbain, avec cependant une forte prédominance du premier. Cette dernière partie s'apparente plus à un ensemble de règles de bon sens qu'à une analyse des conséquences d'une transformation du cadre bâti.

Scherer *et al.* (1999) se sont intéressés aux concepts et méthodes pour analyser et évaluer le climat urbain dans un but d'optimisation des procédés de planification urbaine. Ils se sont plus particulièrement intéressés à la région de Bâle (Suisse) et ont produit des cartes climatiques de cette région (distinguant plusieurs types de secteurs) pour permettre aux aménageurs de prendre en compte le climat urbain et ses interactions avec les structures urbaines. Pour chaque section climatique, un guide d'aménagement abordant les questions de ventilation, de qualité de l'air et de conditions thermiques a été proposé.

Adolphe *et al.* (2002) ont travaillé sur le projet SAGACités (Système d'Aide à la Gestion des Ambiances urbaines) dont l'un des objectifs était de mettre en relation et perspective les données recueillies par le biais de mesures in situ, celles obtenues par les outils de modélisation physique de la qualité environnementale des espaces urbains (modélisation thermique, thermographie⁵, modélisation aérodynamique, etc.) à des échelles plutôt micro, des indicateurs objectifs (densité de bâtiments, taux de minéralisation, densités de sites propres, densités d'espaces verts par habitant, énergie pour le chauffage, etc.) et des indicateurs subjectifs liés à la perception qu'en ont les usagers, et tout cela dans une approche croisant technique, social et environnemental. Le modèle issu de ce projet a été mis en œuvre dans un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires urbains, qui s'appuie sur un Système d'Informations Géographiques (SIG). Ce projet, dont les deux thèmes étaient le microclimat et l'énergie, a nécessité la collaboration entre des architectes, des ingénieurs et des sociologues, permettant ainsi une approche pluridisciplinaire. L'échelle principale était l'échelle locale du quartier mais la relation avec les autres échelles géographiques, de l'espace public à l'agglomération, était également prise en compte. Le projet proposait au final une plate-forme informatique permettant le suivi de projets urbains existants (une forme de tableau de bord environnemental), la comparaison (intra ou inter-urbaine) entre sites, et la construction de scénarii de conception d'espaces urbains prenant en compte des enjeux environnementaux (centrés sur les paramètres énergétiques et microclimatiques), mais aussi

⁵ Thermographie : Technique d'enregistrement graphique des températures de divers points d'un corps par détection du rayonnement infrarouge qu'il émet. Cette technique est utilisée en télédétection

sociaux et perceptifs. Dans cette étude, Adolphe *et al.* (2002) mettent en avant plusieurs disfonctionnements : « *Les politiques de maîtrise énergétique dans le bâtiment, portées par une vision technologique et réglementaire, ont surtout conforté des actions d'optimisation (au sens de la recherche opérationnelle) de certains composants de l'habitat neuf. Elles visent uniquement la performance maximale, quelquefois au mépris de simples considérations d'usage ou de qualité des ambiances [...]. En conception architecturale ou urbaine, cette vision partielle et partielle de la performance énergétique du projet a occulté d'autres composantes aussi importantes. On peut citer d'abord l'environnement proche du bâtiment à l'échelle urbaine, du parcellaire au tracé des voies, en passant par les effets de végétation. Cette analyse oblige à réintégrer l'information climat ou énergie dans l'élaboration des modes opératoires de planification, et notamment dans les procédures d'urbanisme opérationnel (zones NA, ZAC, PLU, SCOT...). [...] On peut citer la réhabilitation du parc existant. Avec un taux de croissance annuel du parc immobilier légèrement supérieur à un pour cent (on construit peu, on réhabilite beaucoup), c'est bien évidemment sur les bâtiments existants que les impacts d'une politique de maîtrise énergétique seront les plus visibles à l'échelle d'un quartier, comme d'une nation. Enfin, on peut citer la modification de l'usage de l'énergie par des stratégies basées sur l'inflexion de la demande. Pour se convaincre du poids important de ces dernières mesures, il suffit en effet de s'intéresser aux consommations unitaires de chauffage (KWh/m²), qui varient d'un facteur de 1 à 3 entre l'électricité en individuel et le fioul en collectif : à statut identique (locataire ou propriétaire), la consommation unitaire est supérieure pour le collectif, comparée à l'individuel, alors que l'on peut penser que la compacité⁶ et la contiguïté y sont supérieurs. »*

Dhakal et Hanaki (2002) se sont intéressés à l'influence des rejets de chaleur anthropique sur l'environnement thermique urbain de Tokyo. Les rejets de chaleurs dus aux bureaux, commerces, habitats ont été simulés avec l'aide du logiciel de modélisation DOE-2. L'approche utilisée ici prend en compte la chaleur stockée dans la constitution des bâtiments. Un système géographique a été utilisé pour connaître la distribution de rejet de chaleur dans tout Tokyo. Les analyses à l'échelle méso du climat urbain ont été menées avec un modèle qui s'appuie sur le « *Colorado State University Mesoscale Model* ». Les possibles améliorations de l'environnement thermique urbain ont été étudiées par le biais de deux types de scénarii en

⁶ Compacité : le facteur de compacité est le rapport de la surface d'enveloppe extérieure au volume total (chauffé) des bâtiments. « *Ce facteur de compacité est largement utilisé pour qualifier l'impact de la morphologie des bâtiments sur leur performance énergétique : en fait leurs déperditions thermiques. En effet, il donne une information quant à l'augmentation de la surface d'échange entre air et tissu, augmentation due à l'extension verticale de la ville par rapport à une surface plane.* » (Adolphe *et al.*, 2002).

relation au management des sources de chaleur et des modifications de la surface urbaine. Les modélisations ont été effectuées pour une journée d'été. La meilleure amélioration pour la température moyenne de la journée trouvée est de 0,47°C et ceci en mettant de la végétation sur le sol autour des bâtiments de Tokyo. De même, l'élévation maximale de la température moyenne pour la nuit a été de 0,11°C et ceci en déversant toute la chaleur au niveau du sol (chaleur issue notamment des systèmes d'air conditionné).

Une simulation a été effectuée avec la situation climatique du 22 juillet 1989. L'influence du rejet de chaleur dans l'environnement a été analysée en simulant le climat à l'échelle meso avec et sans ce rejet de chaleur. Il a été trouvé que l'influence de la chaleur anthropique était plus importante la nuit et tôt le matin, et la différence maximale de 3,4°C a été obtenue à minuit. Dans la journée, l'effet de la chaleur anthropique est moins intense (environ 1°C de 9h00 à 16h00) à cause du fort rayonnement solaire. Plusieurs scénarii ont ensuite été modélisés, touchant soit au management des sources de chaleur ou à la modification des surfaces :

- Scénario E-1 : Evacuer toute la chaleur par le haut des immeubles,
- Scénario E-2 : Evacuer toute la chaleur par le bas des immeubles (dans les six premiers mètres),
- Scénario E-3, E-4 et E-5 : Modification des systèmes de climatisation ou d'air conditionné.
- Scénario E-6 : Rejeter toute la chaleur, issue des systèmes d'air conditionné notamment, des bâtiments au niveau du sol, c'est-à-dire dans les deux premiers mètres au-dessus de la surface du sol,
- Scénario S-1 : Une amélioration modérée de l'albédo⁷ (l'albédo des toits est fixé à 0,30 au lieu des 0,18 du cas normal, celui des routes à 0,25 au lieu de 0,18, et celui des autres surfaces construites à 0,25),
- Scénario S-2 : Une amélioration conséquente de l'albédo (l'albédo des toits est à 0,70, celui des routes et des autres surfaces construites à 0,30),

⁷ L'albédo d'une surface correspond au rapport de l'énergie solaire réfléchi par cette surface sur l'énergie solaire incidente. Il est compris entre 0 et 1. Les surfaces qui ont un faible albédo absorbent une part importante du rayonnement solaire incident et deviennent plus chaude que les surfaces ayant un fort albédo.

- Scénario S-3 : Mettre de la végétation sur le sol autour des bâtiments.

Tous les scénarii ont provoqué une diminution de la température sauf pour les scénarii E-2 et E-6 qui favorisent en fait l'échange de chaleur entre le sol et l'air. En général, les scénarii qui présentent une modification de la surface ont plus d'impact que ceux qui modifient uniquement l'énergie sauf bien sûr pour les cas extrêmes comme une totale absence de rejet de chaleur (impact positif) ou un rejet uniquement par le sol (impact négatif).

Baumüller *et al.* (2005) font une analyse très complète de la formation du climat urbain et de ses conséquences sur la dispersion des polluants. Ils proposent des cartes climatiques et de la qualité de l'air - pour la région de Stuttgart (Allemagne) par exemple - qui s'accompagnent de recommandations pour l'aménagement, en relation notamment avec la ventilation. Ce travail s'apparente à celui effectué par Scherer *et al.* (1999) présenté précédemment.

II.4 Rafraîchissement des villes : quelques exemples

Rosenfeld *et al.* (1995) font à l'origine de leur étude un constat : les températures élevées de l'îlot de chaleur urbain augmentent la demande en énergie pour la climatisation et accroissent le risque de smog⁸. Leurs propositions pour diminuer l'îlot de chaleur urbain et, par la même occasion la consommation énergétique, sont de planter des arbres en milieu urbain et d'éclaircir la couleur des surfaces. L'effet à l'échelle du bâtiment a été étudié par Rosenfeld *et al.* (1995), mais c'est celui à l'échelle de la ville qui nous intéresse le plus ici. L'effet microclimatique de la couleur est quelque chose qui peut s'observer. Dans leur cas des mesures de températures au milieu d'un monument clair d'albédo d'environ 0,6 (le White Sands National Monument au Nouveau-Mexique) et au sein du désert qui entoure la ville d'albédo 0,26 montre que, sauf durant la nuit, il peut faire jusqu'à 3,5 degrés plus chaud dans le désert. Pour observer l'effet d'une diminution de l'albédo sur une ville entière, en l'occurrence ici Los Angeles, Rosenfeld *et al.* (1995) ont utilisé le modèle d'échelle méso « *Colorado State University Mesoscale Model* » (CSUMM). La ville a été découpée en plusieurs cellules selon un maillage de 5x5km et des modifications d'albédo des toits plats ou inclinés et des routes ont été effectuées de façon à obtenir une augmentation moyenne de l'albédo pour chaque cellule de 0,13 (ce qui ne donne pas une ville blanche et aveuglante). Selon les conditions initiales choisies, le refroidissement le plus conséquent, qui arrive en début d'après-midi, est entre 2 et 4°C. Les arbres sont bénéfiques du fait de l'ombre qu'ils

⁸ Le smog est un brouillard dû à la pollution atmosphérique.

procurent et de leur évapotranspiration⁹. Rosenfeld *et al.* (1995) propose une forme de programme, pour permettre une diminution de l'albédo et une plantation plus conséquente d'arbres, qui comprend notamment : créer des procédures de tests pour les différents matériaux, des évaluations et des labels pour les matériaux « rafraichissants » ; créer une base de données sur les matériaux rafraichissants à destination des professionnels et des citoyens ; intégrer les toits rafraichissants dans des programmes plus globaux sur la consommation énergétique et la qualité de l'air ; adopter des standards ; proposer des réductions en cas d'achats de standards ; communiquer ; etc.

Santamouris *et al.* (2005) ont mené le projet URBACOOOL (Energy Efficient Cooling Systems and Techniques for Urban Buildings - Vers des stratégies efficaces urbaines pour le rafraîchissement). Ce projet, mené par plusieurs partenaires européens (Université d'Athènes, ARMINES le Centre Energétique de l'Ecole des Mines de Paris et l'Université de Séville) dans le cadre du Programme SAVE (Direction générale pour l'Energie et les Transports de la Commission européenne), a eu comme objectif général de déterminer des stratégies pour réduire l'impact de la demande croissante de climatisation dans l'Union Européenne. Cet objectif s'est accompagné d'une mise en relation entre cette demande et l'effet d'îlot thermique urbain, « *la conception efficace des bâtiments refroidis de manière « passive » (sans équipements) [exigeant] une bonne compréhension des caractéristiques du climat urbain, en particulier des distributions de la température et du vent* ». L'étude a ainsi réfléchi à différents aspects tels que :

- La réduction de l'effet d'îlot de chaleur et des sources anthropiques de chaleur (le rôle des matériaux, des rues et des trottoirs, des arbres et de la végétation, de l'eau et des puits de fraîcheur a été mis en avant) :
- La conception des bâtiments urbains et l'utilisation de nouveaux matériaux pour une meilleure adaptation à l'environnement urbain :
- Le choix des systèmes de climatisation centralisés (urbains) ou des systèmes semi-centralisés (au niveau du bâtiment) ou des appareils de climatisation (individuels).

⁹ L'évapotranspiration correspond à l'ensemble des phénomènes d'évaporation de l'eau du sol et des nappes liquides, et de transpiration des végétaux.

L'ensemble de ces aspects ont été rassemblés pour produire un ensemble de recommandations destinées aux acteurs (décideurs politiques, autorité d'aménagement urbain, compagnies d'électricité), aux niveaux local, national et européen.

Sailor et Dietsch (2005) ont développé un outil informatique pour assister les aménageurs, les urbanistes et les responsables de la qualité de l'air dans leur évaluation du potentiel des stratégies de diminution de l'îlot de chaleur urbain à agir sur le climat urbain, la qualité de l'air (ozone) et la consommation énergétique au sein de leurs villes. Les utilisateurs de cet outil peuvent sélectionner une ville parmi les deux cents répertoriées, uniquement aux Etats-Unis. Les stratégies comprennent des constructions et des matériaux de voirie à fort albédo et de la végétation urbaine. L'utilisateur peut tester plusieurs scénarii combinant ou non ces différentes stratégies ou spécifier une certaine diminution de température, l'outil lui proposant alors différents moyens d'actions. Cet outil, appelé « *mitigation impact screening tool* » (MIST), s'appuie sur une base de données concernant vingt villes, pour lesquelles une simulation numérique des différentes stratégies a été effectuée à l'aide du modèle MM5 du National Center for Atmospheric Research qui est un modèle atmosphérique d'échelle méso. Pour la relation avec les concentrations en ozone, une méthode statistique a été utilisée. La modélisation énergétique s'est appuyée sur les Cooling Degree Days (CDD), ou degrés.jours climatisation, et les Heating Degree Days (HDD), ou degrés.jours chauffage, tenant compte ainsi de l'énergie non consommée en été mais de l'usage supérieure en hiver. Les résultats pour les autres villes sont extrapolés à partir des modélisations sur ces vingt villes. Sailor et Dietsch (2005) précisent bien le degré important d'incertitude de leur outil et leur intention de donner uniquement un premier ordre de grandeur aux aménagements.

Alcoforado (2006) et Alcoforado *et al.* (2006) se sont intéressés aux procédures à mettre en œuvre et aux indications à donner pour améliorer la qualité climatique des villes et diminuer l'intensité de l'îlot de chaleur urbain. Leur travail s'est notamment appliqué à la ville de Lisbonne (Portugal). Ils soulignent l'importance de l'acquisition de données climatiques urbaines, de l'analyse des caractéristiques du climat urbain et de la sélection des stratégies adéquates pour l'aménagement, pour contribuer à la qualité du climat en ville. Pour Lisbonne, ils se sont penchés sur les problèmes d'ordre climatique suivant : l'îlot de chaleur urbain, le vent, et la pollution de l'air. Ils ont découpé Lisbonne selon des zones homogènes du point de vue de la conception urbaine et pour chacune de ces zones des préconisations pour diminuer l'îlot de chaleur, limiter la pollution urbaine et améliorer la qualité du vent ont été données.

Ces préconisations abordent à la fois l'orientation des rues, la hauteur des bâtiments, ou encore la présence d'espaces végétalisés.

Rosenzweig *et al.* (2006) se sont intéressés aux stratégies de diminutions de l'îlot de chaleur de New-York, ces stratégies comprenant les forêts urbaines¹⁰, les toits verts et les surfaces claires (tableau 1). Six quartiers d'études représentatifs des différentes typologies existants à New-York ont été choisis et décrits en fonction de leur pourcentage de pelouse, d'arbres, et de surfaces imperméables mais également en fonction de la part de toits imperméable (non verts), et la part de surface au sol imperméable, ainsi que la part de rue pouvant accueillir des arbres, ce qui permet d'estimer le potentiel de chaque quartier pour intégrer des moyens de diminuer l'îlot de chaleur urbain (tableau 2). Pour tester les effets de ces différents moyens, le modèle climatique régional Penn State/NCAR MM5 a été utilisé. La surface est décrite selon une grille de résolution de 1,3km en y intégrant des informations sur le pourcentage de pelouse, d'arbres, de surfaces imperméables et d'eau.

Tableau 1 : Stratégies de diminutions de l'îlot de chaleur (Rosenzweig *et al.*, 2006).

| Strategy | Mitigation Scenario |
|------------------------------|--|
| Urban Forestry | 1) Urban Forestry/Grass-to-Trees (open space planting) |
| | 2) Urban Forestry/Street-to-Trees (curbside planting) |
| | 3) Urban Forestry/Grass + Street-to-Trees (open space + curbside planting) |
| Light Surfaces | 4) Light Surfaces/Roof-to-High Albedo (light roofs) |
| | 5) Light Surfaces/Impervious-to-High Albedo (light surfaces) |
| Living Roofs | 6) Living Roofs/Roof-to-Grass |
| Ecological Infrastructure | 7) Urban Forestry/Grass + Street-to-Trees and Living Roofs |
| Urban Forestry + Light Roofs | 8) Urban Forestry/Grass + Street-to-Trees and Light Roofs |
| Combination of All | 9) 50% Open Space + 50% Curbside + 25% Living Roofs + 25% Light Roofs |

Tableau 2 : Pourcentages pour chaque type de surface et potentiel pour intégrer des moyens de diminuer l'îlot de chaleur urbain (Rosenzweig *et al.*, 2006).

| Case Study Area | Grass (%) | Trees (%) | Impervious (%) | At-Grade Impervious (%) | Impervious Roofs (%) | Est. Avail. for Street Trees (%) |
|----------------------|-----------|-----------|----------------|-------------------------|----------------------|----------------------------------|
| New York City | 14.1 | 21.9 | 64.1 | 45.9 | 18.1 | 17.0 |
| Mid-Manhattan West | 2.6 | 3.1 | 94.3 | 49.3 | 45.0 | 26.1 |
| Lower Manhattan East | 8.3 | 8.1 | 83.6 | 48.2 | 35.4 | 29.4 |
| Fordham Bronx | 9.2 | 22.1 | 68.7 | 47.1 | 21.5 | 21.1 |
| Maspeth Queens | 17.5 | 22.3 | 60.2 | 38.2 | 22.0 | 17.9 |
| Crown Heights | 8.1 | 17.2 | 74.7 | 45.6 | 29.1 | 24.9 |
| Ocean Parkway | 5.5 | 14.8 | 79.6 | 50.8 | 28.9 | 23.2 |

Ces modélisations, dont les résultats sont présentés dans le tableau 3, montrent que la végétation refroidit les surfaces de façon plus efficace qu'une augmentation de l'albédo. L'atténuation la plus efficace par unité de surface réaménagée est la plantation sur les trottoirs.

¹⁰ La forêt urbaine est un concept récent et, pour reprendre les termes de Guillauc (2008), est une « *'forêt logée en ville', en tant qu'entité naturelle, bien sûr, mais aussi et surtout en tant que concept plastique [...]* ». Ces forêts peuvent être des vestiges préservées de la forêt naturelle, des boisements anciens présents avant l'accroissement (exemple : Bois de Boulogne), des boisements plantés ou artificiellement créés, etc.

Cependant, les plus importantes réductions de température absolue se font avec les surfaces claires parce que 64% de la surface de NY peut être passée de surfaces foncées et imperméables à des surfaces claires à albédo élevé. Les toits verts refroidissent mieux par unité de surface que les surfaces claires mais moins que les plantations sur trottoirs. Ils pourraient être la meilleure option dans les banlieues où les opportunités de réaménagement au niveau des rues sont limitées; cependant selon la hauteur du bâtiment, ces toitures végétalisées peuvent avoir un impact positif sur la demande en énergie inférieur à celui lié à la plantation d'arbres qui procurent de l'ombre sur les cotés des bâtiments.

Tableau 3 : Réduction de la température près du sol (en °F) pour différents scénarii de réduction de l'îlot de chaleur urbain, en moyenne durant la journée et à 3h00 (Rosenzweig *et al.*, 2006).

| Average reduction over all times of day | Open Space Planting (°F) | Curbside Planting (°F) | Living Roofs (°F) | Light Roofs (°F) | Light Surfaces (°F) | Ecological Infrastructure (°F) | Urban Forestry + Light Roofs (°F) |
|---|--------------------------|------------------------|-------------------|------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| New York City | -0.1 | -0.6 | -0.4 | -0.4 | -1.3 | -1.3 | -1.2 |
| Mid-Manhattan West | 0.0 | -0.9 | -1.1 | -0.8 | -1.7 | -1.9 | -1.7 |
| Lower Manhattan East | -0.1 | -1.0 | -0.9 | -0.7 | -1.6 | -1.7 | -1.6 |
| Fordham Bronx | -0.1 | -0.7 | -0.5 | -0.4 | -1.3 | -1.6 | -1.5 |
| Maspeth Queens | -0.2 | -0.6 | -0.5 | -0.4 | -1.1 | -1.3 | -1.2 |
| Crown Heights Brooklyn | -0.1 | -0.9 | -0.7 | -0.6 | -1.4 | -1.8 | -1.6 |
| Ocean Parkway Brooklyn | -0.1 | -0.8 | -0.7 | -0.6 | -1.5 | -1.4 | -1.3 |
| Average 3 PM Reduction | | | | | | | |
| New York City | -0.3 | -1.0 | -0.8 | -0.6 | -2.2 | -1.8 | -1.6 |
| Mid-Manhattan West | 0.0 | -1.5 | -1.8 | -1.4 | -2.9 | -2.6 | -2.3 |
| Lower Manhattan East | -0.2 | -1.8 | -1.5 | -1.2 | -2.8 | -2.5 | -2.4 |
| Fordham Bronx | -0.2 | -1.2 | -0.8 | -0.7 | -2.1 | -1.9 | -1.8 |
| Maspeth Queens | -0.3 | -1.1 | -0.9 | -0.7 | -2.0 | -1.8 | -1.7 |
| Crown Heights Brooklyn | -0.2 | -1.5 | -1.2 | -1.0 | -2.5 | -2.4 | -2.2 |
| Ocean Parkway Brooklyn | -0.1 | -1.5 | -1.3 | -1.0 | -2.8 | -2.1 | -2.0 |

II.5 La ville « idéale »

Ces différentes études sur la relation entre le climat urbain et l'aménagement et l'architecture ou sur le rafraîchissement des villes, qui ne sont que l'illustration de toutes celles pouvant exister sur le sujet, accompagnent également la réflexion sur la ville « idéale ».

Landsberg (1973) aborde la question de la ville « météorologiquement » utopique et liste un ensemble de règles à suivre telles que la non-urbanisation des zones inondables, la présence d'un maximum de surfaces couvertes de végétaux, la préservation des arbres, la réduction de l'utilisation de la voiture, la création de parkings en sous-sol et non en surface, la réutilisation de la chaleur, la prise en compte de la ventilation et des problèmes de pollution atmosphérique, etc.

Yannas (2001), sous le titre « *toward more sustainable cities* », regarde plus particulièrement les paramètres affectant le microclimat urbain et l'intérêt que cette question peut avoir pour les domaines de l'aménagement urbain et du confort thermique, tant extérieur qu'intérieur. Après une présentation synthétique des principaux facteurs et processus à l'origine du microclimat urbain, Yannas (2001) identifie les aspects clés maîtrisables par les architectes et urbanistes (forme du bâtiment, géométrie des rues, constitution des bâtiments, matériaux urbains, et finitions des surfaces, réduction du trafic, utilisation d'énergies renouvelables). Plusieurs cas pratiques concernant Londres (Grande-Bretagne), Dhaka (Bangladesh) et Athènes (Grèce) viennent illustrer ses propos. L'étude sur Londres montre combien les effets microclimatiques peuvent être localisés, et met en avant la relation spatiale et temporelle avec la géométrie et la texture (densités, présence ou non de végétation et d'eau) du tissu urbain. Les études sur Dhaka montrent pour leur part qu'il est possible de mettre en place une forme de guide répertoriant selon la géométrie de la rue une liste d'interventions de petite échelle permettant d'améliorer le microclimat urbain (végétation, eau, etc.). Selon la géométrie urbaine, plusieurs idées d'action peuvent alors être choisies. Le projet sur Athènes souligne en ce qui le concerne l'amplitude des solutions qu'il est possible de mettre en œuvre pour améliorer la situation d'un quartier, et ce plus particulièrement quand le tissu urbain et les bâtiments sont dégradés. On notera que pour ces trois situations l'analyse et les actions se situent à l'échelle du quartier et non de la ville elle-même et que c'est par conséquent la répétition de ces différentes actions au sein des villes qui pourra mener à des « *sustainable cities* ».

Bitan (1992) part du constat que dans le futur, la majorité de la population mondiale va vivre dans des zones urbaines et que, par conséquent, vont s'y concentrer la majorité des activités économiques. Cette situation va mener à des problèmes environnementaux et climatiques importants si les urbanistes et architectes ne développent pas de nouvelles stratégies d'aménagement urbain et de nouvelles méthodes de conception architecturale permettant de poursuivre la croissance des villes tout en conservant un bon environnement climatique pour les populations qui y vivent et y travaillent. En plus des questions d'inconfort que peut créer une mauvaise prise en compte des conditions climatiques, Bitan (1992) aborde également les conséquences en terme de consommation énergétique pour le chauffage, la climatisation ou encore la lumière. Une planification urbaine en accord avec le climat débute ainsi selon lui sur le choix de la localisation de la ville (dans le cas de nouvelles villes) et inclut la forme générale de la ville (à travers la planification de l'utilisation des sols, la localisation des routes

principales, la planification climatique des zones résidentiels et des centres commerciaux, l'amélioration du climat urbain lors de la planification d'espaces urbains) et une architecture des bâtiments individuels tenant compte des règles climatiques. Pour permettre les meilleurs résultats en aménagement urbain et en bâtiment, il est également nécessaire de tenir compte du plus grand nombre possible de critères climatiques dont les plus importants sont : le vent, la température, le rayonnement solaire, l'humidité et les précipitations. Bitan (1992) souligne le rôle joué par les scientifiques, les architectes, les urbanistes et les climatologues pour améliorer le climat urbain et l'environnement urbain. Certains se sont concentrés sur les aspects théoriques comme pratiques de la climatologie urbaine, ce qui inclut les études sur l'importance de la couverture du sol (arbres, végétation, etc.) pour améliorer à la fois la qualité de l'air et climatique. D'autres ont participé à des projets spécifiques en tant qu'urbanistes, architectes ou consultants en climatologie appliquée. Il existe très peu d'études sur la conception d'une ville et ce dès le choix de son implantation jusqu'aux caractéristiques de ses bâtiments. Bitan (1992) cite le cas d'une ville israélienne dont l'implantation fut réfléchie avant la conception, ou encore le cas de la ville de Stuttgart (Allemagne) connue pour son attention aux questions climatiques. Un des points largement abordé par Bitan (1992) est la question de la production d'électricité qui peut être fortement polluante. Il propose alors comme source alternative d'énergie l'eau, le rayonnement solaire et le vent. Loin d'être utopique selon lui, une ville conçue ainsi est possible.

Golany (1996), dans son article, part du principe que si les spécialistes en climatologie nous pourvoient en grand nombre de données sur le climat urbain, c'est aux professionnels de la ville et non aux spécialistes en climatologie d'appliquer et de traduire ces données en outil d'aménagement. Son article aborde ainsi la relation entre la morphologie urbaine¹¹ et les performances thermiques de la ville. Pour Golany (1996), chaque région climatique nécessite une forme et une configuration urbaine distincte contribuant à la fraîcheur ou chaleur nécessaire du milieu. Ce sont les urbanistes et architectes qui sont responsables de cette mise en pratique, de cette conception des formes adéquates. Tout comme Bitan (1992), Golany (1996) note l'importance du choix du site d'implantation de la ville et ses conséquences sur les performances thermiques de la ville, son économie, son confort, la consommation énergétique et la santé de ses habitants, et la stabilité communautaire. L'altitude, la température du vent, le refroidissement par évaporation, la ventilation urbaine, la pente, la

¹¹ La morphologie urbaine est la répartition spatiale des bâtiments, leur élévation, la forme et l'orientation du réseau de rues.

brise marine, les risques d'inondation, l'orientation, ou encore la forme et la consistance du sol, tout ces aspects ont leur importance dans le choix de l'implantation, et ce avec plus ou moins d'importance selon la région climatique. Cette dernière influence également le choix entre une ville de forme compacte (climat rude, c'est-à-dire froid sec ou chaud sec), dispersée ou encore en grappe (climat rude, c'est-à-dire froid sec ou chaud sec). Orientation et largeur des rues, végétation, évapotranspiration, espaces ouverts et fermés, etc., Golany (1996) reconnaît l'influence sur la qualité climatique et de vie de nombreux aspects, et propose une synthèse, sous forme de tableau, sur les profils climatiques des principaux climats du monde, les problèmes climatiques associés et les réponses architecturales ou urbaines conseillées (tableau en annexe 5).

Dans une présentation intitulée « *The meteorologically utopian city revisited* » en référence à l'article de Landsberg (1973), Mills (2003) s'interroge sur la conception de la ville durable du point de vue de la météorologie et de la climatologie. Beaucoup de propositions tournent selon lui autour d'éléments de l'aménagement tels que la rue, les matériaux de construction ou le bâtiment. Toutefois, les conflits pouvant apparaître entre les solutions pour ces différents éléments sont peu pris en considération malgré les relations physiques ou relationnelles existant entre ces derniers. Ainsi, alors que la forme de l'aménagement limite les « degrés de liberté » disponibles pour la conception de bâtiments « idéaux », la réalisation, l'accomplissement des objectifs d'un aménagement de grande envergure dépendra en partie de la somme des effets des bâtiments individuels. Il y a peu de travaux selon Mills (2003) qui estiment les conséquences de choix constructifs et ce à différentes échelles : Est-ce que le bâtiment idéal est compatible avec la ville idéale ? Contrairement aux architectes, dont l'intérêt pour la construction bioclimatique est ancien, les urbanistes s'appuient peu sur des principes climatiques et jusqu'à très récemment, l'accent a été peu mis sur l'espace entre les bâtiments, si l'on excepte les cas où ce dernier influençait l'habitation. Ainsi selon Mills (2003), la nouvelle utopie urbaine est la ville 'durable', 'soutenable', dont la conception intègre la qualité de l'air et la consommation énergétique, ainsi qu'une panoplie d'objectifs environnementaux et sociaux, culturels et économiques. La ville durable est décrite comme une ville à forte densité avec une forme compacte, permettant un accès facile aux services et une réduction des ressources environnementales. Cependant, les fortes densités ont également des effets sur la circulation de l'air et sur la dispersion des polluants au niveau du sol. Il est concevable qu'une ville compacte réduise certes les émissions de polluants mais elle augmente en parallèle l'exposition des citoyens aux polluants. Dans son article, Mills (2003)

tente d'évaluer les conflits créés par différentes solutions d'aménagements proposées pour mener à une ville idéale du point de vue météorologique. Il distingue ainsi trois échelles de conception – le bâtiment, le groupe de bâtiment (ou quartier) et l'échelle de l'implantation urbaine – et pour chacune de ces échelles, des objectifs généraux sont assignés (tableau 4). Il existe des outils, ou des éléments clés, de conception disponibles pour chacune de ces échelles permettant de répondre aux objectifs. Cependant, des limites existent quant au choix de ces outils et les décisions prises pour une certaine échelle ont un impact sur les autres échelles.

Tableau 4 : Résumé des outils (diagonale en gris) utilisés aux échelles du bâtiment, du groupe de bâtiment, de l'implantation urbaine, pour répondre aux objectifs climatiques à ces échelles (Mills, 2003).

L'application de ces outils à chaque échelle a un impact climatique sur les autres échelles (sous la diagonale) et crée des limites pour les décisions prises aux autres échelles (au-dessus de la diagonale).

| Objectif | Impacts | Limites | | |
|--|-----------------------------|---|---|--|
| | | Bâtiments | Groupes de bâtiments | Implantation |
| Confort intérieur | Bâtiments | Localisation Matériaux Design (e.g. forme, orientation, etc.) | Accès à la lumière, à l'énergie solaire, au vent Qualité de l'air | Codes du bâtiment |
| Confort extérieur Santé en extérieur | Groupes de bâtiments | Changement climatique local : Emissions Matériaux/surfaces Dimensions du bâtiment – interférence des flux et zones d'ombre | Emplacement des bâtiments Aménagement, paysage, matériaux et surfaces extérieurs Dimensions et orientation des rues | Guides sur les densités, les hauteurs, les usages, les espaces végétalisés |
| Utilisation de l'énergie Qualité de l'air Protection contre les extrêmes | Implantation | Efficacité énergétique Qualité de l'air Effet du climat urbain | Mode et intensité des flux du trafic Efficacité énergétique Qualité de l'air Effet du climat urbain | Zonage Etendue et forme globales Politique des transports |

Lors d'une table ronde organisée lors du colloque « Fabriquer la ville durable au croisement de la recherche et de l'action » (22 et 23 juin 2005, Ecole Doctorale Ville et Environnement), Alain Maugard, président du C.S.T.B., souligne également la difficulté à satisfaire le développement durable et l'efficacité énergétique à toutes les échelles. Il « *estime ainsi que pour tenir compte des différentes échelles, il vaut mieux partir du plus petit pour arriver au plus grand* », soulignant qu'à l'échelle de la ville « *il existe encore un manque d'expertise et de recherche* ».

Il est aujourd'hui possible de citer quelques projets ayant mis en œuvre à l'échelle locale des techniques permettant l'amélioration climatique de l'espace aménagé. Santamouris (2005) cite ainsi le cas de l'Exposition Universelle de 1992 qui a eu lieu à Séville (Espagne) et pour laquelle fut utilisé divers végétaux, des pergolas, etc. pour procurer de l'ombre et de la fraîcheur, des fontaines, des piscines, des étangs, des vaporisateurs, pour diminuer la température par le biais de l'évaporation, et d'autres techniques encore, qui permirent de diminuer la température de l'air ambiant de 5°C. Santamouris (2005) cite également le cas de l'Exposition Universelle de 1998 qui a eu lieu à Lisbonne (Portugal) pour laquelle une étude des flux d'air fut réalisée, permettant ainsi d'optimiser la circulation de l'air. Plantes, pergolas, piscines, fontaines, étangs furent aussi employés. Ces techniques permirent de diminuer la température de l'air ambiant de 3-4°C sur le site de l'Exposition Universelle. Le cas du village olympique de 2004 à Athènes (Grèce) est également cité par Santamouris (2005) et les techniques, identiques à celles utilisées pour Lisbonne, permirent une réduction des températures de 4°C au sein du village.

II.6 Conclusion

De l'observation du climat urbain 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 matériaux de construction.

La climatologie urbaine est aujourd'hui un domaine de recherche investi à la fois par les climatologues et les géographes, mais également par les architectes et les urbanistes. Ceci permet de mettre en place une démarche pluridisciplinaire et d'intégrer à la pratique de l'aménagement urbain et de l'architecture des éléments de climatologie urbaine. Climatologues, géographes et aussi urbanistes et architectes réfléchissent ainsi ensemble ou parallèlement à l'intérêt de prendre en compte le climat urbain dans l'aménagement, l'urbanisme et l'architecture. De nombreuses études abordent la relation entre le climat, l'aménagement et l'architecture avec leurs particularités liées notamment à la ville étudiée et donc à la culture architecturale déjà présente, mais également avec des volontés communes. Plusieurs études ont ainsi cartographiées les situations climatiques de certaines villes pour y associer des conseils concernant les aménagements envisageables ou à envisager. D'autres se

sont focalisées sur des listes de règles à suivre pour obtenir des aménagements en harmonie avec leur climat et leur environnement. D'autres encore ont analysées l'influence sur le climat urbain de choix concernant, par exemple, les rejets anthropiques de chaleur.

Cette réflexion peut s'accompagner dans certaines études d'une volonté de réduire l'impact des villes sur la température et de les rafraîchir. Modifications de l'orientation des rues, végétalisation des espaces, modifications des albédos des matériaux, etc. sont des solutions que plusieurs chercheurs modélisent pour en connaître l'efficacité.

Toutes ces études ont amené plusieurs chercheurs à se poser la question de la ville « idéale », chacun ayant alors sa propre opinion, sa propre réponse, et donc ses propres conseils pour atteindre des conditions climatiques agréables ou tout du moins plus agréables.

Le climat urbain et sa prise en compte au sein de l'aménagement urbain est un sujet récent encore loin d'être entièrement exploré. 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 influence 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.

A cela s'ajoute un manque de réflexion autour des moyens aujourd'hui mobilisables par les collectivités qui seraient préoccupées, intéressées par ce climat urbain, et souhaiteraient en tenir compte. Les conseils existent, mais la façon concrète de les intégrer aux procédures existantes fait aujourd'hui défaut.

Les chapitres qui suivent vont aborder plus concrètement et physiquement les phénomènes climatiques générés par la ville et le rôle de différents facteurs. Ils serviront d'appui à la compréhension de la formation du climat urbain mais nous permettront également de proposer dans la troisième partie des domaines d'actions en correspondance avec la manière dont se conçoivent et se gèrent les milieux urbains.

III Préambule à l'explication des phénomènes physiques à l'origine de la formation du climat urbain

L'introduction et le chapitre précédent ont précisé le contexte de cette étude et permit d'analyser la pertinence de la question de l'introduction d'enjeux du climat urbain lors d'interventions sur un tissu urbain. Ils ont également introduit la problématique, les objectifs de cette thèse et les études ayant traité des questions similaires.

Les chapitres qui vont suivre ont pour objectif d'expliquer les phénomènes physiques à l'origine de la formation du climat urbain et de présenter l'influence de certains facteurs dans la formation du climat urbain.

Nous allons décrire l'influence des rues et des bâtiments sur les écoulements de l'air, les échanges radiatifs, thermiques et énergétiques, et les phénomènes d'évapotranspiration. Ces influences, d'échelle microclimatique (figure 2), engendrent des modifications à l'échelle de la ville, qui s'expriment au travers des bilans radiatif, énergétique et hydrique de cette dernière mais également au niveau des circulations atmosphériques.

Avant d'aborder la présentation des mécanismes physiques à l'échelle de la rue, il est nécessaire de préciser les différentes échelles d'analyse utilisées en climatologie urbaine.

Les influences de la ville ne s'observent pas sur l'ensemble de l'atmosphère mais au sein de la couche limite planétaire (PBL - *Planetary Boundary Layer*)¹².

La troposphère¹³, partie de l'atmosphère la plus proche de la terre, peut être divisée en deux parties : la couche limite planétaire, ou couche limite atmosphérique, qui s'étend du sol jusqu'à une altitude entre 100 et 3 000 mètres, et au-dessus l'atmosphère libre. Selon Météo-France : La couche limite planétaire est « *La plus notable des couches limites qui se*

¹² « *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 entraîne 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)

¹³ Au-dessus de la troposphère se trouve la stratosphère. La limite entre les deux, qui s'appelle la tropopause correspond au moment où l'évolution des températures en fonction de l'altitude est modifiée. La température de l'atmosphère diminue avec l'altitude à partir du sol jusqu'à la tropopause, c'est-à-dire au sein de la troposphère, puis augmente par la suite à cause de l'absorption des rayons ultraviolets par l'ozone présent dans la stratosphère.

constituent au contact de l'atmosphère avec le sol ou l'eau couvrant la surface de la Terre provient de l'apparition et de l'influence de forces de frottement horizontales : celles-ci, en s'opposant au mouvement de l'air [...], modifient fortement les déplacements horizontaux et verticaux et les échanges de matière et d'énergie à l'intérieur d'une couche limite planétaire (encore dite couche limite de frottement) dont l'épaisseur, assez variable suivant la nature de la surface sous-jacente, reste de l'ordre de 1 500 mètres ». Plus précis, Menut (1997) signale que « son extension verticale va de la surface à quelques centaines de mètres d'altitude et dépend directement de tous les paramètres météorologiques (vent, température, humidité, insolation¹⁴), mais aussi de la topographie et du type d'environnement (océan, continental rural ou urbain) ».

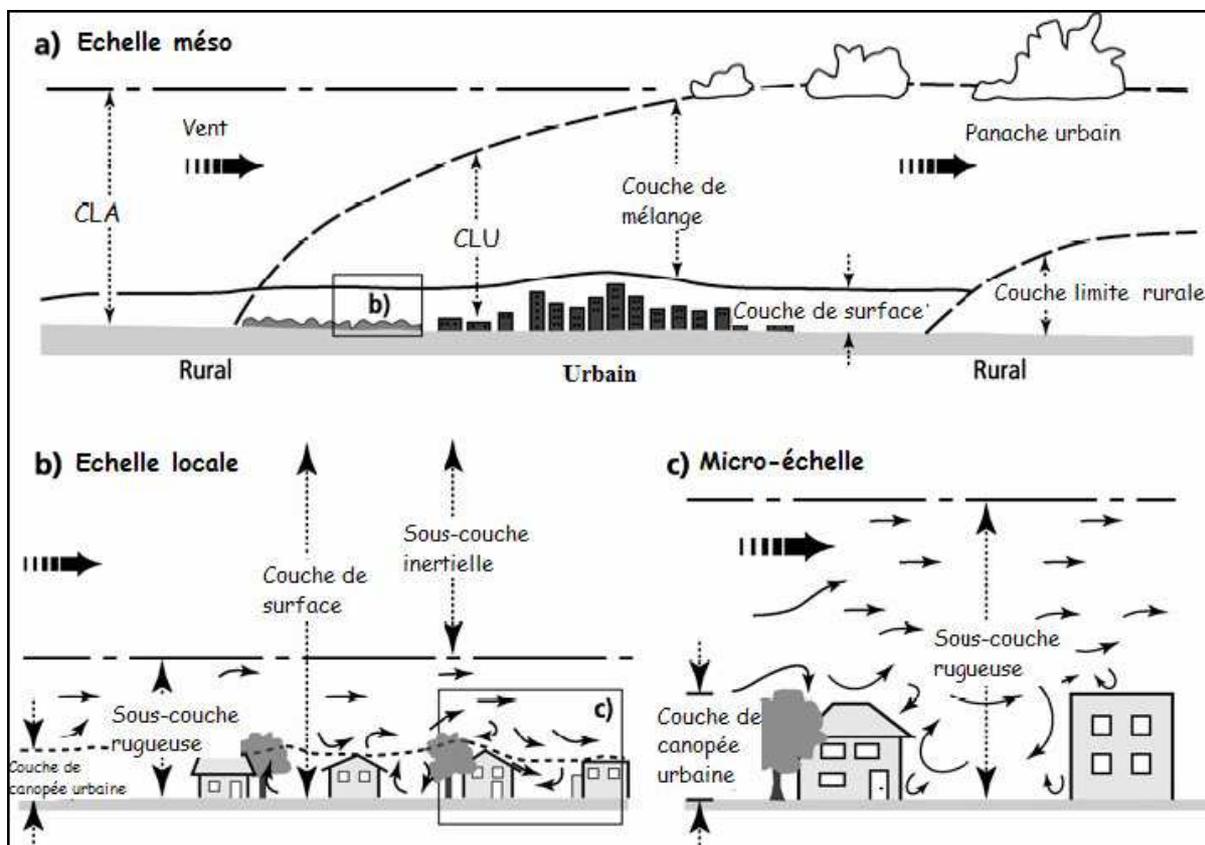


Figure 2 : Représentation schématique de la couche limite urbaine (CLU) à méso-échelle (a), à l'échelle locale (b) et à micro-échelle (c) (Leroyer (2006), d'après Oke (1987)).

La couche limite planétaire est ainsi directement influencée par la surface de la Terre et selon Escourrou (1981), « la température en altitude est plus chaude au-dessus de la ville. La couche limite où disparaît l'influence est plus élevée dans la ville où l'air est chaud, donc

¹⁴ L'insolation correspond à l'action des rayons du soleil qui frappent un objet. En météorologie, ce terme est synonyme d'ensoleillement, c'est-à-dire du temps pendant lequel un lieu est ensoleillé.

dilaté, qu'à la campagne. Sa hauteur varie ainsi [de] 270 mètres en moyenne pour la campagne [à] 400 mètres pour les petites villes et les banlieues [et] 420 mètres pour le centre de l'agglomération. »

La couche limite urbaine (UBL – *Urban Boundary Layer*) se distingue de la couche limite de la planète par sa complexité due à des caractéristiques et processus particuliers¹⁵. 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(a)) : la sous-couche rugueuse, la sous couche inertielle et la couche de mélange (figure 2).

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 (UCL – *Urban Canopy Layer*) 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 l'UCL (Piringer et Joffre, 2005).

La sous-couche de rugosité (RS – *Roughness Sub-layer*), 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 RS 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).

¹⁵ On notera, concernant la hauteur de la couche limite urbaine, que selon Ringenbach (2004) : « *L'îlot de chaleur urbain présente également une extension verticale. Pendant le jour, il peut s'étendre de 600 à 1500 mètres au-dessus de la ville, en raison de l'importance de la convection. La nuit en revanche, l'épaisseur de cette couche dépasse rarement 300 mètres en raison d'une stabilité plus importante. »*

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 latente¹⁶ et sensible¹⁷ 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 l'UBL 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 condensation¹⁸ 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).

Ces différents points vont être expliqués dans les trois chapitres suivants.

¹⁶ 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.

¹⁷ 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.

¹⁸ 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).

IV Phénomènes engendrés à l'échelle de la rue

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.

IV.1 Impacts sur les écoulements de l'air

Un bâtiment, et qui plus est un ensemble de bâtiments, constitue un obstacle à l'écoulement des masses d'air. L'aspect aérodynamique a été très étudié par le centre de Nantes du C.S.T.B. à l'aide de la soufflerie à couche limite turbulente ; Sacré (1983) explique que : *« l'écoulement de l'air au niveau du sol, dans un site urbain est le résultat d'interactions complexes entre le vent et les bâtiments. La forme et la disposition de ceux-ci modifient l'écoulement incident en générant des régions à pression statique différente, autour des obstacles. Les gradients locaux de pression induisent alors des écoulements secondaires qui se manifestent par des zones de survitesse ou l'existence de rotors et de tourbillons. »*

Plusieurs effets du cadre bâti peuvent être distingués (effet de barre, effet de canalisation, effet Venturi, etc.) dont une liste non exhaustive est présentée en annexe 6.

Plusieurs études ont mis en avant l'influence de la direction du vent sur la turbulence et la perte de vitesse (Nakamura et Oke, 1988. Rotach, 1995).

Nakamura et Oke (1988) ont ainsi étudié la distribution spatiale des températures de l'air et de surface au sein d'un canyon ainsi que les directions et vitesses du vent. Les résultats concernant le premier point sont présentés dans le paragraphe sur les impacts thermiques. La vitesse horizontale du vent a été mesurée au-dessus des toits et à l'intérieur du canyon (figure 10). Nakamura et Oke (1988) ont conclu de cette étude les aspects suivants :

- Les directions à l'intérieur et au-dessus du canyon sont liées. Avec un flux au-dessus du canyon perpendiculaire à l'axe du canyon, alors le flux près du sol du canyon est de direction opposée. Quand le flux au-dessus du canyon est parallèle à l'axe du canyon, alors la direction du vent au sein du canyon est identique. Pour les angles intermédiaires, une première approximation selon Nakamura et Oke (1988) est de considérer qu'une simple réflexion a lieu.

- Les vitesses du vent à l'intérieur et au-dessus du canyon présentent une relation linéaire. Une diminution d'un facteur d'environ 2/3 de la vitesse à l'intérieur du canyon par rapport à la vitesse au-dessus semble être caractéristique des canyons ayant des dimensions similaires à celui de l'étude de Nakamura et Oke (1988) (hauteur des bâtiments d'environ 17m et largeur de la rue de 16,1m).

IV.2 Modification de l'évapotranspiration

La modification de l'évapotranspiration en milieu urbain est liée à la fois à une diminution de la présence de végétaux par rapport aux milieux ruraux, et à une imperméabilisation du sol.

L'imperméabilisation du sol urbain, due à la minéralisation de l'espace et à l'évacuation immédiate des eaux de pluies par les réseaux, diminue l'évaporation du fait d'une moindre quantité d'eau à évaporer. Or toute évaporation implique une absorption de chaleur – l'évaporation d'un litre d'eau exige environ 580 kilocalories¹⁹, c'est-à-dire environ 2 500 joules, c'est-à-dire autant que pour élever de 1°C la température de 580 litres d'eau (Cantat, 1993) – qui sera donc moindre en milieu très urbanisé qu'en milieu rural.

A cette imperméabilisation s'ajoute également la faible présence de végétation et donc une diminution des phénomènes d'évapotranspiration dus aux végétaux.

Il a été estimé que pour une averse estivale fournissant 5 mm d'eau par m², dans les 24 heures suivantes, 4 mm s'évapore en milieu rural et seulement 0,5 mm en milieu urbain. La différence de quantité de chaleur empruntée à l'environnement par m² correspond à 21 10⁵ calories (Dettwiller, 1978) (soit 88 10⁵ joules), soit une forme d'apport supplémentaire d'énergie en milieu urbain de 2,5 kWh.m⁻² en 24h (un peu plus du double de l'énergie thermique résultant en été des activités humaines) (Dettwiller, 1978).

Cette diminution des phénomènes d'évapotranspiration explique l'humidité relative²⁰ inférieure en zone urbaine. Seuls les rejets de vapeur d'eau par les usines et la circulation automobile freinent l'assèchement des milieux urbains (Cantat, 1987).

¹⁹ La définition générale de la calorie c'est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température de 1 gramme d'eau de 14,5°C à 15,5°C sous pression atmosphérique normale. Avec cette définition, une calorie équivaut à 4,1855 Joules.

²⁰ L'humidité relative de l'air (ou degré d'hygrométrie) correspond au rapport de la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air, P_{vap}, sur la pression de vapeur saturante ou tension de vapeur à la même température P_{sat}.

Kondoh et Nishima (2000) ont également étudié les évolutions hydrologiques liées à l'urbanisation croissante dans un quartier de la banlieue de Tokyo (Japon) et montré ainsi qu'en 23 ans (entre 1972 et 1995), l'évapotranspiration avait diminué de 38%, pour un passage de 22,1% d'espaces urbanisés (zones urbaines et résidentielles) à 37,1%.

IV.3 Apports anthropiques de chaleur

Les rejets de chaleur d'origine anthropique (chauffage, transport, activité industrielle, et également métabolisme humain) sont beaucoup plus importants en milieu urbain du fait de la concentration des activités et des habitations. Ces rejets peuvent, selon la saison et l'heure de la journée, contribuer de façon conséquente au bilan énergétique que nous présentons dans le chapitre suivant et affecter l'environnement thermique urbain de 2-3°C (Taha, 1997a).

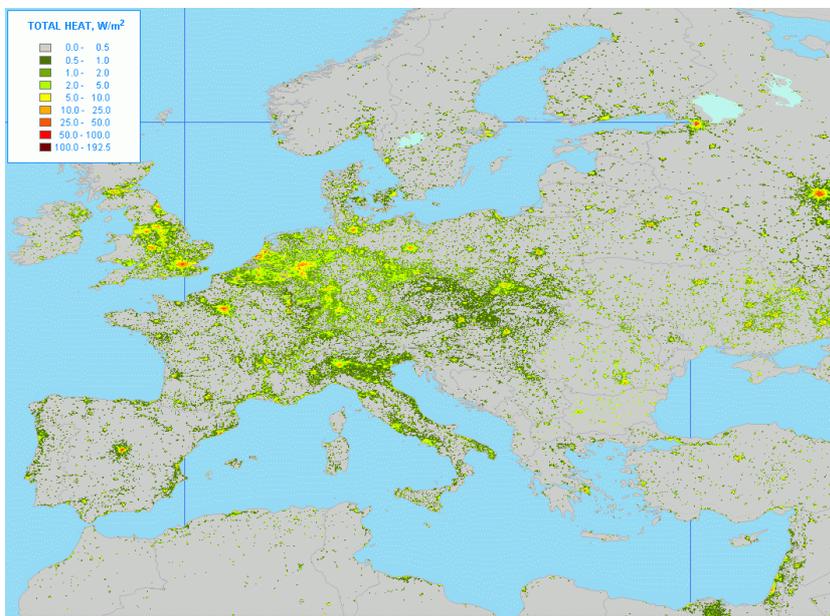


Figure 3 : Cartographie européenne des rejets de chaleur d'origine anthropique (Chirkov, 2003).

L'impact potentiel du flux de chaleur anthropique sur le climat a été étudié par Crutzen (2004). Il montre que l'ensemble de l'énergie rejetée au sein de l'atmosphère par l'homme ($0,025 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ en moyenne par sur la surface terrestre entière) reste faible comparé au $235 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ reçu en moyenne du soleil par la Terre et son atmosphère. Seulement, les rejets de chaleur anthropique sont concentrés sur une faible part de la surface terrestre et plus particulièrement au sein des zones urbaines. L'impact potentiel de ces flux de chaleur anthropique sur le climat local peut alors être important, avec des valeurs moyennes typiques de 20-70 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$. A partir de données sur les consommations énergétiques de l'Agence internationale de l'énergie, des chiffres sur la population, et des données sur la lumière nocturne, Chirkov (2003) en a déduit

des cartographies des rejets de chaleur d'origine anthropique (figure 3). La cartographie européenne des rejets de chaleur d'origine anthropique fait ressortir les espaces urbanisés tels que la dorsale économique et démographique de l'Europe occidentale, la « banane bleue », qui va du sud de l'Angleterre au nord de l'Italie.

Pour Paris intra-muros, Dettwiller (1978) a estimé que l'énergie thermique moyenne dissipée était de $7-8 \text{ W.m}^{-2}$ en 1880 et de 60 W.m^{-2} en 1977 (40 à 45 W.m^{-2} pour un mois d'été, $80-85 \text{ W.m}^{-2}$ pour un mois d'hiver). L'énergie thermique dissipée par jour était en été d'environ 1 kWh.m^{-2} , soit à peu près 20% de l'énergie reçue du soleil à cette saison ($G = 5,1 \text{ kWh.m}^{-2}$) ; en hiver d'environ 2 kWh.m^{-2} , soit le double de l'énergie reçue du soleil à cette saison ($G = 1 \text{ kWh.m}^{-2}$). Ces chiffres, malgré leur ancienneté, permettent d'avoir un premier aperçu de l'importance que peuvent avoir les rejets de chaleur d'origine anthropique.

Tableau 5 : Chaleur anthropique (QF) et rayonnement net toutes longueurs d'onde comprises (Q*) dans plusieurs villes dans plusieurs villes du Monde (D'après Oke (1978)).

| Zones urbaines | date | période | Population (*10 ⁶) | Densité (ha/km ²) | Consommation d'énergie (MJ * 10 ³) | Q _F (W/m ²) | Q* (W/m ²) |
|----------------------------|-----------|---------|--------------------------------|-------------------------------|--|------------------------------------|------------------------|
| Manhattan (40°N) | 1967 | Année | 1,7 | 28 810 | 128 | 117 | 93 |
| | | Eté | | | | 40 | |
| | | Hiver | | | | 198 | |
| Montréal (45°N) | 1961 | Année | 1,1 | 14 102 | 221 | 99 | 52 |
| | | Eté | | | | 57 | 92 |
| | | Hiver | | | | 153 | 13 |
| Budapest (47°N) | 1970 | Année | 1,3 | 11 500 | 118 | 43 | 46 |
| | | Eté | | | | 32 | 100 |
| | | Hiver | | | | 51 | -8 |
| Sheffield (53°N) | 1952 | Année | 0,5 | 10 420 | 58 | 19 | 56 |
| Berlin ouest (52°N) | 1967 | Année | 2,3 | 9 830 | 67 | 21 | 57 |
| Vancouver (49°N) | 1970 | Année | 0,6 | 5 360 | 112 | 19 | 57 |
| | | Eté | | | | 15 | 107 |
| | | Hiver | | | | 23 | 6 |
| Hong Kong (22°N) | 1971 | Année | 3,9 | 3 730 | 34 | 4 | ≈110 |
| Singapore (1°N) | 1972 | Année | 2,1 | 3 700 | 25 | 3 | ≈110 |
| Los Angeles (34°N) | 1965 - 70 | Année | 7,0 | 2 000 | 331 | 21 | 108 |
| Fairbanks (64°N) | 1965 - 70 | Année | 0,03 | 800 | 740 | 19 | 18 |

Par le biais des consommations énergétiques (électricité, gaz, charbon, bois, etc.) utilisées pour le chauffage, l'industrie, les transports, la lumière, etc., Oke (1978) a estimé le flux de chaleur anthropique généré au sein de plusieurs villes soumises à différents climats (tableau 5). Ce sont des valeurs moyennes annuelles ou saisonnières au sein des limites urbanisées des

villes. Ces valeurs ne prennent pas en compte les zones rurales et suburbaines des alentours. Oke (1978) les met en relation avec le rayonnement net toutes longueurs d'onde comprises (Q^*) qui intervient dans les bilans radiatif et thermique (cf. chapitres suivants).

Pour Toulouse (France), Pigeon *et al.* (2007) ont estimé que la chaleur anthropique était d'environ 70 W/m^2 durant l'hiver et d'environ 15 W/m^2 durant l'été.

Le flux de chaleur d'origine anthropique dépend, comme nous pouvons le constater, du climat auquel est soumise la ville (Montréal, avec son climat nordique, possède un des plus forts rejets de chaleur anthropique) mais également des densités du bâti et de population (ex : Manhattan), de la population totale de la ville, du type d'énergie utilisée, du degré de développement économique et de l'activité industrielle de la ville (Oke, 1978. Ringenbach, 2004). Le tableau 5 permet de faire ressortir une grande partie de ces facteurs et montre également que dans certaines conditions climatiques (hiver), Q_F peut être largement supérieur à Q^* .

IV.4 Impacts radiatifs et thermiques

La géométrie de la ville est un facteur essentiel de la particularité climatique du milieu urbain. Les rues et les hautes parois verticales forment ce que l'on nomme les canyons urbains (Nunez et Oke, 1977. Oke, 1978) et constituent de véritables pièges radiatifs (figure 4).

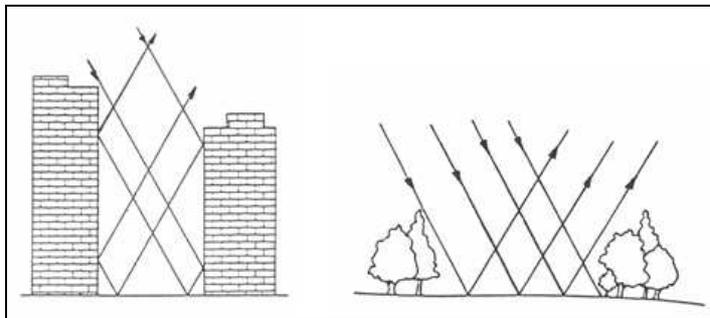


Figure 4 : Le piège radiatif des rues (Griffiths, 1976).

En premier lieu, le rayonnement solaire, réfléchi par les différentes parois, ne parvient à ressortir vers l'atmosphère que partiellement. Les surfaces se réchauffent ainsi sous l'action des rayons. Ce piégeage influence également la valeur de l'albédo du couvert urbain, comme nous le verrons au chapitre suivant, valeur qui est diminuée puisque l'albédo est défini comme le rapport de l'énergie solaire incidente réfléchi par une surface sur cette même énergie incidente. Ainsi, quand le rayonnement solaire arrive sur une surface opaque, une partie de l'énergie est réfléchi (cette fraction correspond à l'albédo = α), et le reste est absorbé ($1 - \alpha$).

Les surfaces avec un faible albédo deviennent alors plus chaudes que celles avec un fort albédo. Cette définition s'applique aussi bien à des surfaces uniformes qu'à des milieux plus hétérogènes et complexes comme les zones urbaines.

Le rayonnement infrarouge émis par les surfaces chauffées, et fonction de l'émissivité²¹ des matériaux, reste également en partie piégé à l'intérieur du canyon réchauffant ainsi l'air ambiant et les matériaux (lorsque ce rayonnement frappe un corps quelconque, une partie peut être réfléchi, une autre transmise à travers le corps, et le reste est absorbé sous forme de chaleur).

Ainsi, si les surfaces urbaines, du fait de l'ombre des bâtiments les uns sur les autres, sont soumises à un rayonnement solaire direct la plupart du temps moindre qu'en milieu rural, elles sont soumises à des rayonnements solaire réfléchi et infrarouge plus importants (figure 5).

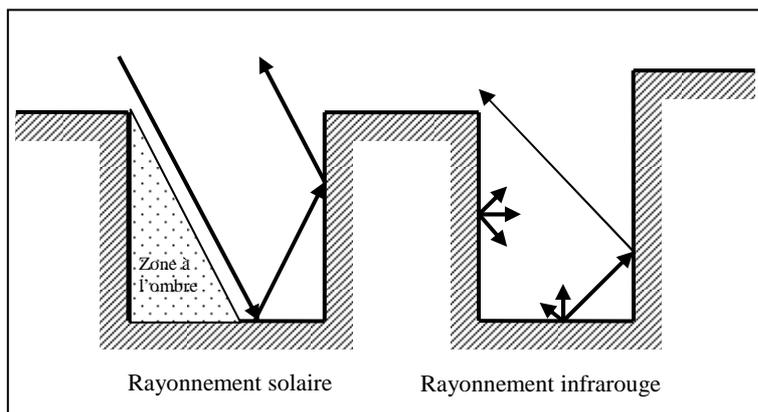
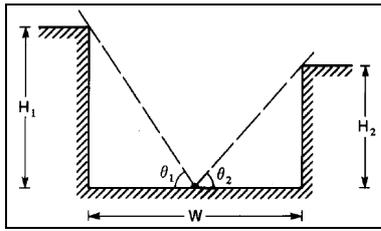


Figure 5 : Rayonnement solaire et rayonnement infrarouge en milieu urbain.

Plusieurs indicateurs peuvent être utilisés pour définir l'importance de ces perturbations radiatives (Robinson, 2006). Le facteur de vue du ciel (ou *sky view factor* – SVF) (figures 6 et 7) est l'un d'eux et peut être calculé pour chaque surface. Il correspond à la portion de ciel observable à partir de cette surface. Ce facteur est égal à 1 dans le cas d'une surface plane sans obstacle et varie sinon entre 0 et 1. Le facteur de vue du ciel permet donc de caractériser la morphologie urbaine et les conséquences radiatives et thermiques qui en découlent (Robinson, 2006. Yamashita *et al.*, 1986. Giridharan *et al.*, 2007. Sacre, 1983).

²¹ L'émissivité d'une surface est le rapport de l'énergie qu'elle rayonne par celle qu'un corps noir rayonnerait à la même température. C'est donc une mesure de la capacité d'un corps à absorber et à réémettre l'énergie rayonnée. Dans le cas du corps noir, qui absorbe et réémet toute l'énergie, $\epsilon = 1$. Et pour un corps quelconque, de température uniforme, on aura $\epsilon < 1$.



$$\Psi_{ciel} = (1 - (\Psi_{m1} + \Psi_{m2})) = (1 - ((1 - \cos\theta_1)/2 + (1 - \cos\theta_2)/2))$$

Figure 6 : Représentation du facteur de vue du ciel dans une rue canyon décrite par sa largeur (W) et les hauteurs des bâtiments l'encadrant (H1 et H2) (Oke, 1988).

| Wah Fu I SVF = 0,24 | Wah Fu II SVF = 0,19 | Taikoo IV SVF = 0,11 | Taikoo XI SVF = 0,26 | Repulse Bay 101 SVF = 0,28 | Repulse Bay 109 SVF = 0,58 | Ma Hang Estate SVF = 0,19 | Heng On Estate SVF = 0,39 | We Che Estate SVF = 0,21 |
|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| Heng Fa Podium SVF = 0,39 | Heng Fa Sea Front SVF = 0,32 | Tsui Ning Garden SVF = 0,43 | Siu Lun Court SVF = 0,22 | Butterfly Estate SVF = 0,34 | Wu King SVF = 0,30 | Sunshine City SVF = 0,42 | Newton Plaza SVF = 0,19 | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

Figure 7 : Facteurs de vue du ciel de différents sites à Hong Kong (Chine) (Giridharan *et al.*, 2007)

Les perturbations radiatives décrites précédemment s'accompagnent de perturbations thermiques dues aux caractéristiques des matériaux urbains telles que l'albédo (figure 8), l'émissivité, la capacité thermique²² et la conductivité thermique²³.

De l'albédo dépend la part de rayonnement réfléchi par une surface et par conséquent le rayonnement absorbé et le réchauffement subi par le matériau. Si l'albédo de certains

²² La capacité thermique (ou capacité calorifique) d'un matériau est la quantité de chaleur mise en réserve lorsque sa température augmente de 1°C. Elle se calcule en faisant le produit de la masse par la chaleur spécifique du matériau (quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de 1°C). La capacité thermique permet de quantifier la possibilité qu'a un corps d'absorber ou de restituer de l'énergie par échange thermique au cours d'une transformation pendant laquelle sa température varie. Plus elle est grande, plus la quantité de chaleur à apporter à un matériau pour élever sa température est grande.

²³ La conductivité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert de chaleur par conduction. Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous un gradient de température.

matériaux est comparable à ceux observés en zone rurale, ce n'est pas le cas de tous. Le goudron par exemple, largement présent en voirie, a un albédo très faible. Les matériaux ayant un albédo et une émissivité élevés s'échauffent moins vite quand ils sont exposés au soleil et réduisent ainsi le transfert de chaleur à l'air environnant (Prado et Ferreira, 2005).

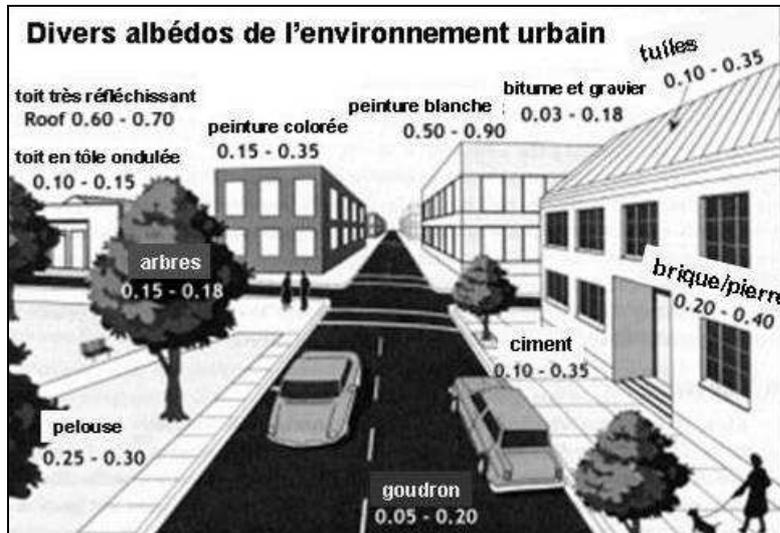


Figure 8 : L'albédo de l'environnement urbain (<http://www.espere.net>).

De l'émissivité dépend le rayonnement infrarouge (soit la chaleur, l'énergie) émis par les matériaux. En effet, l'énergie rayonnée par un matériau est essentiellement émise dans le domaine infrarouge selon la loi de Wien et suit la loi de Stefan-Boltzmann :

$$E = \varepsilon\sigma T^4 \quad (\text{Formule 8})$$

Avec : E : l'énergie émise par unité de surface, ε : l'émissivité, σ : la constante de Stefan-Boltzmann et T : la température en degrés Kelvin.

La plupart des matériaux de construction ont une émissivité d'environ 0,9, ce qui signifie qu'ils rayonnent 90% du maximum théorique d'énergie radiante correspondant à une température donnée. Des observations, à partir de thermographies des toits, ont permis de montrer que la variation de l'émissivité d'un matériau (en l'occurrence ici de toit) avait un effet minime sur la température de surface (Artis et Carnahan, 1982).

Le stock de chaleur contenu au sein des matériaux urbains et susceptible d'être rejeté au sein de l'air environnant dépend pour sa part de la capacité et de la conductivité thermiques. La conductivité thermique permet de quantifier l'aptitude d'un corps à conduire de la chaleur. En

hiver, à épaisseur « normale », si les murs et les toits ont des matériaux de conductivité élevée alors la perte de chaleur des bâtiments sera importante.

La capacité thermique (ou capacité calorifique) d'un matériau est la quantité de chaleur mise en réserve lorsque sa température augmente de 1°C. Elle se calcule en faisant le produit de la masse par la chaleur spécifique du matériau (quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de 1°C). La capacité thermique permet de quantifier la possibilité qu'a un corps d'absorber ou de restituer de l'énergie par échange thermique au cours d'une transformation pendant laquelle sa température varie. Plus elle est grande, plus la quantité de chaleur à apporter à un matériau pour élever sa température est grande.

D'une manière générale, la bonne conductivité des matériaux de construction et leur importante capacité calorifique permettent de stocker durant la journée une grosse quantité de chaleur, qui sera restituée à la basse atmosphère durant la nuit. Ce phénomène freine le refroidissement nocturne comparativement à la campagne environnante où il y a peu de stock de chaleur du fait d'une moindre présence de matériaux, de « masses » où stocker la chaleur.

Les différences entre les comportements thermiques des matériaux peuvent se percevoir en partie par leur température de surface. Des cartographies peuvent être effectuées par exemple par le biais d'une thermographie infrarouge.

En cas de rayonnement solaire faible, c'est-à-dire par temps nuageux, la végétation, si elle permet un refroidissement de l'air par le biais de l'évapotranspiration, ne possède pas pour autant une température plus faible que les matériaux qui l'entourent. Dans ces situations, la thermographie infrarouge fait alors davantage ressortir le comportement thermique de la construction et ses déperditions dus aux caractéristiques thermiques du bâtiment. Par temps ensoleillé, ce sont les propriétés radiatives et notamment l'albédo qui prime sur la thermographie.

Nakamura et Oke (1988) se sont intéressés aux conditions climatiques au sein d'un canyon. A partir de mesures régulières des températures de l'air et de surface, et du vent au sein d'un canyon (figures 9 et 10), ils ont étudié le développement temporel et spatial de la température de l'air (et des différences de température) au sein du canyon. L'étude a été menée dans une rue canyon de l'Université de Kyoto au Japon. Le canyon est orienté est-ouest. La vitesse horizontale du vent a été mesurée à la fois au-dessus des toits et à l'intérieur du canyon

(figures 9 et 10). Les températures de l'air ont été mesurées en 63 points de la section du canyon et les températures de surface en 6 points de cette même section (figure 10).

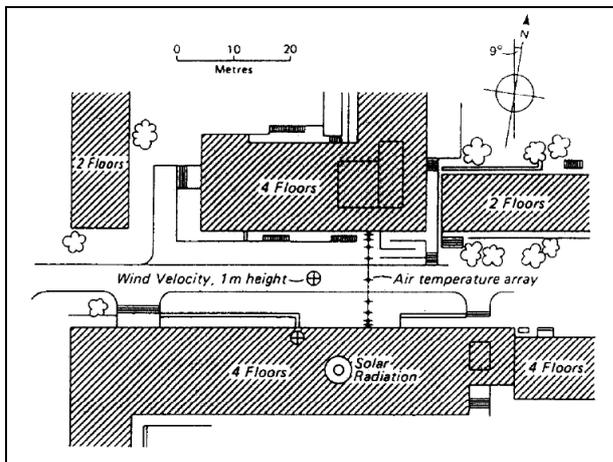


Figure 9 : Vue en plan du canyon (Nakamura et Oke, 1988).

L'orientation est-ouest et la localisation de Kyoto dans l'hémisphère nord, impliquent que seul le mur au nord (c'est-à-dire orienté sud) et une partie du sol du canyon, de la voirie, reçoivent une quantité significative de rayonnement solaire direct. Cela introduit une asymétrie au sein du régime thermique du canyon.

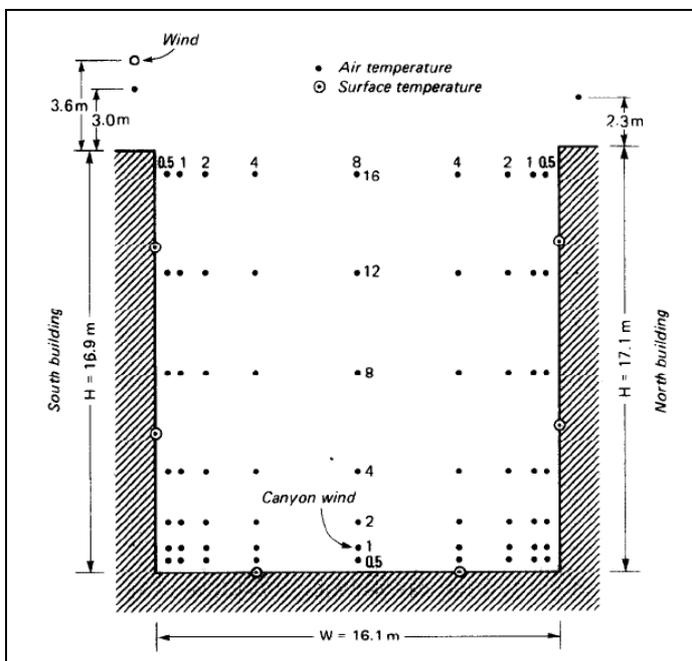


Figure 10 : Elévation de la section du canyon avec les dimensions de ce dernier et la localisation des instruments de mesures (Nakamura et Oke, 1988).

La latitude du site, la saison et la géométrie (H/W) de la section du canyon influencent l'étendue des surfaces recevant du rayonnement solaire directe. Le ratio H/W contrôle également la forme générale du flux au sein du canyon.

Pour les températures, plusieurs constats peuvent être faits :

- En ce qui concerne les différences entre la température de l'air au-dessus des toits et à l'intérieur du canyon, les mesures montrent une variation des différences durant la journée : l'air au niveau du toit est légèrement plus froid le jour et plus chaud la nuit que l'air au sein du canyon. Les différences sont plus importantes le jour du côté nord du canyon car il est directement exposé au rayonnement solaire. Cependant les différences de température de l'air entre l'intérieur du canyon et le dessus sont faibles puisque toujours inférieures à 1°C et souvent inférieures à 0,5°C.
- La différence entre la température de l'air et celle de la surface est pour sa part plus importante et surtout pour le mur orienté sud, soumis au rayonnement solaire, pour lequel la différence peut atteindre de jour 12°C et qui reste supérieur à 3°C la nuit. Pour le mur orienté au nord qui reçoit uniquement du rayonnement solaire diffus, la différence entre la température de surface et celle de l'air est faible et négative en milieu de journée quand l'air est réchauffé entre autres par le transfert de chaleur du mur au nord du canyon.
- En ce qui concerne la distribution spatiale de la température de l'air à l'intérieur du canyon, celle-ci est fortement influencée par le fait que le mur au nord et le sol sont les principaux lieux d'absorption²⁴ du rayonnement solaire. Leur rôle comme source de chaleur sensible pour l'air du canyon continue également la nuit.

²⁴ Dans le cadre de la physique, l'absorption est un « phénomène par lequel une partie de l'énergie de rayonnements électromagnétique ou corpusculaires est dissipée dans un milieu matériel » (Petit Larousse Illustré, 1991).

V Phénomènes engendrés à l'échelle de la ville

Les différents éléments et processus explicités au chapitre précédent sont à l'origine de perturbations à l'échelle de la ville et parfois même de sa région. Les phénomènes engendrés à l'échelle de la ville peuvent être explicités par le biais des bilans radiatif, énergétique et hydrique et par une analyse de la circulation atmosphérique au-dessus des milieux urbains, de l'influence de la ville sur les précipitations et les averses orageuses, des variations journalières et saisonnières de l'intensité des modifications climatiques. Avant d'explicitier 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). Landsberg (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 ;
- 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 fraîcheur 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.

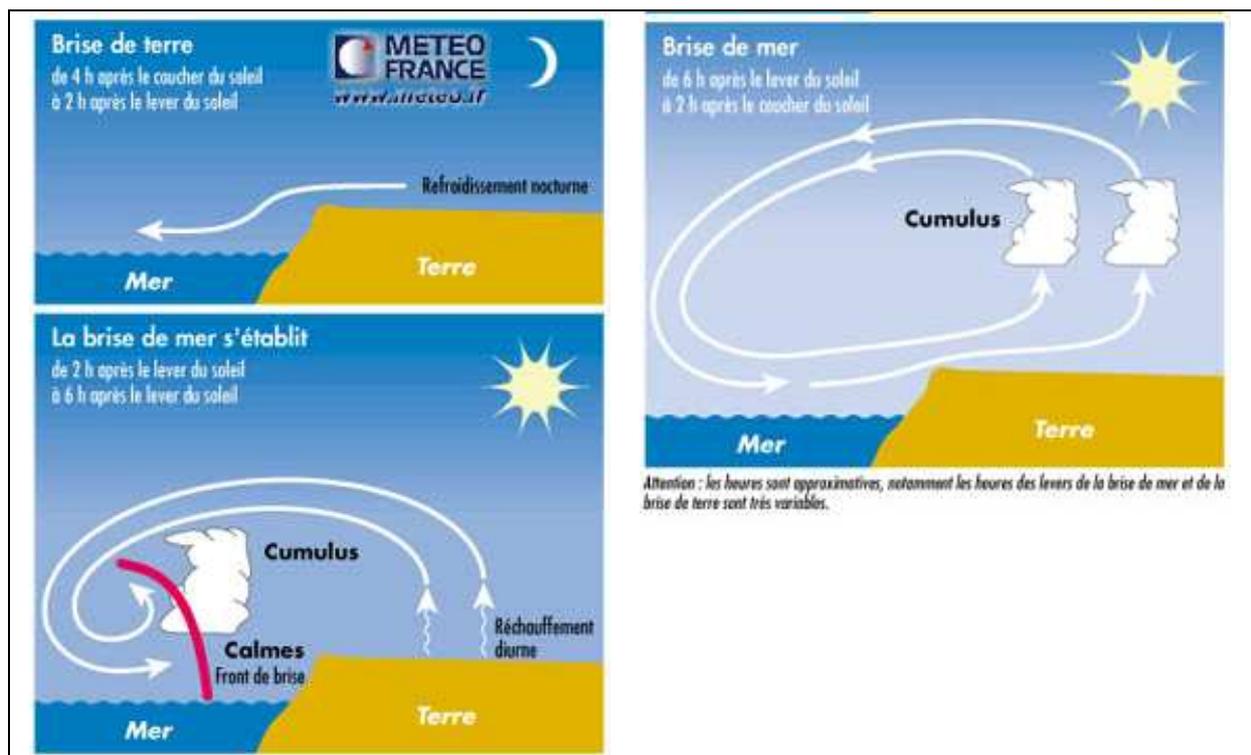


Figure 11 : La brise de terre et la brise de mer (Météo-France).

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.

V.1 Modification du bilan radiatif de la ville

Le bilan radiatif d'une surface exprime la quantité de rayonnement absorbée par cette surface et la quantité de rayonnement émise vers l'atmosphère. Il peut s'écrire de la façon suivante :

$$Q^* = L_{\downarrow} - L_{\uparrow} + (1 - \alpha) K_{\downarrow} \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (\text{formule 9})$$

Où α est l'albédo du sol,

L_{\uparrow} le rayonnement de grande longueur d'onde émis par le milieu,

L_{\downarrow} le rayonnement atmosphérique descendant,

K_{\downarrow} le rayonnement solaire global reçu sur une surface horizontale,

Et Q^* le rayonnement net.

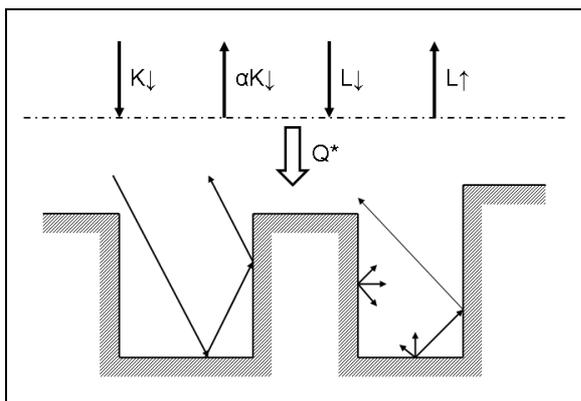


Figure 12 : Bilan radiatif au-dessus d'une ville.

V.1.1 Rayonnement solaire incident (K_{\downarrow})

Le rayonnement solaire (rayonnement visible et proche infrarouge) subit lors de son passage à travers les couches atmosphériques une double atténuation due aux phénomènes d'absorption

et de diffusion²⁵. Deux types de rayonnement peuvent ainsi être distingués au niveau de la surface : le rayonnement solaire direct et le rayonnement rediffusé par la voûte céleste, ou rayonnement diffus.

Dans les conditions normales de températures et de pression (CNTP)²⁶, la composition de l'atmosphère ne change guère spatialement et le rayonnement solaire subit ainsi globalement une altération identique (absorption et diffusion) d'un lieu à l'autre (Sacré, 1983).

La vapeur d'eau et les aérosols²⁷ présents dans les basses couches de l'atmosphère ont pour leur part une grande variabilité spatiale et temporelle (Sacré, 1983). La vapeur d'eau agit principalement sur l'absorption du rayonnement solaire. Les aérosols ont un rôle à la fois dans l'absorption et la diffusion du rayonnement solaire.

Le rayonnement solaire subit au passage des nuages une absorption relativement faible dans l'infrarouge et une très forte diffusion de toutes les longueurs d'onde (Sacré, 1983).

Le rayonnement solaire incident est en général plus faible de 3 à 10% en milieu urbain par rapport aux espaces ruraux environnants (Ringebach, 2004). La cause principale de cette différence s'explique par la pollution atmosphérique, présente de façon plus importante en milieu urbain, c'est-à-dire par une présence accrue de particules, d'aérosols, qui absorbent et diffusent le rayonnement solaire, et de noyaux de condensation, ces derniers favorisant la création de nuages (Sacré, 1983. Ringebach, 2004).

Si on ne tient compte que du rayonnement direct, Ringebach (2004) rapportent les observations de Stanhill et Kalma (1995) à Hong Kong (Chine) et montrent que dans certains cas extrêmes l'atténuation du rayonnement peut atteindre plus de 30% par rapport à la campagne. Le rayonnement diffus va pour sa part augmenter sans pour autant réussir à équilibrer le déficit de rayonnement solaire direct (Cantat, 1987).

Peterson et Flowers (1977) ont réalisé des mesures de rayonnement à Saint-Louis et Los Angeles (Etats-Unis). A Saint-Louis, les mesures effectuées durant l'été 1972 par ciel clair donnent une diminution moyenne du rayonnement solaire global de 2-3% et une diminution

²⁵ La diffusion est le phénomène par lequel un rayonnement, comme la lumière ou le rayonnement solaire, est dévié dans de multiples directions par une interaction avec d'autres objets. La diffusion peut avoir lieu à la rencontre d'une interface entre deux milieux (dioptrique), ou à la traversée d'un milieu (cas de la décomposition de la lumière par un prisme ou effet de l'arc-en-ciel).

²⁶ L'expression « Conditions normales de température et de pression » (CNTP) spécifie une température de 0°C (273,15 K) et une pression de 1 atm (définie comme étant 101,325 kPa, ou 1,013 25 bar).

²⁷ Un aérosol est une particule, solide ou liquide, en suspension dans un milieu gazeux.

moyenne du rayonnement UV de 7-8%. A Los-Angeles, ville ayant des concentrations atmosphériques importantes de polluants, les mesures réalisées en septembre et octobre 1973 par ciel clair montrent une diminution moyenne du rayonnement solaire global de 11% et une diminution moyenne du rayonnement UV de 29%.

V.1.2 Rayonnement solaire réfléchi (αK_{\downarrow})

Le rayonnement solaire réfléchi (αK_{\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 comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent.

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 entraîne 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.

Le tableau 6 regroupe plusieurs valeurs d'albédo urbain sélectionnées par Taha (1997a). Le cas de Lagos est intéressant car la ville est construite sur un maillage compliqué de cours

d'eau et de lagons qui implique une diminution de l'albédo (l'albédo de l'eau est plus faible que celui des bâtiments de couleur claire).

Tableau 6 : Albédos de différentes zones urbaines (Taha, 1997a).

| Zone urbaine | Albédo |
|-----------------------------|----------------|
| Los Angeles (centre urbain) | 0.20 |
| Madison, WI (urbain) | 0.15-0.18 |
| Saint-Louis, MI (urbain) | 0.12-0.14 |
| Saint-Louis, MI (centre) | 0.16-0.19 |
| Hartford, CT (urbain) | 0.09-0.14 |
| Adelaide, AUS (commercial) | 0.27 (moyenne) |
| Hamilton, Ontario | 0.12-0.13 |
| Munich, Allemagne | 0.16 (moyenne) |
| Vancouver, BC | 0.13-0.15 |
| Tokyo | 0.10 (moyenne) |
| Ibadan, Nigeria | 0.12 (moyenne) |
| Lagos, Nigeria | 0.45 |

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 rayonnement solaire. Les effets d'ombres (figure 12), 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.

V.1.3 Rayonnement thermique atmosphérique descendant de grande longueur d'onde (L_{\downarrow})

Les éléments présents dans l'atmosphère (air, vapeur d'eau, gaz carbonique, nuage, aérosols...) émettent un rayonnement thermique de grande longueur d'onde (rayonnement infrarouge). La surface du sol reçoit ainsi une certaine quantité de rayonnement descendant du domaine infrarouge L_{\downarrow} .

Ce rayonnement augmente en présence de nuages ou encore d'aérosols et présente par temps clair une variation diurne. Le maximum du rayonnement thermique de grande longueur d'onde est atteint vers midi et le minimum en fin de nuit (Sacré, 1983).

Estournel *et al.* (1983) ont effectué en mai et juin 1979 des mesures sur un site urbain de Toulouse, qui est alors une ville moyenne de 400 000 habitants, et un site rural extérieur à la ville. Ces mesures montrent un excès de rayonnement infrarouge descendant au sein de la

ville à la fois durant la nuit et le jour (excès d'environ 15 W.m^{-2} (soit environ 5%) à la fin de la nuit et d'environ 25 W.m^{-2} (soit environ 7%) dans l'après-midi). Cela s'accompagne d'une diminution de 3,5% (30 W.m^{-2}) du rayonnement solaire direct sur le site urbain.

Rouse *et al.* (1973) ont comparé des mesures effectuées sur un site fortement pollué et un site relativement préservé à l'intérieur et autour de la ville d'Hamilton (Ontario, Canada) qui est à l'époque de l'étude une ville industrielle de 300 000 habitants. Ces mesures ont été effectuées durant trois ans (mai/juin 1970, décembre 1971/avril 1972). L'augmentation du rayonnement descendant entre la zone urbaine et l'espace rural est de 22,5% en moyenne journalière. Cette forte augmentation compense, d'un point de vue énergétique, les 12% de perte de rayonnement solaire global.

V.1.4 Rayonnement thermique ascendant ($L\uparrow$)

Le rayonnement thermique émis par le milieu $L\uparrow$ (domaine infrarouge) dépend de la température de surface et de l'émissivité des matériaux constituant le sol (loi de Stefan-Boltzmann – formule 8). 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 pour les surfaces naturelles (Ringebach, 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.

L'étude de Dousset *et al.* (2007) sur la canicule de 2003 dans le bassin parisien montre différentes thermographies du bassin parisien à différentes heures de la journée. Ces thermographies infrarouges, issues des images satellites de NOAA-AVHRR²⁸, sont directement liées au rayonnement thermique ascendant et mettent en avant les différences entre les milieux très urbanisés du bassin parisien et ceux qui le sont moins (figures 13 et 14).

²⁸ Le AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) est un radiomètre imageur conçu par le NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), une agence américaine responsable de l'étude de l'océan et de l'atmosphère.

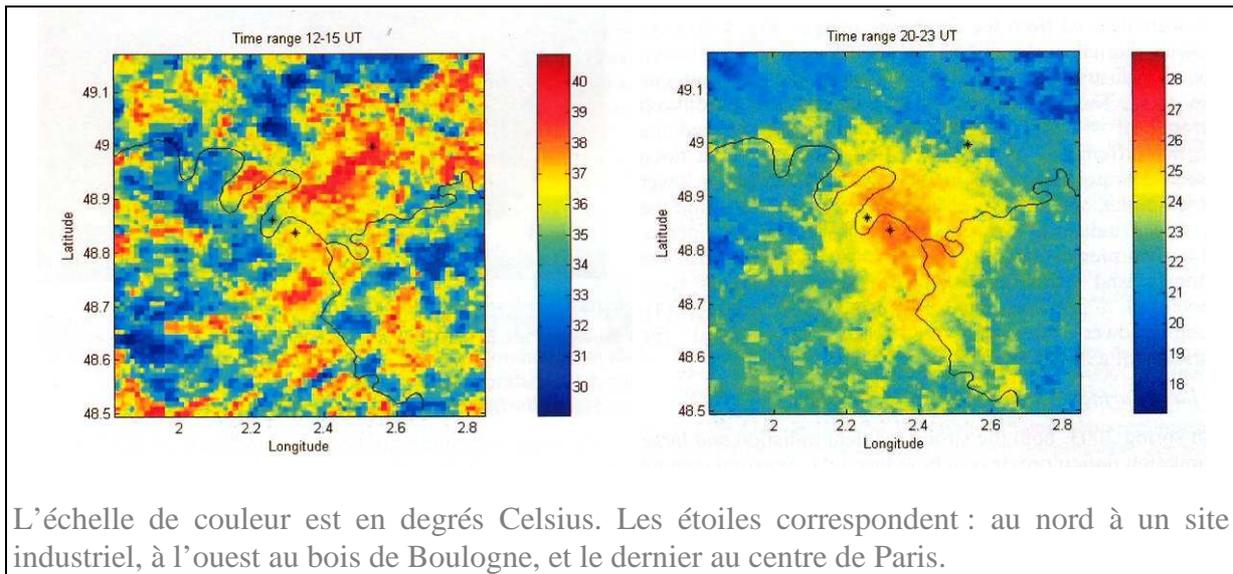


Figure 13 : Température moyenne de surface à partir d'images infrarouge lors de la canicule de 2003 (du 4 au 13 août) pour deux intervalles de temps (en journée de 12h à 15h et de nuit de 20h à 23h) (Dousset et al., 2007).

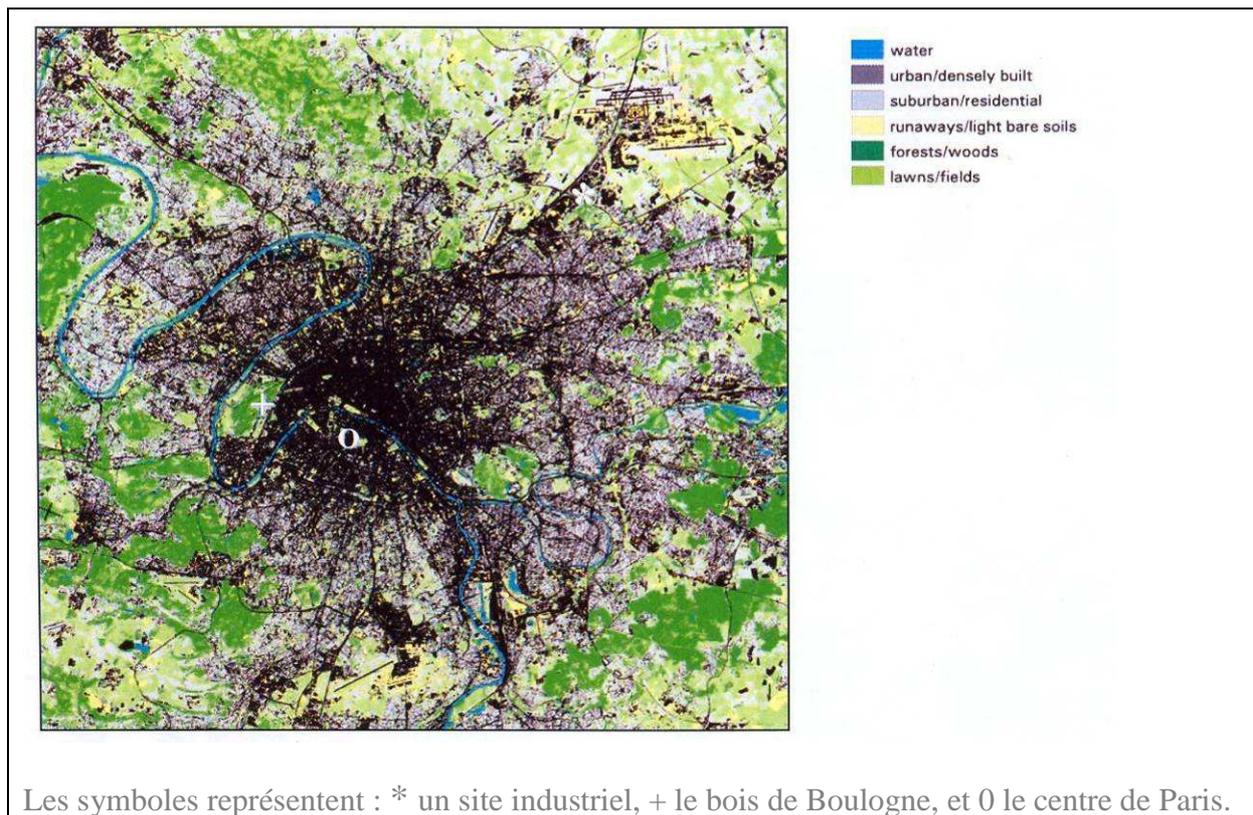


Figure 14 : Classification de la nature de la surface de Paris à partir d'une image satellite (SPOT-4 HRV) le 13 juillet 2003. (Dousset *et al.*, 2007).

La NASA (National Aeronautics and Space Administration) s'est également intéressée à la signature thermique des villes comme avec cette image (figure 15) où il est possible de

distinguer cinq grandes villes du nord-est des Etats-Unis : Boston, New York, Philadelphia, Baltimore, et Washington.

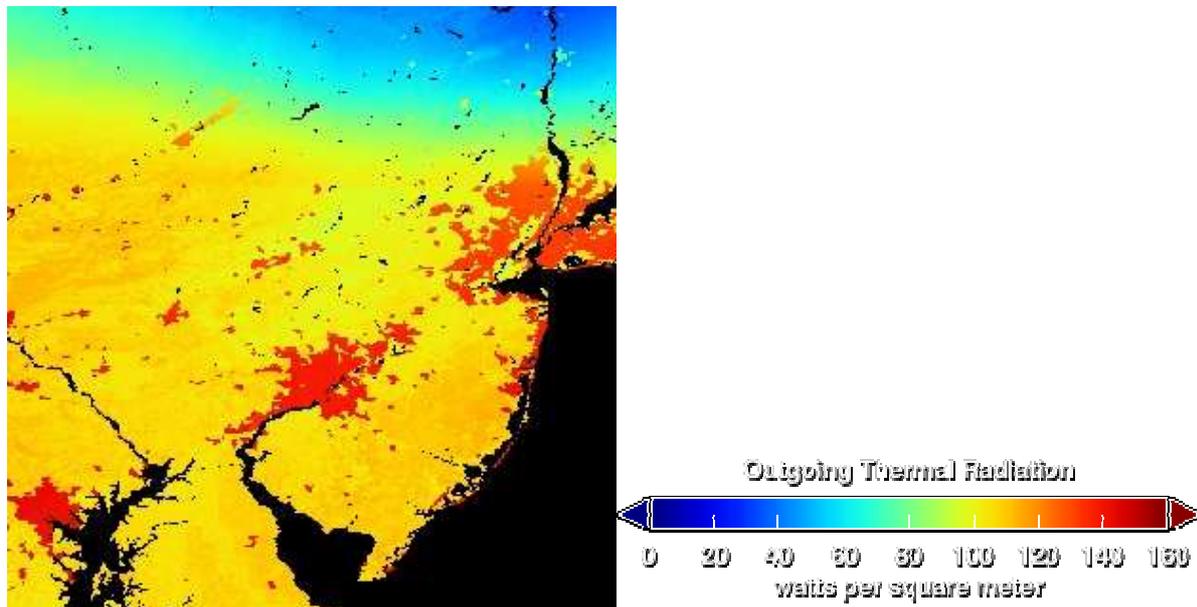


Figure 15 : Rayonnement thermique ($W.m^{-2}$) produit par le LIS (Land Information System) pour le 11 juin 2001 au niveau du nord-est des Etats-Unis (NASA/Goddard Space Flight Center).

V.1.5 Rayonnement net (Q^*)

Le rayonnement net 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), 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 Oke (1982, 1988) également, l'étude de cette équation permet de conclure que le bilan radiatif n'est pas extrêmement différent entre la ville et la campagne avec un déficit sans doute inférieur à 5% en zone urbaine par rapport à celui de la campagne environnante.

Oke (1978) estime que, pour des villes de moyenne latitude, le gain moyen en rayonnement de courtes longueurs d'onde est légèrement plus faible pour les villes. En effet si l'albédo est inférieur en ville le fait que le rayonnement solaire incident soit plus faible l'emporte entraînant un déficit au niveau du terme $(1 - \alpha) K_{\downarrow}$. De plus le rayonnement solaire absorbé

en partie par les polluants de l'atmosphère provoque une augmentation de la température augmentant le rayonnement atmosphérique descendant L_{\downarrow} .

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}).

V.2 Modification du bilan d'énergie thermique de la ville

Le bilan d'énergie thermique d'une surface exprime les quantités d'énergies échangées au sein de cette surface. Il peut s'écrire de la façon suivante :

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S (+ \Delta Q_A) \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (\text{Formule 10})$$

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).

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 substratum²⁹ et son utilisation est différente* » (Escourrou, 1991). L'apport d'énergie provient initialement du soleil (K_{\downarrow}) et l'atmosphère (L_{\downarrow}) 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, comme nous l'avons vu précédemment, et de flux de chaleurs sensible et latente. Ces transferts de chaleur se font

²⁹ Le substratum représente la surface terrestre : sols, végétation, surface en eau, etc.

de trois façons : par conduction³⁰ au sein des matériaux, par convection³¹ et par rayonnement (de grandes longueurs d'onde).

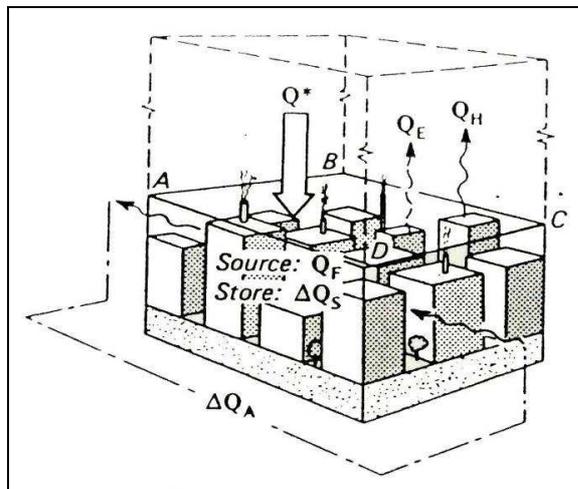


Figure 16 : Schéma descriptif du bilan énergétique pour une zone urbaine (Duchêne-Marullaz, 1980).

V.2.1 Flux de chaleur d'origine anthropique (Q_F)

La chaleur anthropique représente la chaleur générée par les sources mobiles et stationnaires d'une zone. 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). Comme nous l'avons signalé au chapitre précédent, la production d'énergie anthropique est étroitement liée à la taille et à la densité de la ville, à ses fonctions et à son industrialisation, ainsi qu'à la zone climatique et aux besoins de chauffage ou de climatisation.

Comme on a pu le constater lors de la première partie, 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.

³⁰ 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.

³¹ 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 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.

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

Les phénomènes radiatifs et thermiques, présentés au chapitre précédent, 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 (Ringebach, 2004). La campagne, du fait, entre autres³², 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.

V.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 Ringebach (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).

V.2.4 Flux de chaleur latente (Q_E)

La réduction des phénomènes évapotranspiratoires en milieu urbain, présentée au chapitre précédent, 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 et des ordres de grandeur peuvent être avancés (figure 17).

³² Le piégeage des radiations favorise également un moindre refroidissement en milieu urbain.

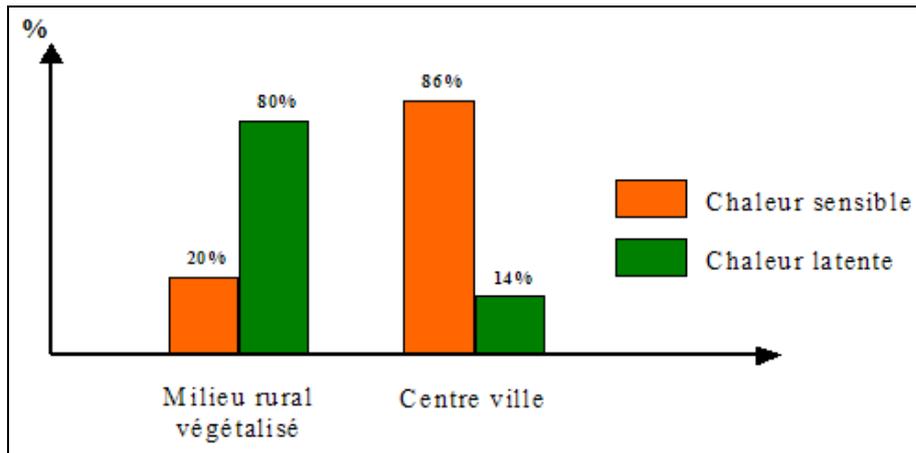


Figure 17 : Les flux de chaleur en milieux urbain et rural (D'après Cantat (1993)).

V.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).

V.2.6 Synthèse

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 climatiques³³.

L'étude concernant Marseille (Roberts *et al.*, 2003 ; Roberts *et al.*, 2004) s'est appuyée sur une campagne de mesures. Ainsi, Q^* , Q_H et Q_E ont été mesurés directement, Q_F est supposé implicitement inclus dans les termes mesurés (il se répartit plus particulièrement entre Q_H et Q_E), et ΔQ_A est considéré comme négligeable. L'équation du bilan énergétique devient alors : $Q^* = Q_H + Q_E + \Delta Q_S$, et ΔQ_S (Q_S dans la figure 18) est calculé à partir des trois autres termes.

Le climat chaud et sec, ainsi que le manque de végétation de Marseille se reflètent bien sur la courbe représentant Q_E , proche du 0 W.m^{-2} durant la nuit. Durant la journée, le flux de chaleur latente augmente graduellement et atteint un maximum d'une valeur d'environ 1/6 du

³³ 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).

maximum de rayonnement net (Q^*). Concernant Q_H , selon Roberts *et al.* (2003), « la valeur de Q_H durant la journée est importante et compte pour plus de 75% de Q^* en entrée durant la journée ». Il est également possible de noter que Q_H n'est jamais négatif durant la nuit, suggérant que le rejet nocturne de chaleur provenant du stockage est suffisant pour entretenir un flux positif. Le décalage prononcé entre Q_H et Q^* met également en évidence le moment où débute le rejet de l'énergie stockée durant les heures de la matinée. Le retard entre les pics respectifs de Q_H et ΔQ_S (ici d'environ deux heures) indique également une asymétrie journalière dans l'utilisation de l'énergie (conduction au sein des murs, des rues et des toits durant la matinée et convection au sein de l'atmosphère durant l'après-midi) (Roberts *et al.*, 2003).

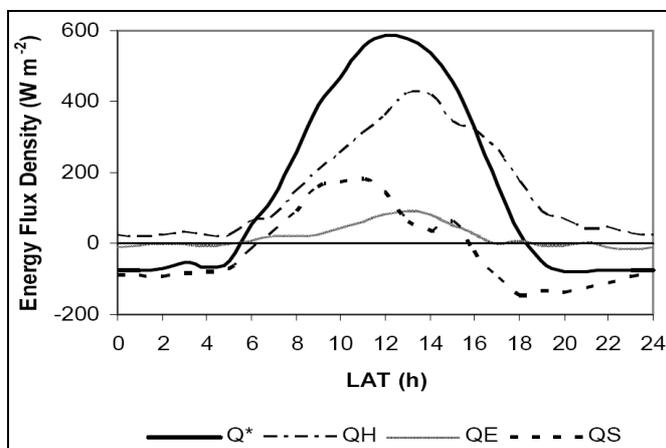


Figure 18 : Cycle journalier moyen des flux mesurés du bilan énergétique de surface de Marseille pour les jours 183 à 192 de l'année 2001 (début juillet) (Roberts *et al.*, 2003).

L'étude du bilan énergétique en milieux urbain et rural permet ainsi d'expliquer en grande partie les différences climatiques entre les deux milieux (figure 19).

Pour étudier le bilan énergétique, il est également possible d'effectuer quelques ratios entre ses différents termes (Grimmond et Oke, 1999b). Par exemple, les valeurs du rapport, dit de Bowen, $\beta = Q_H/Q_E$ sont en milieu urbain supérieures à un, indiquant ainsi que plus d'énergie est consacré au réchauffement de l'air qu'à l'évaporation de l'eau. Dans le cadre de l'étude de Grimmond et Oke (1999b), la valeur du ratio de Bowen, calculé sur les moyennes de la journée ($Q^* > 0 \text{ W.m}^{-2}$), est comprise entre 1,37 et 2,87 pour les milieux suburbains. La situation urbaine atteint une valeur de 9,85.

Si l'on considère un espace beaucoup plus petit comme une rue par exemple, ce rapport peut prendre des valeurs élevées. Pour une rue de Vancouver Oke et Nunez (1977) ont ainsi trouvé une valeur de β d'environ 6,4 à midi et une valeur du ratio Q_H/Q^* d'environ 0,64.

Q_H peut varier de façon importante dans la journée et le rapport Q_H/Q^* est bien souvent plus élevé en fin de journée.

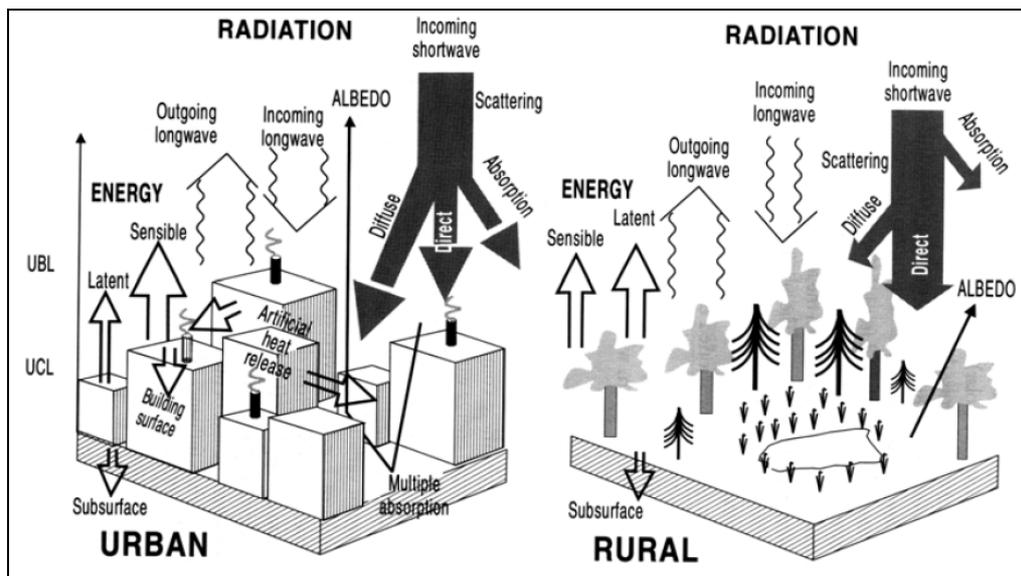


Figure 19 : Schématisation des différents flux d'énergie et de rayonnement au-dessus d'une zone urbaine et rurale pour une journée avec un ciel dégagé (Gill (2004), d'après Bridgman *et al.* (1995)). La largeur des flèches permet d'approcher l'importance des flux.

V.3 Modification du bilan hydrique de la ville

Le bilan hydrique 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 :

$$P = Q + ETR + \Delta Ru + \Delta Rh \quad (\text{Formule 11})$$

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.

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

$$\underbrace{P + F + I}_{\text{Apport en eau}} = \underbrace{E + \Delta r + \Delta S + \Delta A}_{\text{Pertes en eau}} \quad (\text{Formule 12})$$

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 advection³⁴.

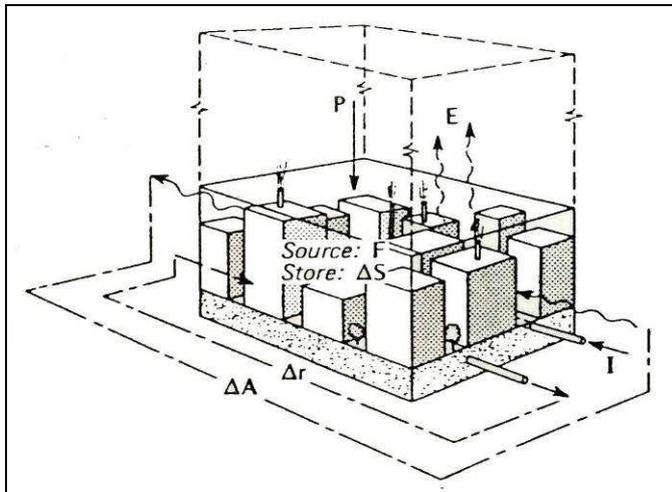


Figure 20 : Schéma descriptif du bilan hydrique pour une zone urbaine, d'après Oke (Duchêne-Marullaz, 1980)

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

³⁴ 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.

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).

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 (cf. annexe 3) et dont nous tenterons d'expliquer les raisons dans un des chapitres suivants.

Ce bilan permet également 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).

V.4 Mouvements des masses d'air et rugosité du milieu urbain

La multiplication des constructions au sein d'une zone urbaine accroît la rugosité et entraîne la diminution de la vitesse du vent et une augmentation de la turbulence³⁵ (Sacré, 1983.

³⁵ « *Le vent est un écoulement turbulent d'air, constitué d'une multitude de tourbillons de tailles diverses, imbriqués les uns dans les autres, les petits étant transportés par les plus gros, eux-mêmes transportés par le mouvement d'ensemble. La vitesse du vent, en un point donné de l'espace, présente donc de fortes variations plus ou moins irrégulières d'amplitudes et de fréquences différentes. [...] La vitesse instantanée du vent reflète la nature turbulente du vent. Elle se décompose en une partie moyenne et une partie fluctuante (ou turbulente), aléatoire. [...] Ces fluctuations sont décrites statistiquement (écarts types, densités spectrales).* » Site de Grégory Turbelin, maître de conférence (<http://gmfe16.cemif.univ-evry.fr:8080/~greg/>).

Escourrou, 1981). Ainsi, pour une même hauteur d'environ 20m au-dessus du sol, on observe une vitesse moyenne d'environ 20 à 30% moins importante en ville. En revanche, la turbulence est accrue de l'ordre de 50 à 100% (Sacre, 1983).

La circulation atmosphérique au-dessus d'une ville est intimement liée à la rugosité du milieu urbain et influence la dispersion des polluants.

L'écoulement, au voisinage du sol, est fortement perturbé par la forme, la disposition, la nature et la hauteur des obstacles placés au sol (cf. chapitre précédent), ce qui génère des turbulences mécaniques (convection forcée) et des turbulences thermiques (convection libre) liées au transfert de chaleur entre l'air et la surface (Leroyer, 2006). Des mouvements turbulents et inhomogènes se créent au sein de ce que l'on nomme la sous-couche rugueuse et dont l'épaisseur est caractérisée par la « longueur de rugosité » z_0 , appelée également rugosité par abus de langage. Cette longueur dépend du type de surface et varie de $5 \cdot 10^{-3}$ m pour la mer à plus de 1m pour les milieux très rugueux comme une forêt ou une zone urbaine (Leroyer, 2006). La hauteur moyenne des constructions, qui font obstacle à l'écoulement, permet pour sa part de définir une sous-couche atmosphérique d'écoulement fortement perturbé : la canopée urbaine (cf. chapitre III).

L'écoulement des masses d'air au sein de la couche limite atmosphérique (CLA) (qui correspond à la portion d'atmosphère au voisinage de la surface dans laquelle la présence de cette dernière affecte directement les paramètres météorologiques (Leroyer, 2006) est plus ou moins freiné selon la turbulence générée par une surface plus ou moins rugueuse. La vitesse du vent au sein de cette couche varie avec la hauteur et suit, au-dessus de la hauteur z_0 , une loi logarithmique (Sacré, 1983. Leroyer, 2006) (figures 21 et 22).

L'intensité de la turbulence est également fonction de la hauteur mais aussi de la rugosité de la surface. Elle peut se définir selon le rapport $I = \sigma_v/V$, où V est la vitesse du vent et σ_v l'écart-type de fluctuation de vitesse. (Sacré, 1983)

$$\text{Pour } z_0 \leq 0.2 \text{ m} \quad I = 1 / \log(z/z_0)$$

$$\text{Pour } z_0 \geq 0.2 \text{ m} \quad I = (-0.14 \log(z_0) + 0.78) / \log(z/z_0)$$

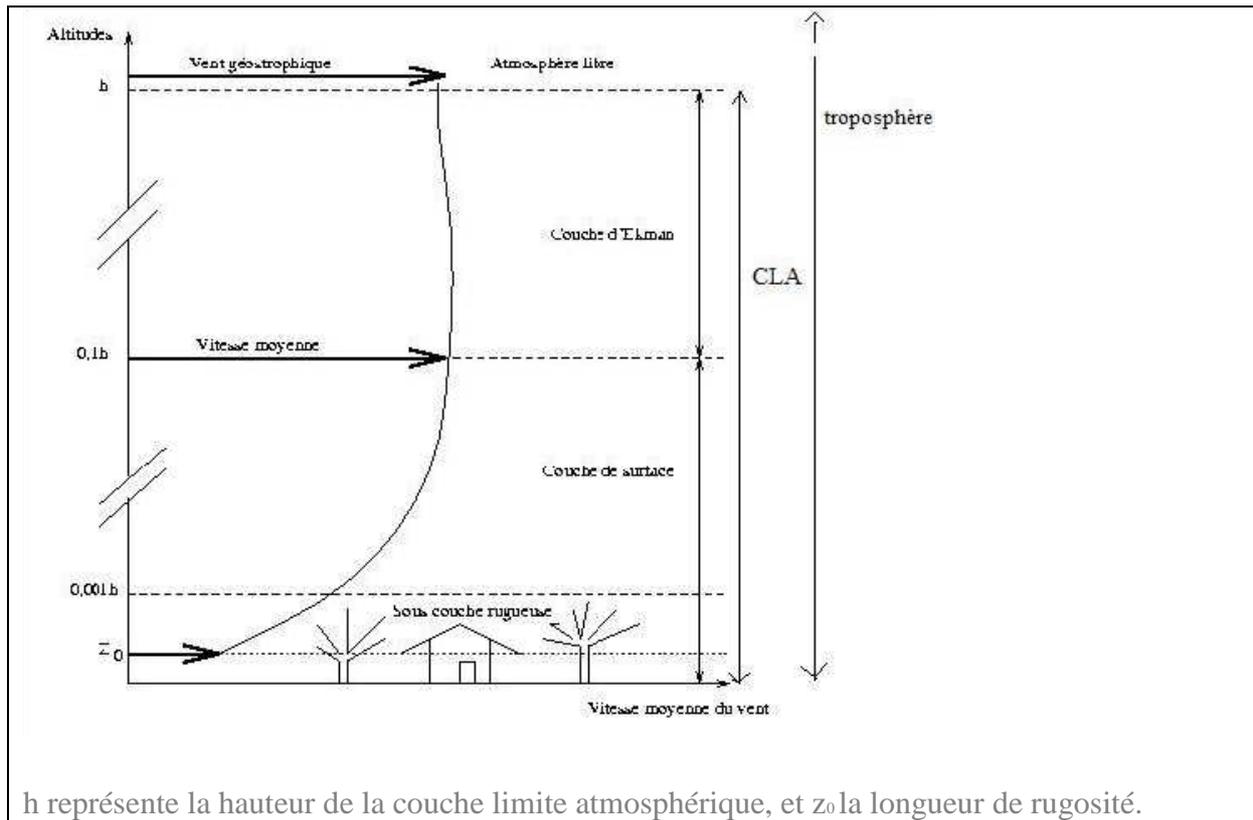


Figure 21 : Représentation schématique des basses couches troposphériques et profil de la vitesse du vent selon les différentes couches troposphériques (Leroyer, 2006).

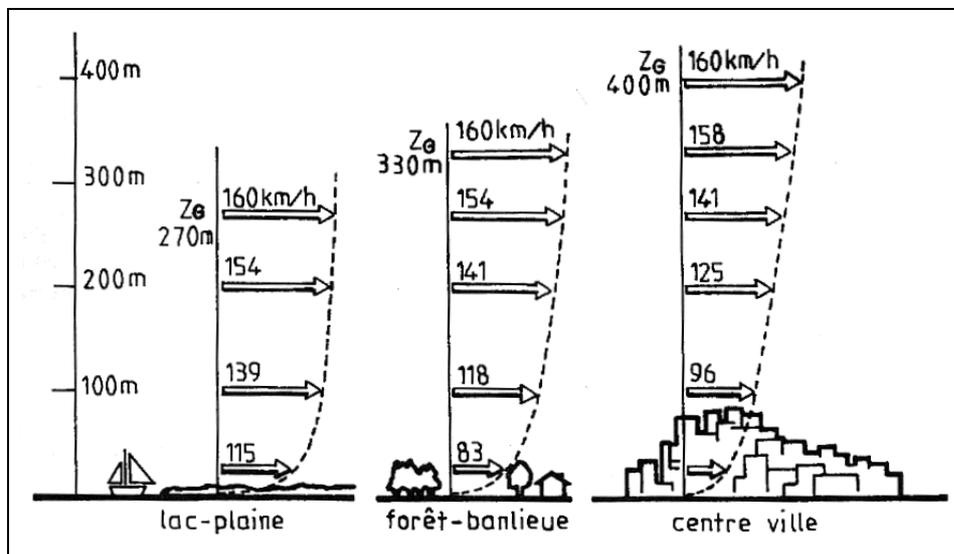


Figure 22 : Profil de la vitesse du vent pour différentes surfaces (Chatelet *et al.*, 1998).

Comme le signale Leroyer (2006), l'épaisseur de la CLA est très variable et dépend du type de surface, de l'heure, de la saison, avec un ordre de grandeur de 500 à 1500m. La stabilité de la CLA et les turbulences qui y sont générées dépendent également de la météorologie, du temps qu'il fait (cf. chapitre suivant).

V.5 Précipitations et les averses orageuses

Avant d'aborder la possible influence de la ville sur les précipitations et les averses orageuses, une explication sur la formation des nuages et par la suite des précipitations est nécessaire³⁶.

La formation d'un nuage est due à la condensation (ou parfois condensation solide) de la vapeur d'eau, à partir de noyaux de condensation (poussières ou grains de sel) sur laquelle la vapeur d'eau se dépose. Ce milieu condensé inclut ainsi de minuscules particules d'eau liquide ou de glace, ou des deux à la fois avec des dimensions pouvant aller de 1 à 100 μm environ. Ces particules sont maintenues en suspension grâce aux courants ascendants de l'air. Deux mécanismes permettent d'expliquer cette ascendance : 1) La convergence, processus dynamique lié à la confluence de flux d'air, au « rattrapage » d'un flux freiné par celui qui le suit, ou encore à l'entraînement de l'air dans une circulation cyclonique autour d'une dépression³⁷ (et qui « s'oppose » à la divergence ou éloignement des masses d'air) (figure 23) ; 2) La convection, processus thermodynamique qui met en mouvement un fluide, avec transport de chaleur, sous l'influence de différences de températures.

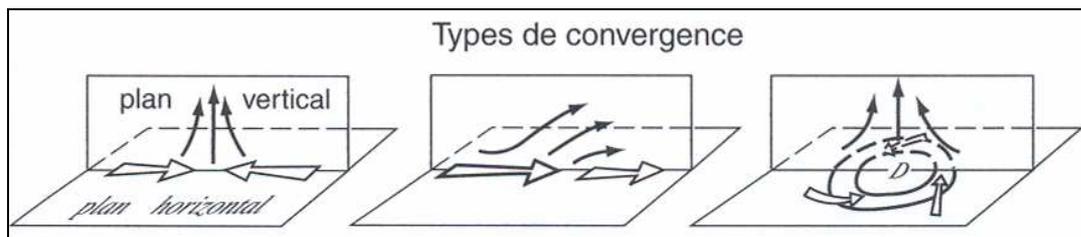


Figure 23 : Relations entre mouvements horizontaux et verticaux avec convergence des masses d'air (Vigneau, 2005).

Selon Vigneau (2005), « la forme des nuages dépend de la vigueur du flux horizontal ; l'altitude de leur base dépend du niveau de condensation ; leur épaisseur dépend de l'ampleur de l'ascendance ainsi que de la stabilité/instabilité de l'air soulevé ».

Pour Landsberg (1981), cette formation des nuages en milieu urbain est influencée à la fois par l'augmentation de la convection et par la production conséquente de noyaux de condensation. Le premier effet se perçoit plus sur la formation estivale des nuages, alors que le second agira principalement pendant les hivers humides.

³⁶ Les informations sont issues principalement des sites web de Météo-France, de Wikipédia et de meteo.org, et de l'ouvrage sur la climatologie de Vigneau (2005).

³⁷ En météorologie, la dépression est une masse atmosphérique sous basse pression et qui est le siège de mouvements ascendants.

Tout nuage (figure 24) ne provoque pas de pluie. Les nuages à base élevée et les nuages bas de très faibles épaisseurs ne sont guère pluvio-gènes. L'essentiel des précipitations est dû aux nuages bourgeonnants et celles-ci sont d'autant plus intenses que l'épaisseur est grande et que le sommet est haut (cumulonimbus par exemple).

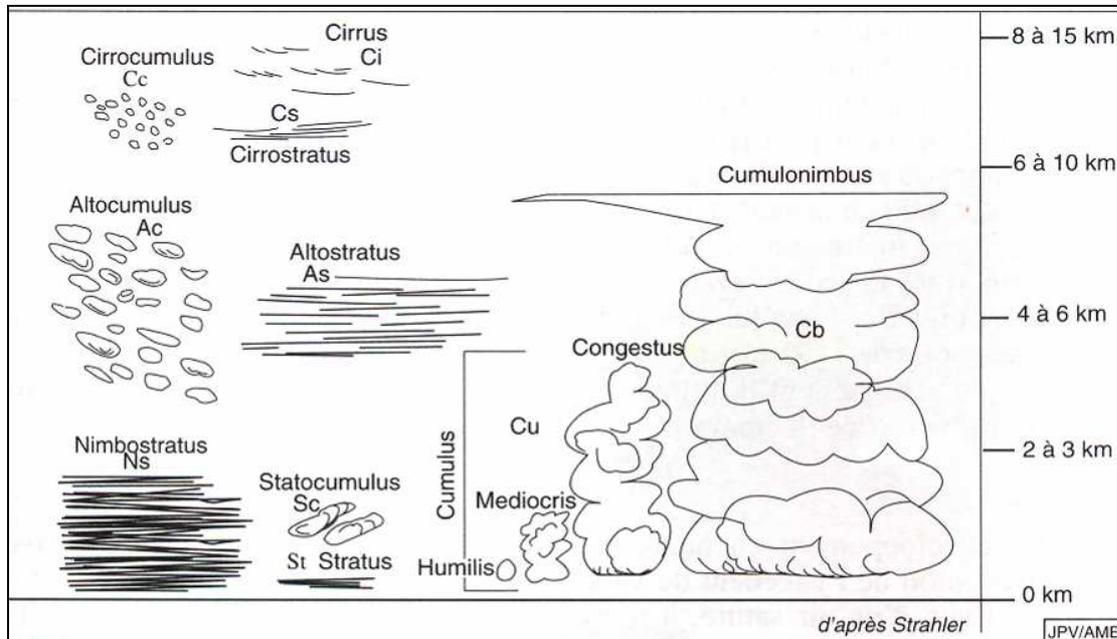


Figure 24 : La classification des nuages (Vigneau, 2005).

Les phénomènes qui déclenchent les précipitations (c'est-à-dire un ensemble organisé de particules d'eau liquide ou solide tombant en chute libre au sein de l'atmosphère) sont complexes. Ces précipitations prennent différentes formes dont les plus communes sont la pluie, la bruine, la neige, la grêle et le grésil³⁸. Les chutes ne se produisent qu'après le grossissement des minuscules particules d'eau liquide ou de glace du nuage pour former des gouttes, des flocons ou encore des grêlons. Cette transformation est due à deux types de processus (figure 25) :

- La coalescence : les minuscules particules d'eau, ou gouttelettes, entrent en collision et forme une goutte plus grosse. Les plus grosses gouttelettes capturent les plus petites et ce jusqu'à ce que leur taille ne permette plus au courant ascendant de les « porter ». Durant la descente, la coalescence continue, et la croissance de la goutte se poursuit.
- L'effet Bergeron : Dans le nuage, si les noyaux de congélation ne sont pas assez nombreux, une partie de l'eau peut rester sous forme liquide à des températures très

³⁸ Le grésil est une « pluie congelée formée de petits grains de glace friables et blancs » (Larousse, 1991).

inférieures à 0°C ; c'est le phénomène de surfusion³⁹. En dessous de 0°C, la saturation est atteinte plus tôt pour la glace que pour l'eau liquide. Le météorologiste Tor Bergeron a donc imaginé que les gouttelettes d'eau s'évaporent et la vapeur d'eau va se déposer sur les cristaux. Ces derniers grossissent et la pesanteur les entraîne vers le bas. En cours de route, ils peuvent éventuellement fondre et se transformer en goutte.

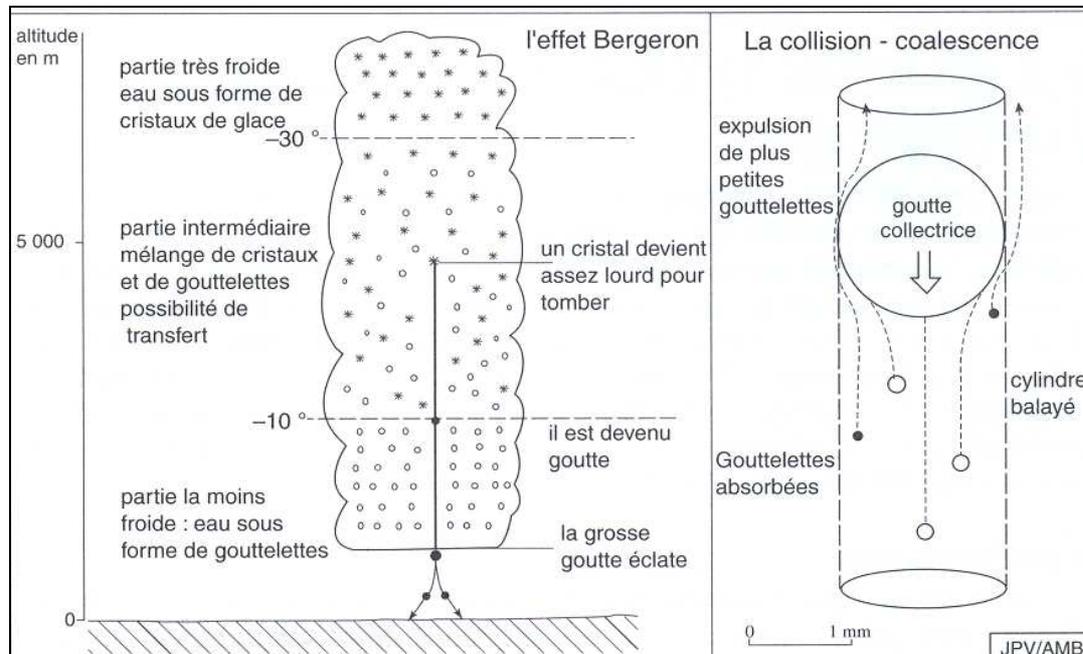


Figure 25 : Du nuage à la pluie : les mécanismes (Vigneau, 2005).

Deux types de précipitations, non mutuellement exclusifs, peuvent être distingués :

- Les précipitations stratiformes : Elles sont causées par le soulèvement lent et à grande échelle de l'humidité qui se condense. Elles durent en règle générale longtemps mais sont de faible intensité. Elles se produisent dans les zones de basse pression et sont associées à des nuages de types « stratus ».
- Les précipitations de convection, qui sont liées à des nuages convectifs de type « cumulonimbus » ou « cumulus congestus », résultent de l'élévation rapide de masses d'air chargée d'humidité du fait de l'instabilité convective de l'air. Elles couvrent plutôt des petites surfaces et sont très localisées. Elles ne durent pas longtemps mais elles sont intenses.

³⁹ La surfusion est l'état d'une matière qui demeure en phase liquide alors que sa température est plus basse que son point de solidification. C'est un état dit métastable, c'est-à-dire qu'une petite perturbation peut suffire pour déclencher abruptement le changement vers la phase solide.

Ces dernières précipitations sont celles qui sont le plus influencées, de part leur formation, par le milieu urbain. Ce dernier favorise en effet l'instabilité convective de l'air.

Plusieurs études, fondées sur des observations ou de la modélisation, ont montré que la distribution spatiale et les quantités de pluie à l'intérieur des villes et sous le vent de celles-ci pouvaient être modifiées du fait de l'influence de l'îlot de chaleur urbain sur les circulations atmosphériques et la convection en résultant (Atkinson, 1971. Rozoff *et al.*, 2003. Changnon *et al.*, 1977. Ackerman *et al.*, 1978. Bornstein et Lin, 2000. Jauregui et Romales, 1996. Guo et al, 2006. Shepherd *et al.*, 2002).

Changnon *et al.* (1977) résume l'influence urbaine sur les précipitations à trois points :

- Les effets thermodynamiques qui contribuent à plus de nuages, à des bases de nuages plus élevées et à légèrement plus d'instabilité à l'intérieur des nuages ;
- Les effets thermodynamiques et mécaniques qui produisent des zones de convergence où les nuages et la pluie sont initiés ;
- Les effets des noyaux géants de condensation rejetés en zone urbaine et qui provoquent un processus de coalescence plus vigoureux et plus fréquent dans les nuages au-dessus de la ville que ceux en zone rurale.

L'étude METROMEX (Metropolitan Meteorological Experiment) menée dans les années 1970 aux Etats-Unis (Changnon *et al.*, 1976, 1977. Ackerman *et al.*, 1978) a permis de mieux comprendre les modifications engendrées par les grandes villes sur les précipitations de convection. D'une manière générale, les résultats issus de METROMEX ont montré que l'influence urbaine sur la pluie, c'est-à-dire sur l'augmentation des précipitations, s'observe plutôt durant les mois d'été. Cette augmentation, observée typiquement à 50-75 km sous le vent des villes, serait de l'ordre de 5-25% (Sanderson et Gorski, 1978. Huff et Vogel, 1978. Braham et Dungey, 1978. Changnon *et al.*, 1977. Ackerman *et al.*, 1978).

Hjelmfelt (1982) a simulé, en utilisant un modèle numérique, l'îlot de chaleur urbain de Saint-Louis (Missouri, Etats-Unis) et montré qu'un des effets urbains est la formation de mouvements d'air ascendant sous le vent de la ville. Il met également en évidence le rôle joué par la situation géographique de la ville, notée également par Escourrou (1981) : « *L'influence de l'urbanisation sur les pluies dépend donc de la place de la ville par rapport à la circulation atmosphérique générale* ».

D'autres études ont également permis de mieux comprendre les influences urbaines sur la répartition spatiale et temporelle des précipitations.

Bornstein et Lin (2000) ont analysé les données d'un réseau de mesures à Atlanta et dans sa région durant une période de l'été 1996. Six cas d'averses convectives estivales ont été étudiés. Pour trois orages induits par la ville, ils ont mis en avant les liens temporels et spatiaux entre la localisation de l'îlot de chaleur urbain, la zone de convergence induite par celui-ci, et les averses orageuses provoquées.

Atkinson (1971) a mené une étude à Londres (Royaume-Uni) pour étudier le passage d'un orage sur une zone urbaine le 9 septembre 1955. L'auteur suggère que lorsque les nuages sont arrivés sur la ville, l'air chaud et humide du centre urbain a été attiré vers la circulation des masses d'air et cela a causé finalement une aggravation de la perturbation et de fortes précipitations.

Guo *et al.* (2006), à partir de modélisations tenant compte ou non du caractère urbain (rugosité, albédo, inertie thermique⁴⁰, humidité) de Pékin (Chine), ont également montré l'augmentation avec l'urbanisation des phénomènes de précipitations convectives extrêmes et des orages. La distribution des pluies est également perturbée à l'intérieur et autour de la ville.

La ville perturbe principalement la circulation convective des masses d'air. Son influence est ainsi marquée sur les phénomènes violents comme les fortes averses, les orages ou encore les chutes de grêle. Les journées d'orage peuvent ainsi augmenter de 20 à 30% (Duchêne-Marullaz, 1980).

L'influence des agglomérations sur les précipitations est plus marquée, nous l'avons vu, pour les villes situées sous le vent et à une distance de l'agglomération pouvant être supérieures à 40 km. Ceci s'explique par plusieurs raisons. Les précipitations nécessitent un apport de vapeur d'eau et la présence de noyaux de condensation pour la formation des gouttelettes puis des gouttes. Il est également nécessaire d'avoir un mouvement ascendant suffisamment puissant pour que la coalescence puisse avoir lieu. Le temps que les différents processus se déclenchent, la masse d'air s'est déplacée et les effets sont constatés plus loin, sous le vent de l'agglomération. Comme le signale Duchêne-Marullaz (1980), « *les noyaux de condensation qui sont apportés par la pollution ne suffisant pas à déclencher le processus : c'est en fait la*

⁴⁰ L'inertie thermique est la capacité d'un corps à stocker de la chaleur et se caractérise par la capacité thermique.

turbulence d'origine thermique et celle d'origine mécanique produites par la ville qui constituent les causes essentielles de ce phénomène. »

La variation saisonnière de l'influence de l'urbanisation sur la pluviométrie peut s'expliquer, comme le signale Escourrou (1981) et Cantat (1987, 1989), par la stabilité de la masse d'air. Ainsi, par temps stable, comme c'est souvent le cas en hiver pour l'agglomération parisienne, l'action de l'urbanisation est peu sensible. En revanche lors du passage d'une masse d'air instable, comme c'est le cas régulièrement en été pour le bassin parisien, l'urbanisation joue en quelques sortes le rôle d'un catalyseur. En effet, lors du passage de la masse d'air au dessus du centre urbain, l'instabilité est renforcée car la convection est accrue par l'îlot de chaleur urbain et par l'effet de rugosité, le vent étant freiné par les constructions et créant alors un mouvement ascendant d'air. La conséquence est un renforcement des précipitations convectives telles que les averses orageuses.

V.6 Variations journalières et saisonnières de l'intensité des modifications climatiques

L'îlot de chaleur urbain ou, plus généralement, le climat urbain ne sont pas une condition constante. Ils subissent une double fluctuation, journalière et saisonnière. Ces variations peuvent s'observer sur le comportement des masses d'air au sein de la couche limite atmosphérique (CLA).

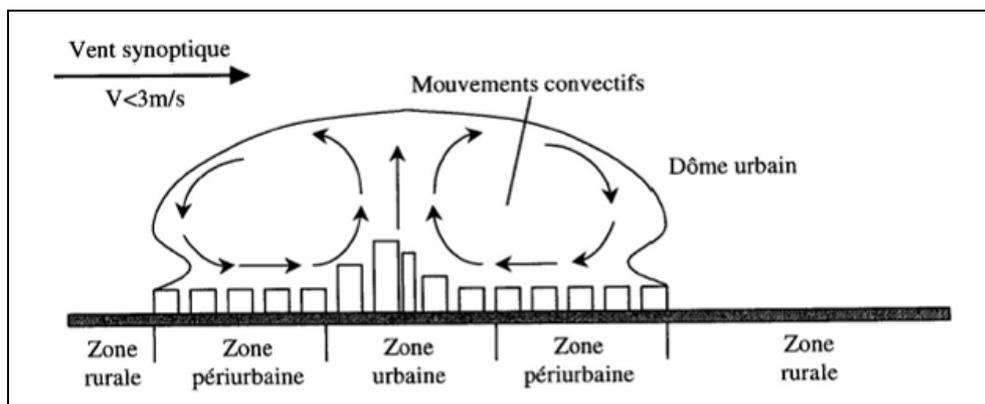


Figure 26 : Le « dôme » urbain : structure verticale de l'atmosphère pour des vents inférieurs à 3 m/s (Ringebach (2004), d'après Mestayer et Anquetin (1995)).

Par exemple, lors d'une journée ensoleillée avec un vent faible, la surface urbaine s'échauffe et un fort îlot de chaleur se forme. Il peut alors se créer une circulation comparable à une brise thermique, c'est-à-dire que les masses d'air plus fraîches de la campagne environnante

pénètrent dans la ville et un mouvement ascensionnel se crée (figure 26). Cette circulation peut durer quelques heures et atteindre 2 à 3m/s (Duchêne-Marullaz, 1980).

Lorsque la surface urbaine est échauffée, et transfère une chaleur importante à l'air en contact avec elle, une turbulence thermique (convection libre) se créée (figure 27) et des tourbillons de différentes tailles apparaissent. Cette situation facilite la dispersion des polluants (LEROYER, 2006), mais dans une telle situation de surface surchauffée, la CLA est dite instable.

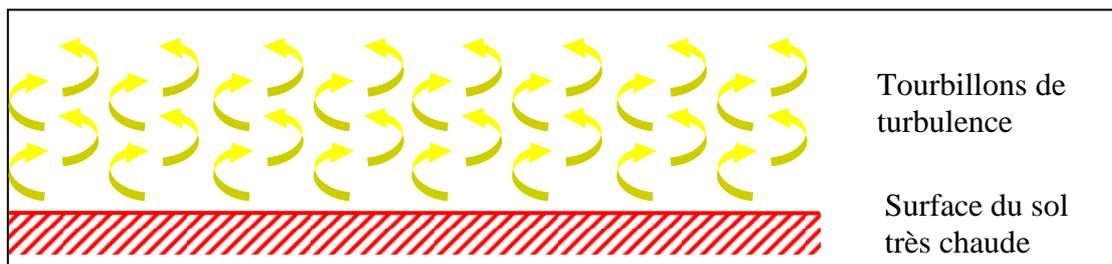


Figure 27 : Turbulence thermique au contact d'une surface surchauffée.

La CLA est dite stable quand la surface est plus froide que l'atmosphère. Cette situation apparaît généralement peu avant le coucher du soleil avec la diminution du rayonnement solaire et donc du réchauffement du tissu urbain (Leroyer, 2006). La hauteur de la CLA tend alors à diminuer durant la nuit avec le refroidissement de la surface.

La CLA peut également être neutre. Cette situation, qui signifie que la surface et l'atmosphère sont à la même température, est plutôt rare. La CLA se rapproche de la neutralité lors de la transition entre stabilité et instabilité, ou encore en cas de vent fort ou lorsque la couverture nuageuse, et donc la faible quantité de rayonnement solaire, réduit le réchauffement de la surface (Leroyer, 2006).

Selon Landsberg (1981), le vent est le paramètre météorologique qui a la plus grande influence sur le développement de l'îlot de chaleur urbain nocturne. La présence d'un vent fort peut ainsi tendre à faire disparaître l'îlot de chaleur urbain, de jour comme de nuit. Pour l'agglomération parisienne, Cantat (2004) estime que la vitesse limite entre présence et absence d'un îlot de chaleur est de 7m/s, pour Dettwiller (1978), la valeur serait plutôt de 11m/s. Oke et Hannell (1970) ont mis en relation cette vitesse limite (U_{lim}) avec la taille de la ville, ou plus précisément sa population (P) :

$$U_{lim} = 3,4 \log P - 11,6 \quad (\text{m/s}) \quad (\text{Formule 13})$$

Pour une population de 9,6 millions d'habitants, ce qui correspond à la population de l'agglomération parisienne lors du recensement de 1999 (Atelier Parisien d'Urbanisme, 2001), cette formule donne une vitesse limite d'environ 12 m/s. Cette formule est cependant « pertinente » uniquement parce qu'une relation existe globalement entre population et densité bâtie.

Par vent moyen (au-dessus de 3 m/s), la CLA prend la forme d'un panache (figure 28), et l'influence de l'agglomération est alors ressentie par les villes se trouvant sous le vent de l'agglomération.

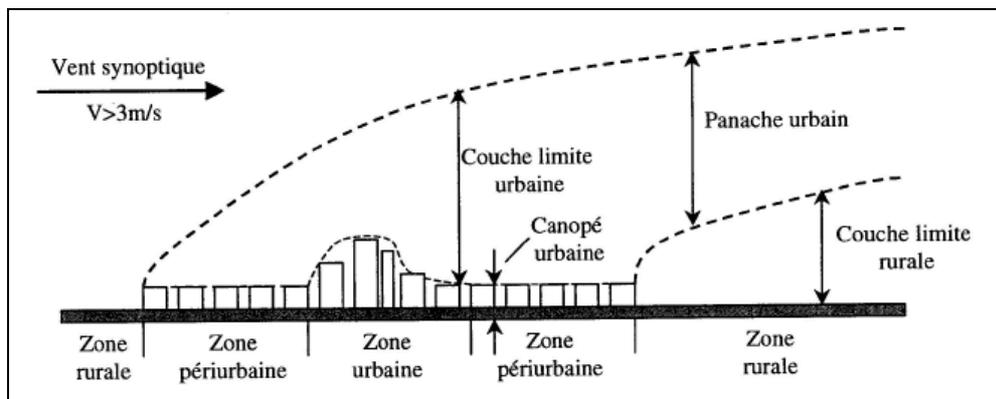


Figure 28 : Le « panache » urbain : structure verticale de l'atmosphère urbaine pour des vents supérieurs à 3m/s (Ringebach (2004), d'après Mestayer et Anquetin (1995)).

Ces différents comportements sont en relation directe avec les variations journalières et saisonnières du climat urbain. Cantat (2004) s'est intéressé plus particulièrement à l'îlot de chaleur parisien selon les types de temps. Il démontre l'importance de ne pas prendre en considération uniquement les valeurs moyennes des paramètres climatiques qui masquent le rôle joué par la météo de la journée. En effet, la fluctuation journalière de l'îlot de chaleur urbain s'exprime par les températures minimales (nuit) et maximales (jour).

Le contraste entre la ville et le milieu rural qui l'entoure est ainsi dépendant des conditions météorologiques. A Paris (Cantat, 2004), comme à Lodz en Pologne (Klysiak et Fortuniak, 1999), les conditions favorables à la formation d'un fort îlot de chaleur apparaissent plus fréquemment en été. A cette fluctuation saisonnière s'ajoute la fluctuation journalière (Cantat, 2004. Klysiak et Fortuniak, 1999. Huang *et al.*, 2007) et le contraste apparaît ainsi particulièrement les nuits d'été.

La fraction d'insolation dans la journée et la vitesse du vent sont les variables météorologiques qui influent le plus sur le différentiel de températures entre le centre de l'agglomération et la campagne environnante (Cantat, 2004). Pour Escourrou (1991), « *L'intensité de l'îlot de chaleur dépend de la vitesse des vents : à Paris, durant l'hiver 1977-1978, les écarts [de températures « instantanées »] entre Villacoublay en banlieue, à peine touchée par l'urbanisation à cette époque, et la station de la tour Saint-Jacques, au centre de Paris, étaient les suivants :*

| Vitesse du vent à Villacoublay | Ecart |
|--------------------------------|--------|
| 1m/s | -4,5°C |
| 2m/s | -3,4°C |
| 3m/s | -3,4°C |
| 4m/s | -2,6°C |
| 5m/s | -2,2°C |

Au-dessus de 5m/s l'écart est négligeable. »

En observant l'intensité de l'îlot de chaleur urbain nocturne parisien entre 1990 et 1999 (figure 29), Cantat (2004) s'est aperçu que pour les 50 décades (10 jours de suite) aux îlots de chaleur urbains les plus forts, l'été présente 34% des situations, contre 6% pour l'hiver (28% en automne et 32% au printemps). Inversement, pour les 50 décades aux îlots de chaleur urbains les plus faibles, l'hiver présente 56% des cas contre 8% en été (20% en automne et 16% au printemps).

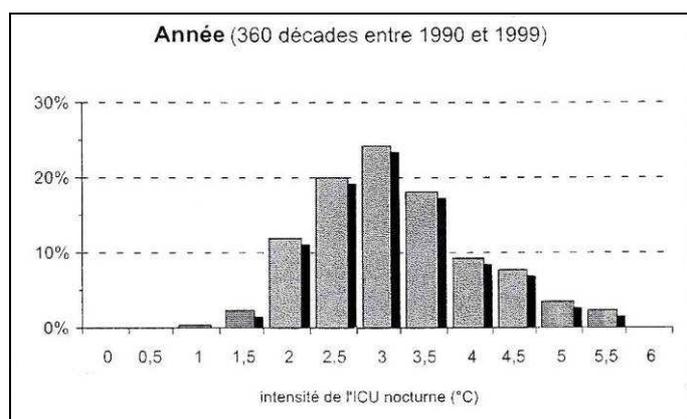


Figure 29 : Distribution décadaire de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain nocturne entre 1990 et 1999 (différences des températures minimales entre Paris-Saint-Jacques et Melun moyennées pour chaque décade) (Cantat, 2004).

Cette étude de Cantat (2004) permet de conclure que « *la diversité des configurations de l'îlot de chaleur urbain repose donc sur la complexité des interrelations entre :*

- *des données géographiques stables (situation, site, type d'urbanisation...)* ;
- *des données végétales et atmosphériques déterminées par des évènements cycliques (saisons)* ;
- *des données atmosphériques aléatoires (types de circulation et type de temps).* »

L'importance de l'îlot de chaleur urbain varie donc en fonction du temps, de la météo, et la fraction d'insolation et la vitesse du vent sont les deux paramètres météorologiques qui interviennent le plus dans l'apparition d'un îlot de chaleur et dans son intensité. « *La concomitance d'un ciel clair et d'un vent faible entraîne des écarts parfois supérieurs à 10°C la nuit ; inversement l'îlot de chaleur urbain peut disparaître presque totalement par ciel couvert et vent fort.* » (Cantat, 2004).

VI Rôle de différents facteurs dans la formation du climat urbain

Les deux chapitres précédents ont exposé les différents processus radiatifs, thermiques, énergétiques, dynamiques ou encore hydrologiques à l'origine de la formation du climat urbain. L'objectif de ce chapitre est de présenter plus spécifiquement quelles modifications climatiques sont engendrées par chacune des différences physiques entre milieux urbains et « ruraux ».

En effet, comme le signalent 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 30). « *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).

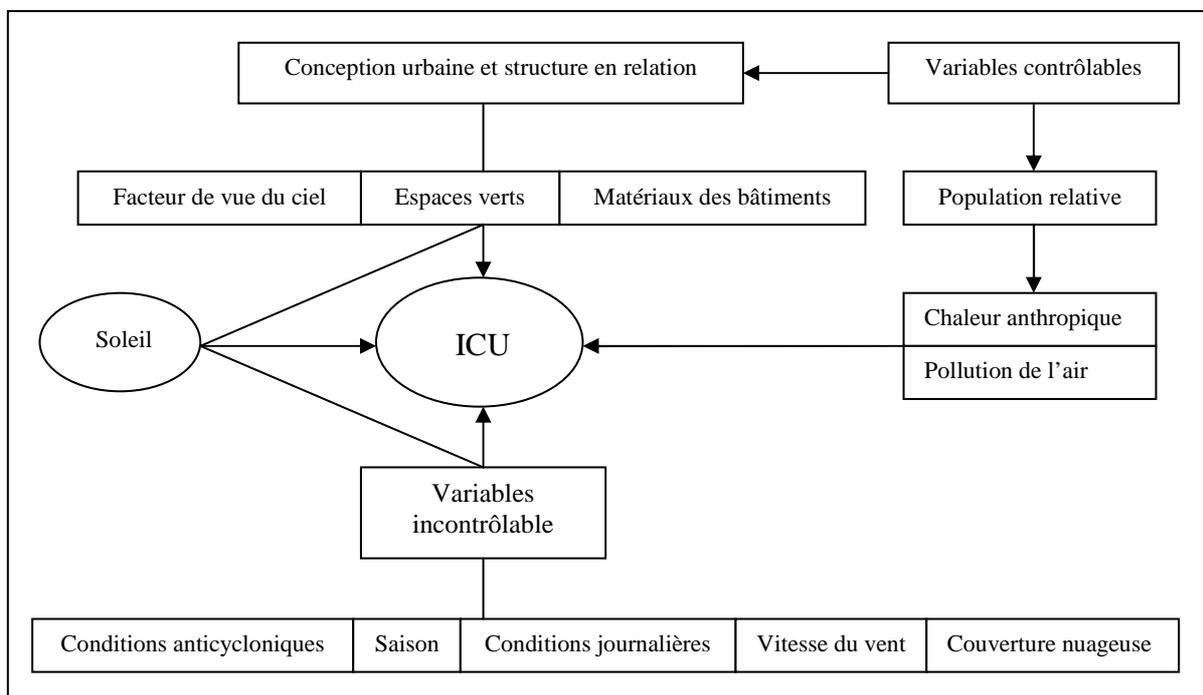


Figure 30 : Formation de l'îlot de chaleur urbain (D'après Rizwan *et al.* (2008)).

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.

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, 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 vitesse 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.

Nous nous attachons donc ici à évaluer le rôle des différents « facteurs urbains », et donc contrôlables, dans la formation du climat urbain. Ces différents facteurs urbains 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, nous le verrons, 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.

De nombreux auteurs se sont intéressés à l'influence de ces facteurs sur le climat urbain et nous allons exposer ici ces différents résultats. L'objectif n'est pas de proposer une nouvelle classification de différents aménagements urbains (cf. annexe 7) selon leur influence sur le climat local mais d'essayer de distinguer les facteurs influents et très influents.

VI.1 Couche superficielle du sol

La nature de la surface urbaine, avec sa part de sols minéralisés, de sols nus, enherbés ou végétalisés, et de surfaces d'eau joue un rôle important dans l'intensité des modifications climatiques. Nous allons regarder plus précisément ici l'influence des surfaces végétales (composées de végétaux qui peuvent être des arbres, des arbustes, des herbes, des fleurs, etc.) et des surfaces d'eau.

VI.1.1 Surfaces végétales

La végétation est un facteur du climat (Pagney, 2000). Grâce à l'ombre qu'elle peut procurer et aux phénomènes d'évapotranspiration qu'elle génère, elle est source d'humidité et de rafraîchissement. Selon la nature de l'espace vert (parcs, squares, rues plantées) et la nature des végétaux (arbres, arbustes, pelouse, etc. de différentes espèces), les effets ne seront bien sûr pas identiques et son influence, avant tout localisée au niveau de l'espace vert, peut se sentir au-delà par le biais des mouvements de masses d'air.

L'effet « oasis » provoqué par les espaces verts a par exemple été mis en évidence dans les mesures effectuées à Valence (Espagne) où une diminution de 2,5°C au sein du parc de Viveros de 20 ha est constatée par rapport au maximum mesuré en milieu urbain (Gomez *et al.*, 1998).

Au sein d'un article de Gomez *et al.* (2001) présentant l'amélioration, particulièrement en été, des conditions climatiques et du confort au sein des espaces végétalisés (pelouses, buissons, rues avec alignement d'arbres, etc.), l'étude de Stülpnagel (1987) est citée. Cette dernière montre qu'il faut 10ha d'espace vert pour perdre 1°C, 50ha pour 2°C et 200ha pour 3°C.

Une étude effectuée par Taha (1996) (et présentée par Akbari (2001)) a simulé l'impact météorologique de programme d'implantation d'arbres à grande échelle dans dix villes américaines (Atlanta, Chicago, Dallas, Houston, Los Angeles, Miami, New York,

Philadelphia, Phoenix, et Washington). Le tableau suivant (tableau 7) montre le nombre d'arbres plantés en plus dans chaque ville et l'impact sur la température de l'air. Le nombre d'arbres plantés dans les cellules varie de quelques centaines à plus d'une dizaine de milliers. La réduction maximale de la température de l'air pour la cellule la plus chaude des différentes villes (a priori le centre) varie de 1 à 3°C.

Tableau 7 : Nombre d'arbres plantés dans chaque zone métropolitaine et leurs effets simulés sur la réduction des températures ambiantes d'après Taha (1996) (Akbari, 2001).

| Location | Millions of additional trees in the simulation domain | Millions of additional trees in the metropolitan area | Max air temperature reduction in the hottest simulation cell (°C) |
|----------------|---|---|---|
| Atlanta | 3.0 | 1.5 | 1.7 |
| Chicago | 12 | 5.0 | 1.4 |
| Los Angeles | 11 | 5.0 | 3.0 |
| Fort Worth | 5.6 | 2.8 | 1.6 |
| Houston | 5.7 | 2.7 | 1.4 |
| Miami | 3.3 | 1.3 | 1.0 |
| New York City | 20 | 4.0 | 2.0 |
| Philadelphia | 18 | 3.8 | 1.8 |
| Phoenix | 2.8 | 1.4 | 1.4 |
| Washington, DC | 11 | 3.0 | 1.9 |

Dans certaines conditions climatiques favorables (soleil notamment), l'évapotranspiration peut générer une forme « d'oasis » qui est 2 à 8°C plus fraîche que le milieu environnant (Taha, 1997a).

Pour Bernatzky (1982), les arbres et les espaces végétalisés contribuent de façon importante à l'amélioration du climat « artificiel » des villes. Ils diminuent selon lui considérablement la température par le biais de l'évaporation et peuvent permettre une ventilation de la ville surchauffée, sale et polluée et offrir ainsi un air frais. Alors que pour une forêt de hêtres 83,8% de l'énergie reçue sert à l'évaporation, dans une ville, 60% de cette énergie sert à réchauffer l'air. Les parcs peuvent filtrer selon Bernatzky (1982) jusqu'à 80% de la pollution de l'air et les arbres des avenues jusqu'à 70% et sans leurs feuilles (en hiver), les plantes peuvent conserver jusqu'à 60% de leur efficacité.

Selon Wilmers (1988), les deux aspects négatifs du climat urbain sont l'îlot de chaleur urbain (la « surchauffe » de la ville) et la pollution de l'air. Ils peuvent tous deux être corrigés par les espaces végétalisés. Wilmers (1988) constate cependant que l'effet d'un espace vert, aussi grand soit-il, ne se constate que sur une relativement faible distance.

Oke (1979) a étudié le bilan d'énergie d'une pelouse en zone suburbaine de Vancouver (Canada) durant le mois d'août 1978. La pelouse (d'une surface d'environ 160m²) était

constituée d'un gazon ras et avait été arrosé antérieurement à l'expérience. Elle était bordée au sud par une maison à deux étages, à l'ouest et au nord par des haies denses de 1m50 de haut et à l'est par une ligne d'arbres conifères de 15-20m de haut. Au-delà de la haie situé au nord, il y avait un trottoir, un boulevard avec de la pelouse et des arbres de 4m de haut et une route de 7m de large. Dans un terrain non homogène, l'advection d'air plus chaud et/ou plus sec venant de zones d'où vient le vent permet d'augmenter les taux d'évapotranspiration et de créer un effet oasis. L'expérience effectuée par Oke (1979) confirme cela et montre bien un régime d'évapotranspiration supérieure à la normale, ce qui peut donc s'expliquer par l'advection de chaleur sensible des surfaces voisines.

Cette étude de Oke (1979) permet en partie de mieux comprendre pourquoi, selon Dieter Scherer, climatologue à l'Université Technique de Berlin, « *les réseaux d'espaces verts de petite et de moyenne surface sont beaucoup plus efficaces pour refroidir nos chaudes nuits d'été* » que les grands parcs (Manin, 2007), les premiers étant soumis proportionnellement à leur surface à un apport en chaleur sensible de la part des surfaces voisines plus important. Les études actuellement menées par le l'équipe du professeur Scherer concernent également les toitures végétalisées : « *alors qu'ils constituent généralement de bons refroidisseurs, les toits verts lorsqu'ils sont secs deviennent de véritables pièges à énergie solaire et redistribuent davantage de chaleur à l'air ambiant que la même surface en béton. Ainsi, les espaces verts permettent de refroidir les nuits urbaines tant qu'ils sont suffisamment irrigués. Il est toutefois à noter que cette fraîcheur ne peut être transmise que dans un rayon de 300 mètres et que seules les maisons situées à moins de 100 mètres du parc profitent d'un vent frais nocturne. Il apparaît donc clair que plus d'habitations pourraient profiter de ce coup de frais si les réseaux de petits espaces verts d'au moins 1 hectare étaient préférés aux grands parcs. En outre, le refroidissement n'étant pas optimal lorsque l'air frais dégagé par les surfaces vertes ne peut pas circuler, il est important de concevoir des parcs à végétation variée, associant prés mais aussi arbres et arbustes afin que l'air frais puisse y tourbillonner.* » (Manin, 2007)

L'étude de Oke (1979) permet également d'éclairer pourquoi la réduction de l'évaporation est différente selon la part de surface minéralisée, l'augmentation des taux d'évapotranspiration des espaces végétalisés grâce à l'advection d'air chaud issu des surfaces minérales, ayant, en quelques sortes, un seuil. Escourrou (1981) estime en effet que pour 25% de surface imperméable la réduction doit être de 19%, pour 38% de 50% et pour 59% de 75%.

VI.1.2 Surfaces d'eau

L'impact de l'eau sur le climat urbain résulte de deux phénomènes : l'évaporation de l'eau et le rafraîchissement de l'air au contact de l'eau. Des sources d'eau isolées, comme les fontaines, ont un effet ponctuel et la petitesse de la surface d'eau n'entraîne pas réellement un refroidissement de l'air. Seule la présence de grands jets d'eau permet de provoquer des effets d'humidification et de refroidissement notables (Benzerzour, 2004).

En ce qui concerne les étendues importantes d'eau comme les rivières, les fleuves ou les mers, celles-ci peuvent influencer de façon notable non seulement leur environnement immédiat (comme pour les surfaces d'eau ponctuelles) mais aussi l'ensemble des composantes du climat local par le biais par exemple des brises de mer, comme nous l'avons présenté au chapitre précédent.

VI.2 Activités humaines

Les activités humaines sont à la fois sources de pollution atmosphérique et de rejets de chaleur.

VI.2.1 Activités polluantes

L'atmosphère des villes, par rapport aux milieux ruraux, peut contenir, selon Escourrou (1981), dix fois plus de particules de poussières et jusqu'à 25% de molécules de gaz, modifiant ainsi la transparence de l'air et certains caractères du climat urbain. En effet, la pollution atmosphérique entraîne une modification de la composition atmosphérique qui a plusieurs conséquences :

- une diminution du rayonnement direct du soleil,
- une augmentation du rayonnement diffus,
- une diminution du rayonnement global solaire malgré une durée plus longue d'insolation⁴¹,
- une transformation par les poussières et les aérosols du rayonnement direct en infrarouges provoquant une légère élévation de la température,
- une augmentation de l'effet de serre puisqu'elle limite les déperditions du rayonnement du substratum vers l'atmosphère.

⁴¹ La durée d'insolation désigne la somme des intervalles de temps durant lesquels un objet, un lieu est soumis à une insolation au cours d'une période donnée que l'on choisit, sauf indication contraire, comme égalant un jour entier, soit 24 heures à partir de minuit. Il ne faut pas la confondre avec la durée géographique d'insolation appelée également durée topographique d'insolation qui correspond aux lever et coucher de soleil. (Météo-France).

- Une augmentation des noyaux de condensation autour desquels s'accumule la vapeur d'eau, pouvant provoquer notamment du brouillard en cas de forte pollution (*Smog* en anglais).

L'influence de la pollution atmosphérique est donc multiple avec parfois des effets opposés sur le bilan radiatif. La pollution est néanmoins un aspect très négatif du milieu urbain contre lequel il est nécessaire de prendre des mesures. Sans aller plus loin, nous signalerons que la dispersion des polluants, et donc la pollution atmosphérique, sont très liées au climat urbain, puisque la vitesse et la turbulence du vent, qui participent à la dispersion, sont très influencées par la morphologie du bâti et le réseau des rues (orientation).

VI.2.2 Sources de chaleur

L'îlot de chaleur urbain est influencé par les rejets de chaleur d'origine anthropique (voitures, chauffage, climatisation, industries, métabolisme humain, etc.).

Pour estimer le rôle joué par ces rejets de chaleur anthropique dans la formation de l'îlot de chaleur urbain, Fan et Sailor (2005) ont simulé et comparé le climat de Philadelphie (Etats-Unis) en intégrant et en omettant la chaleur anthropique. Les simulations sans prise en compte de la chaleur anthropique sous-estiment, comme il est possible de le prévoir, les températures de l'air en milieu urbain. La chaleur anthropique a un rôle important dans la formation de l'îlot de chaleur urbain, et ce particulièrement durant la nuit et l'hiver. Les simulations effectuées montrent ainsi que la chaleur anthropique contribue en hiver à Philadelphie à hauteur de 2-3°C à l'îlot de chaleur urbain nocturne. Le flux de chaleur anthropique varie en été de 20 W.m⁻² la nuit à 50 W.m⁻² le jour, et en hiver de 35 W.m⁻² la nuit à 85 W.m⁻² le jour. Le rayonnement solaire est de 700 W.m⁻² en été et de 460 W.m⁻² en hiver.

L'influence de la chaleur anthropique a également été étudiée pour plusieurs quartiers très denses de Tokyo (Japon) par Ichinose *et al.* (1999), qui ont également été mis en avant le cas particulier de la nuit. Les valeurs divergent cependant par rapport à Philadelphie, ce qui s'explique en partie par les différences de densité bâtie (Tokyo a une densité bâtie beaucoup plus importante que Philadelphie). En été, le rayonnement de courtes longueurs d'onde atteint son maximum de 800 W.m⁻² vers midi et durant la journée la chaleur anthropique est en moyenne de 200 W.m⁻² (elle est plus faible la nuit). En hiver, le rayonnement de courtes longueurs d'onde a son maximum aux alentours de 550 W.m⁻² et la chaleur anthropique atteint son maximum de 400 W.m⁻² vers 8h. Ichinose *et al.* (1999) ont modélisé des situations avec et sans flux de chaleur d'origine anthropique. En été, les différences entre les deux

situations étaient faibles durant la journée mais augmentaient rapidement du milieu de l'après-midi jusqu'à dans la nuit pour atteindre un maximum de 1,5°C vers 20h (la situation la plus chaude étant bien sur celle avec la prise en compte du flux de chaleur d'origine anthropique). Bien que le flux de chaleur anthropique soit plus important en journée, son influence se fait ressentir de façon plus importante la nuit. Les modélisations pour la situation hivernale ont montré des différences de températures plus conséquentes qu'en été entre le cas avec prise en compte du flux de chaleur anthropique et celui sans. La différence était particulièrement importante durant la période entre le milieu de l'après-midi et deux heures du matin, avec un maximum d'environ 2,5°C à 21 heures.

Taha (1997a) a présenté quelques résultats d'une étude effectuée précédemment par Taha *et al.* (1992b). Ces derniers ont développé un profil journalier des rejets de chaleur anthropique en estimant, à partir des consommations d'énergie, la chaleur rejetée par les bâtiments et les véhicules. Ce profil a ensuite été introduit au sein d'un modèle météorologique pour estimer l'impact du flux de chaleur anthropique (Q_F) sur les températures de l'air. Ces simulations météorologiques ont montré 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. Les simulations indiquent également qu'au sein des zones résidentielles de banlieue, du fait d'un faible Q_F , l'impact de ce dernier sur les températures est négligeable. Taha ne le précise pas au sein de son article mais il s'agit sans doute de modélisations effectuées pour une ville américaine.

L'îlot de chaleur urbain est présent, nous l'avons vu, 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. Cependant on notera qu'en hiver cette énergie anthropique peut être plus importante que l'apport solaire alors qu'en été elle constitue moins de 15% de l'énergie totale reçue par le milieu urbain.

Les pertes thermiques des bâtiments dues au chauffage sont intimement liées aux propriétés des matériaux et à la conception des bâtiments. Comme le signale Givoni (1998), les propriétés des matériaux du bâtiment gouvernent la relation entre la température moyenne intérieure des bâtiments, la variation et la tendance de la température extérieure de l'air. Trois propriétés de l'enveloppe du bâtiment gouvernent cette relation : la conduction de la chaleur au travers de l'enveloppe, la capacité thermique et l'absorption (ou réflexion) de l'énergie solaire atteignant l'enveloppe. La conductivité thermique, la chaleur spécifique et la densité des matériaux, ainsi que l'épaisseur des éléments du bâtiment permettent de qualifier ces deux

premières propriétés. La réponse au rayonnement solaire est déterminée par l'absorptivité de la surface (ou, à l'inverse, son albédo), qui dépend principalement de la couleur extérieure et des conditions d'ombre.

VI.3 Structure urbaine

La structure urbaine, qui comprend à la fois la morphologie, la géométrie, la forme du cadre bâti, ainsi que les matériaux utilisés pour la construction des bâtiments et des différentes infrastructures urbaines, a une large influence, comme nous allons le voir, sur le climat urbain.

VI.3.1 Morphologie du cadre bâti

Comme nous l'avons présenté dans le premier chapitre de cette partie, la morphologie ou géométrie urbaine accroît l'absorption du rayonnement solaire du fait des multiples réflexions, réduit les transferts hors du canyon des flux de chaleur sensible et diminue les pertes de rayonnements infrarouges du fait de l'effet écran des murs des bâtiments. Elle influence ainsi le climat urbain et modifie l'albédo global de la ville en piégeant le rayonnement.

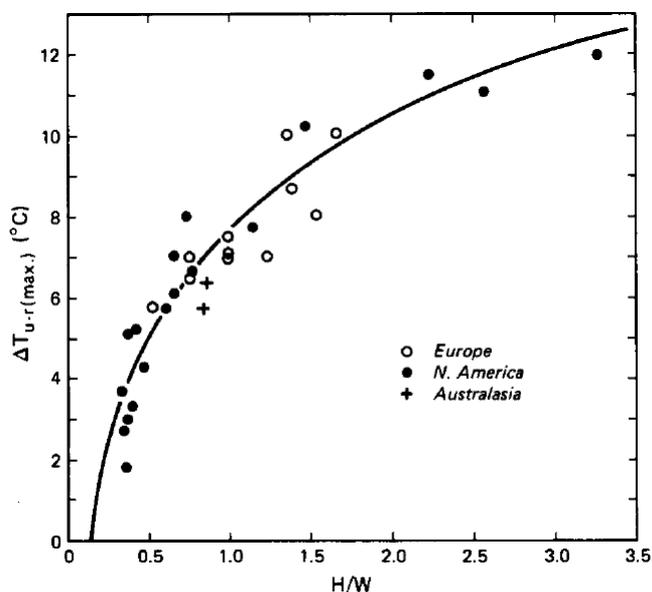


Figure 31 : Relation empirique entre la géométrie du canyon urbain (H/W dans le centre urbain) et l'intensité maximale de l'îlot de chaleur ($\Delta T_{u-r(max)}$) (Oke, 1988).

Pour décrire la géométrie des rues, le rapport H/W (avec H la hauteur des bâtiments et W la largeur de la rue), qui correspond au prospect des rues, ou encore le facteur de vue du ciel, sont utilisés.

Oke (1988) relie par exemple le rapport H/W à l'intensité maximale nocturne de l'îlot de chaleur ($\Delta T_{u-r(max)}$) pour trente villes principalement de moyennes latitudes (figure 31). Il montre que la formule 5, présentée précédemment, permet de décrire cette relation. Cette équation est : $\Delta T_{u-r(max)} = 7,54 + 3,97 \ln(H/L)$

On notera que la forme logarithmique indique qu'il est possible de contrôler considérablement l'îlot de chaleur avec de petits changements dans la géométrie du canyon pour les valeurs faibles de H/W .

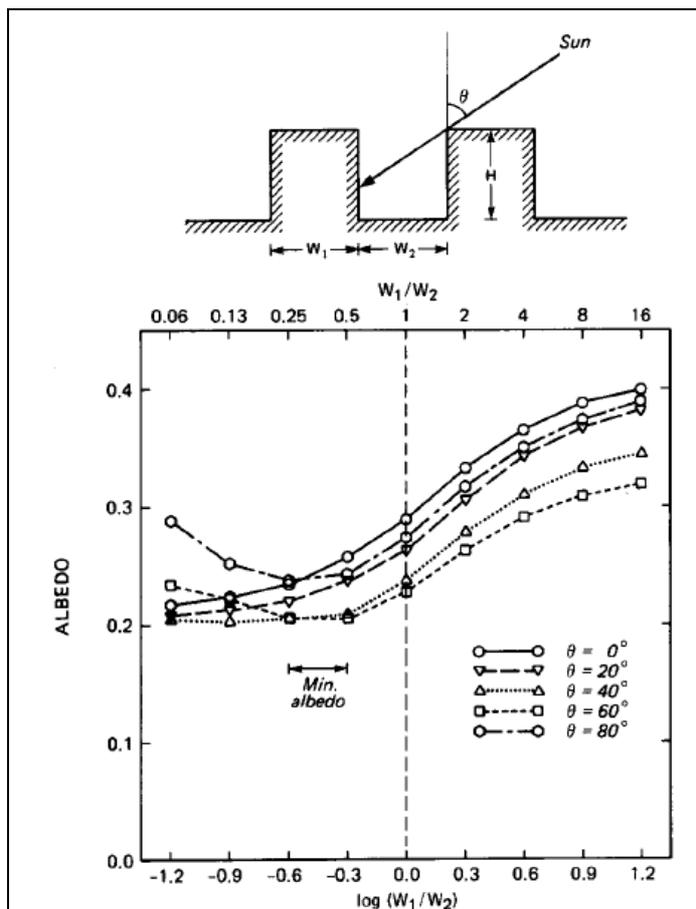


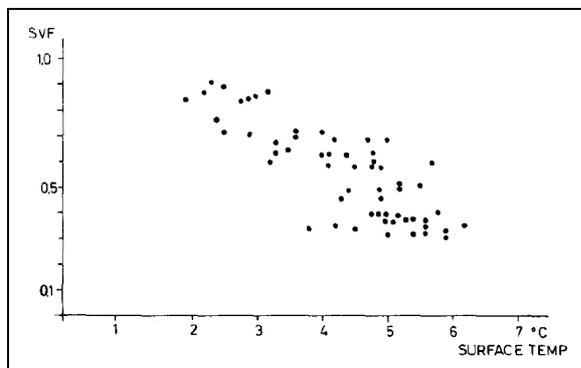
Figure 32 : Influence de la géométrie urbaine, décrite par le ratio W_1/W_2 , et de l'angle du soleil θ sur l'albédo global. Fondée sur des simulations avec $H/W_2 = 1,0$ (Oke (1988), d'après Aida et Gotoh (1982)).

La géométrie urbaine à une influence directe, nous l'avons dit, sur l'albédo total de la ville. En effet, l'albédo total du système urbain dépend à la fois des albédos des matériaux qui le composent et de la géométrie du cadre bâti. Ainsi pour des bâtiments de même hauteur, l'albédo d'une surface crénelée est plus faible que celui d'une surface plane composé du même matériau (Oke, 1988). Cet effet augmente avec la latitude et est plus prononcé lors des

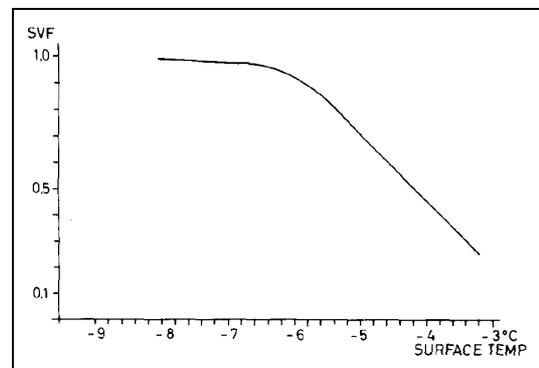
saisons où le soleil est bas. De plus, il augmente avec H/W et est plus important dans des rues canyons orientées est-ouest que nord-sud (Oke, 1988).

L'étude de Aida et Gotoh (1982), citée par Oke (1988), relie l'albédo de différents canyons au ratio W_1/W_2 où W_1 est la largeur des bâtiments et W_2 la largeur de la rue (figure 32).

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 croître, plus ou moins fortement selon la ville, avec la diminution du facteur de vue du ciel.



Relation entre le facteur de vue du ciel (SVF) pour 58 rues canyon de Göteborg (Suède) et la température de surface mesurée par le biais d'une thermographie infrarouge. Les mesures ont été effectuées le 18 novembre 1987 entre 18h et 22h, par un temps clair et calme. Eliasson (1990/91)



Relation entre le facteur de vue du ciel (SVF) pour différents environnements urbain de Göteborg (Suède) et la température de surface mesurée par un radiomètre installé sur une voiture. Les mesures ont été effectuées le 2 décembre 1987 entre 17h et 20h, par un temps clair et calme. Eliasson (1990/91)

Figure 33 : Relation entre le facteur de vue du ciel et la température de surface (Eliasson, 1990/91).

Eliasson (1990/91, 1996) a également montré le lien entre la géométrie urbaine, et plus particulièrement le facteur de vue du ciel, et la température de surface (figure 33). La relation avec la température de l'air est plus délicate, les variations de températures de l'air entre les différents environnements urbains étant plus faibles.

VI.3.2 Matériaux de surface

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. Selon Santamouris (2005), Yap (1975) rapporte dans son article que les différences systématiques entre les émissivités des surfaces urbaines et rurales sont responsables d'une partie de l'îlot de chaleur. Oke *et al.* (1991), toujours selon Santamouris (2005), estime au contraire que le rôle de l'émissivité est mineur et met l'accent sur l'importance des propriétés thermiques des matériaux. Nous pourrions nous faire notre propre avis avec les modélisations présentées dans la troisième partie.

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. Des mesures de l'albédo et de la température de surface de plusieurs chaussées en béton bitumineux ont été effectuées dans la baie de San Francisco (Etats-Unis). Les albédos dépendent de l'âge de la chaussée. Le choix des chaussées pour les mesures s'est fait sur deux critères. Le premier était d'obtenir un large éventail de chaussées en béton bitumineux avec l'objectif de s'intéresser aux albédos de chaussées existantes. Le second était de contrôler l'influence du vieillissement sur l'albédo des chaussées. Les chaussées en béton bitumineux sont composées d'asphalte et d'un agrégat minéral (granulats) dont la proportion (en volume) est d'environ 15% et 85%, respectivement. L'asphalte est noir, avec un albédo d'environ 0,05, et il recouvre les particules de l'agrégat (majoritairement de couleur claire) dans l'objectif de les lier ensemble. Une nouvelle chaussée est donc complètement noire, mais lorsque l'asphalte disparaît sous l'effet du roulement, l'agrégat fait surface, apparaît et l'albédo se rapproche de l'albédo de l'agrégat. De plus, l'asphalte lui-même devient plus clair du fait de l'oxydation. Les mesures indiquent qu'une chaussée avec un béton bitumineux frais a un albédo d'environ 0,04 à 0,05. Les chaussées qui ont plus de cinq ans ont un albédo moyen de $0,12 \pm 0,03$.

Pomerantz *et al.* (2000) ont également mesuré la température de surface. La figure 34 montre les mesures horaires des températures de surface pour une chaussée ayant un albédo de 0,04 (courbe haute) et un de 0,16 (courbe basse). Les deux chaussées sont distantes de 2,6 km et les données ont été recueillies le 17 septembre 1998. L'écart entre les deux courbes est important et ne peut s'expliquer uniquement par la différence d'albédo entre les deux chaussées selon Pomerantz *et al.* (2000). Les conditions climatiques (vent, ombre, etc.) devaient être légèrement différentes modifiant ainsi l'historique du réchauffement par le soleil et du refroidissement par le vent des deux chaussées.

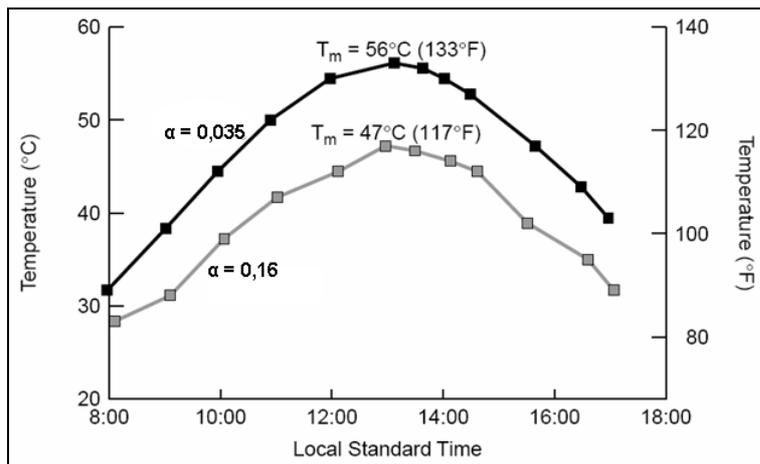


Figure 34 : Températures de surface de chaussées en béton bitumineux en fonction de l'heure pour deux albédos différents, Concord (Californie, Etats-Unis), le 17 septembre 1998 (Pomerantz *et al.*, 2000).

Pomerantz *et al.* (2000) ont également remarqué que la hausse ou la baisse de température de la chaussée ne suit pas de façon immédiate l'intensité du rayonnement solaire ; le pic de la température de la chaussée arrive au moins une heure après celui du rayonnement solaire. Globalement, leurs mesures montrent qu'une augmentation de l'albédo de 0,1 implique une diminution de la température de surface de la chaussée d'environ $-4 \pm 1^\circ\text{C}$ pour une insolation d'environ $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ et un vent faible. Avec le calcul, Pomerantz *et al.* (2000) obtiennent une diminution de la température de surface de la chaussée de -4°C pour une augmentation de l'albédo de 0,1. L'augmentation de la vitesse du vent diminue la température de surface ainsi que l'influence du changement de l'albédo.

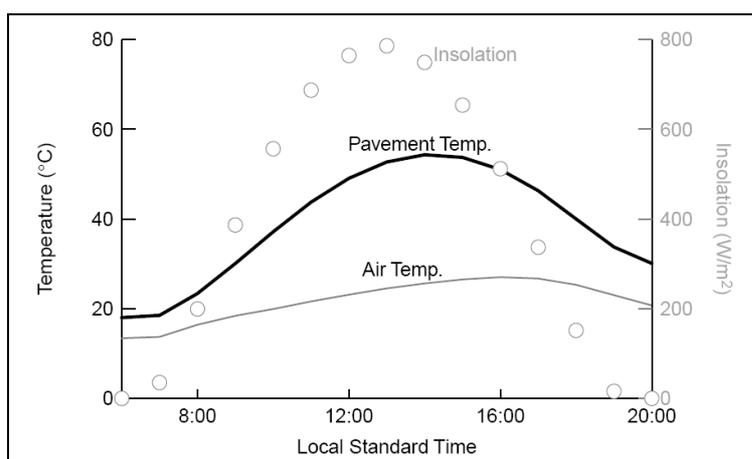


Figure 35 : Température de surface d'une chaussée, insolation et température de l'air en fonction de l'heure à San José (Californie, Etats-Unis) le 17 septembre 1997 (Pomerantz *et al.*, 2000).

La première étape dans le processus du réchauffement de l'air est le réchauffement de la surface. Pomerantz *et al.* (2000) se sont appuyés sur la loi de conservation de l'énergie et l'ont appliqué aux flux de chaleur à l'intérieur et à l'extérieur de la surface⁴². Leurs calculs leur ont permis d'obtenir les courbes de la figure 35. Ils montrent également que l'augmentation de l'albédo de 0,1 à 0,35 pour une ville entière peut permettre une diminution de la température de l'air de 0,6°C.

Asaeda *et al.* (1996) ont observé le comportement thermique du béton (albédo de 0,45 et conductivité thermique de 1,69 W.m⁻¹.°C), de l'asphalte (albédo de 0,10 et conductivité thermique de 0,74 W.m⁻¹.°C) et d'un sol nu. Ils ont mesuré la distribution des températures à différentes profondeurs dans le matériau, analysé les flux de chaleur à l'interface air/sol en été, mesuré le rayonnement infrarouge issu du matériau (L↑) et ce en effectuant le bilan énergétique à la surface de ces sols. Asaeda *et al.* (1996) partent du constat que le rayonnement infrarouge montant émis par le sol (L↑) est presque contrebalancé par le rayonnement infrarouge descendant atmosphérique (L↓) quand la différence de température entre l'air de l'atmosphère et celle de la surface du sol est faible. En revanche, quand la température de la surface du sol excède celle l'air, comme c'est le cas pour les surfaces chauffées, alors L↑ devient significativement plus important que L↓ et l'absorption de L↑ par la basse atmosphère peut devenir un composant significatif du bilan énergétique et contribuer ainsi au réchauffement local de la basse atmosphère.

Asaeda *et al.* (1996) ont choisi une surface plane et homogène ayant une exposition complète au rayonnement solaire. Les mesures ont eu lieu dans la zone suburbaine de Tokyo (Japon) durant deux périodes estivales (1990 et 1991) pour lesquelles la couverture nuageuse a été de moins de un tiers du ciel. Ont été mesurés la température à différentes profondeurs de la surface, le flux de chaleur à l'intérieur du béton et de l'asphalte, le rayonnement infrarouge montant émis par le sol (L↑), le rayonnement infrarouge descendant atmosphérique (L↓), le rayonnement solaire, la température de l'air à 1m50, la vitesse du vent à 1m50, l'humidité et la pression atmosphérique à 1m50, et l'humidité du sol. L'absorption du rayonnement infrarouge L↑ net a été pour sa part modélisée. La figure 36 montre les différents éléments ayant composé l'expérience.

⁴² Pour la chaussée, les valeurs suivantes ont été choisies : une émissivité $\epsilon = 0,9$, une densité $\rho = 2,3 \text{ g.cm}^{-3}$, une conductivité thermique $\lambda = 1,7 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$, et une capacité thermique $C = 0,74 \text{ KJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Le bilan d'énergie de la basse atmosphère dépend de la température de surface du sol, qui, en retour, est liée à la structure thermique (conductivité thermique) en-dessous la surface du sol. Les mesures effectuées montrent que la température de surface, la chaleur stockée et le rayonnement infrarouge ascendant ($L\uparrow$) sont plus importants de façon significative dans le cas de l'asphalte par rapport au béton et au sol nu.

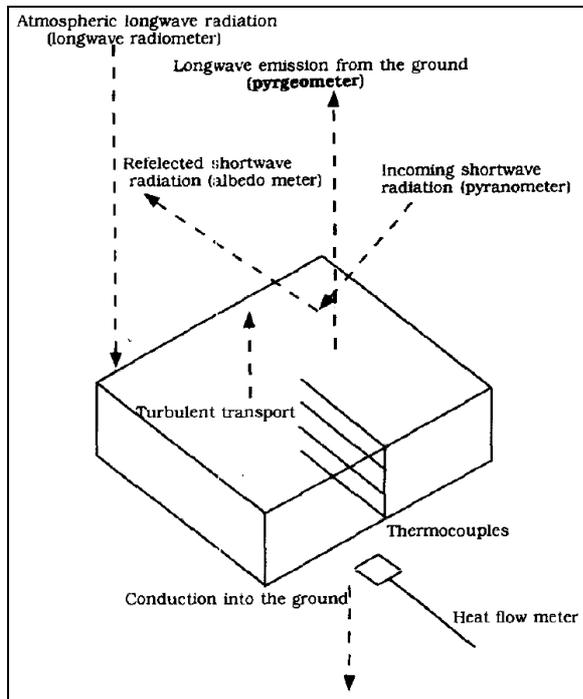


Figure 36 : Eléments composants l'expérience de Asaeda *et al.* (1996).

La température de surface de l'asphalte monte à plus de 60°C, ce qui est plus élevé de 15°C que celle du béton avec une surface noire. Cependant, comme on le voit sur la figure 37 (b), la température sous la surface de la couche d'asphalte diminue rapidement avec la profondeur et à 10 cm de profondeur la température de l'asphalte est presque la même que sous le béton ayant une surface noire. Ceci est dû au fait que la conductivité thermique du béton est plus du double de celle de l'asphalte et le flux de chaleur à la surface du béton à surface noire est rapidement conduit à l'intérieur du béton alors que dans le cas de l'asphalte, c'est principalement la couche à la surface qui est chauffée.

Le béton stocke ainsi une certaine quantité de chaleur (non négligeable) durant la journée du fait de sa conductivité thermique et garde une température de surface supérieure à celle de l'air durant la nuit contribuant ainsi au réchauffement de l'atmosphère, mais de façon moindre que l'asphalte grâce à son albédo plus important que celui de ce dernier.

Le transport turbulent de la chaleur sensible contribue directement au réchauffement de l'atmosphère. Comme on le voit dans la figure 38, le flux approche 350 W.m^{-2} pour l'asphalte et 200 W.m^{-2} pour le béton au moment le plus chaud de la journée.

La surface en asphalté émet au maximum 150 W.m^{-2} de rayonnement infrarouge en plus et au maximum 200 W.m^{-2} en chaleur par conduction au sein de la surface par rapport à un sol nu.

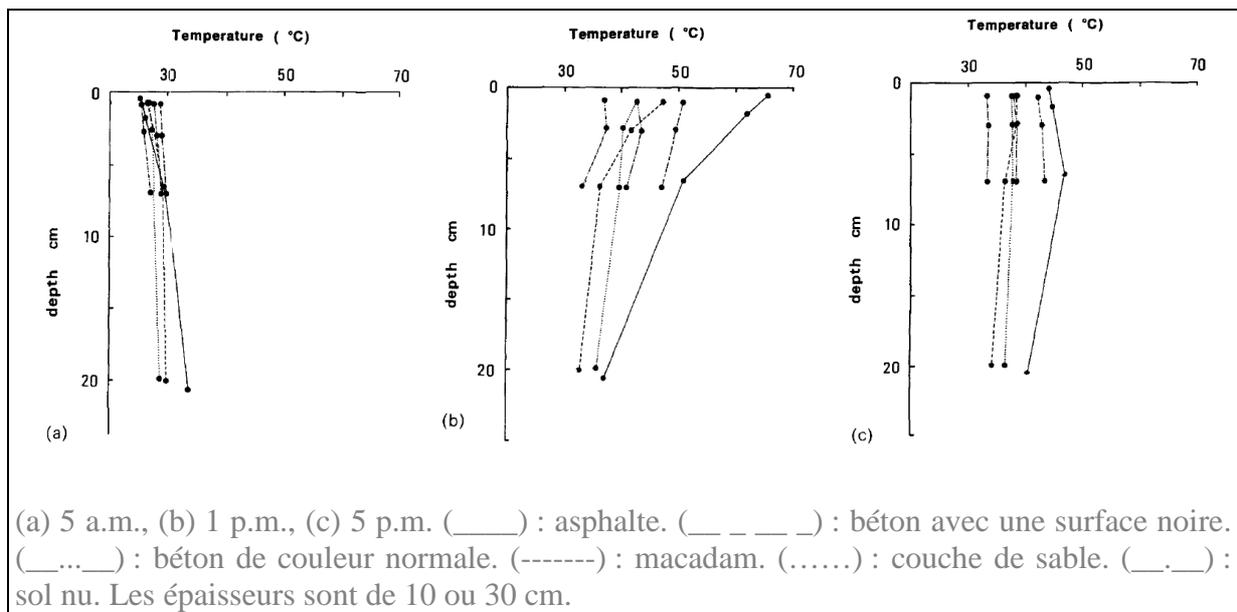


Figure 37 : Distribution des températures au sein des différents types de sol (observations de 1990) (Asaeda *et al.*, 1996).

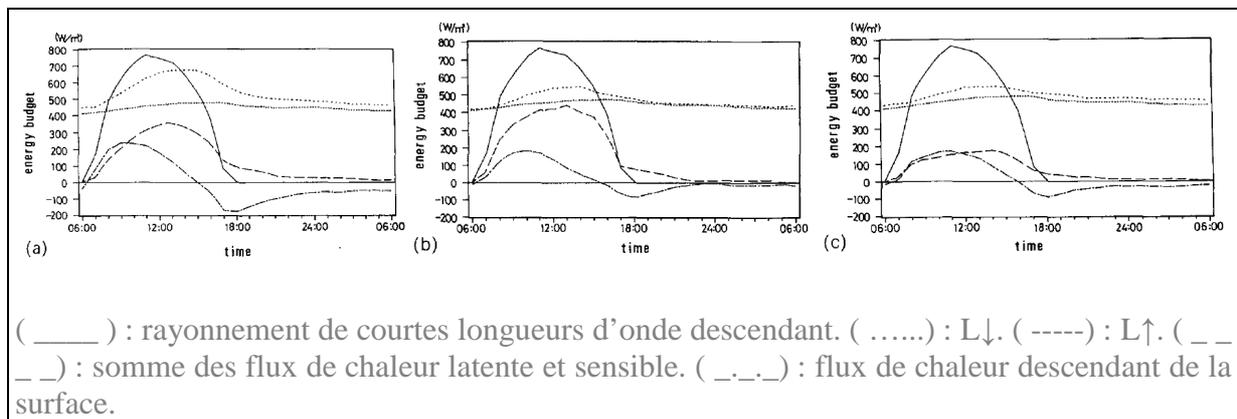


Figure 38 : Bilan d'énergie à la surface du sol. (a) asphalté, (b) béton, (c) sol nu sec (Asaeda *et al.*, 1996).

Il est à noter que le calcul du flux de chaleur stockée pour l'asphalte et le béton s'est appuyé sur une formule fonction des différences temporelles de températures à différentes

profondeurs et des caractéristiques thermiques du sol⁴³. Pour le sol nu, l'amplitude durant la journée des températures à 20 cm de profondeur était inférieure à 1°C, Asaeda *et al.* (1996) ont donc supposé que le flux de chaleur par conduction à 20 cm de profondeur était nul. Ainsi, si Asaeda *et al.* (1996) montre que la profondeur où l'amplitude de la température journalière est de seulement 5% de celle de la surface est d'environ 20 cm pour le sol nu, cette valeur pour l'asphalte et le béton est selon leur expérience supérieure à 30 cm.

La figure 39 représente la variation journalière des flux de chaleur par conduction au sein de l'asphalte et du béton à 20 cm de profondeur.

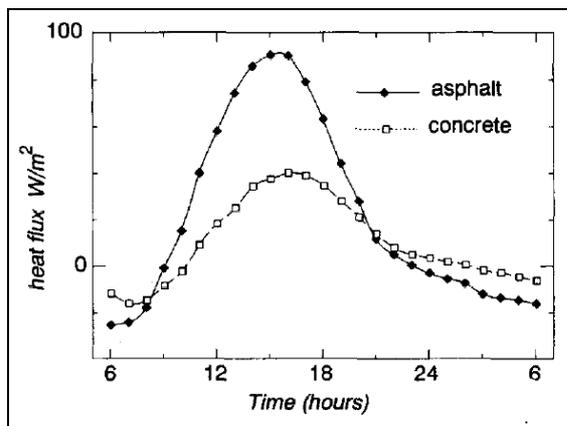


Figure 39 : Flux de chaleur de conduction à 20cm de profondeur pour une surface en asphalte et une autre en béton (Asaeda *et al.*, 1996).

Le rayonnement infrarouge ($L\uparrow$) et son absorption dans les premiers mètres de l'atmosphère provoque également une augmentation des températures au niveau du sol. Asaeda *et al.* (1996) montre qu'à 14h, le rayonnement infrarouge absorbé au-dessus de la surface en asphalte est supérieure de 60 W.m^{-2} à l'absorption observée au-dessus du sol nu et du sol en béton. Ce rayonnement et son absorption ne sont pas à négliger pour la compréhension de la formation de l'îlot de chaleur urbain, en effet 60 W.m^{-2} correspond à un quart des flux de chaleur sensible et latente ou encore à la moitié de la moyenne journalière des flux de chaleur anthropique de la zone commerciale de Tokyo (Asaeda *et al.*, 1996).

Les matériaux dits rafraichissants se caractérisent par un albédo élevé vis-à-vis du rayonnement de courtes longueurs d'onde et d'une émissivité élevée (Santamouris, 2005). Ils permettent, grâce à l'albédo élevé, de réduire la quantité de rayonnement solaire absorbée par

⁴³ Pour l'asphalte, la conductivité thermique est de $0,74 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}$, la capacité thermique est de $1,42 \text{ J.cm}^{-3}.\text{°C}$, la porosité de 8,9% et l'albédo (à 12:00) de 0,10. Pour le béton, la conductivité thermique est de $1,69 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}$, la capacité thermique est de $2,07 \text{ J.cm}^{-3}.\text{°C}$, et l'albédo (à 12:00) de 0,45.

l'enveloppe du bâtiment et la structure urbaine, et permettent ainsi de conserver une température de surface faible. Le fait qu'ils aient également une émissivité élevée (comme la majorité des matériaux de construction hors métaux), permet d'évacuer l'énergie préalablement absorbée et d'améliorer la situation intérieure du bâtiment du point de vue du confort d'été. Ainsi, l'utilisation de matériaux rafraichissants pour l'aménagement urbain contribue à la présence de températures de surfaces peu élevées, ce qui influence les échanges thermiques avec l'air, améliore le confort en extérieur et diminue également la température ambiante (Santamouris (2005), d'après Akbari *et al.* (1997) et Bretz et Akbari (1997)).

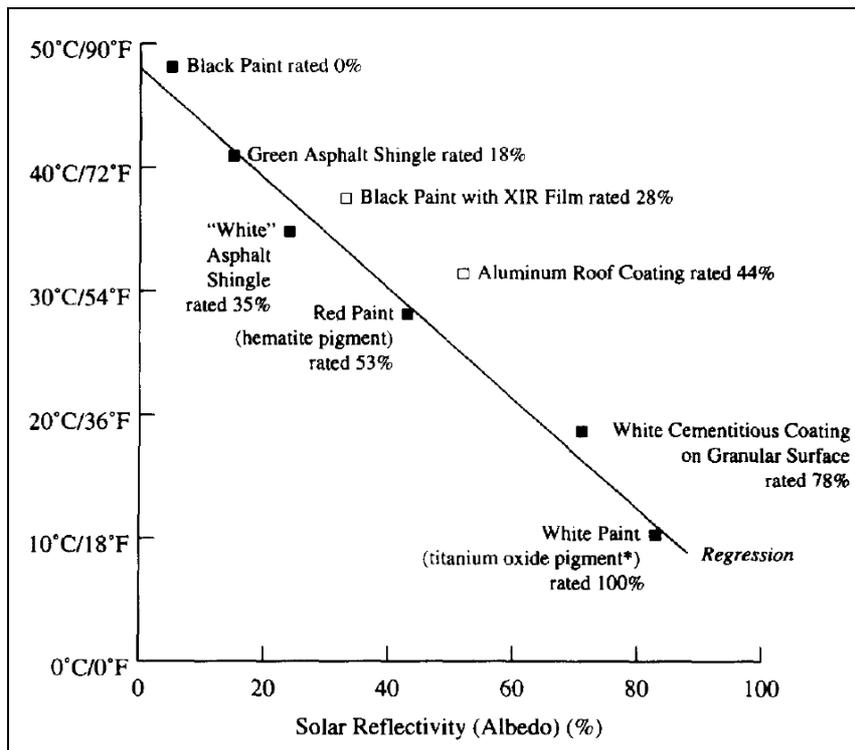


Figure 40 : Différence entre la température de surface et celle de l'air en fonction de l'albédo des peintures ou des matériaux de toits exposés au soleil (Rosenfeld *et al.*, 1995).

Rosenfeld *et al.* (1995) présentent dans leur article l'influence de l'albédo d'une surface sur les températures de surface. La figure 40 issue de leur étude montre les différences de températures entre la température de surface et celle de l'air, à midi, pour différentes surfaces horizontales exposées au soleil (les conditions de vent, qui peuvent avoir une influence, ne sont pas précisées). Pour les surfaces à faible albédo, et donc qui absorbe fortement le rayonnement solaire, la différence de températures entre la surface et l'air ambiant, ΔT_{s-a} , peut atteindre 50°C. Pour des surfaces moins absorbantes (fort albédo), comme celle recouverte de peinture blanche, ΔT_{s-a} est d'environ 10°C. L'albédo agit ainsi directement sur le refroidissement du bâti et sur l'utilisation d'air conditionné.

On peut noter que la surface peinte en noir provoque une différence entre la température de surface et celle de l'air plus importante d'environ 40°C que celle observée pour une surface peinte en blanc.

L'utilisation de matériaux à fort albédo réduit la quantité de rayonnement solaire absorbé par l'enveloppe du bâtiment et la structure urbaine, ce qui permet de conserver leurs surfaces à une température plus fraîche. La diminution de la température de surface réduit également l'intensité du rayonnement infrarouge. Les températures de l'air ambiant, localement et sous le vent, sont alors moins importantes du fait de flux de chaleur convectifs plus faibles au-dessus de surfaces plus froides (Taha, 1997a).

Taha (1997b) a modélisé les impacts de changement à grande échelle de l'albédo sur la température de l'air et la qualité de l'air (concentration en ozone). Ses modélisations ont concerné le bassin californien (SoCAB – California's South Coast Air Basin). Selon Taha (1997b), une augmentation de l'albédo de la surface permet une diminution des températures de surface, ce qui, par voie de conséquence, diminue également la température de l'air dans les zones modifiées ou situées sous le vent de celles-ci. Pour son étude, Taha (1997b) a utilisé une version du Colorado State University Mesoscale Model (CSUMM), un modèle atmosphérique, pour simuler la météorologie du bassin californien et sa sensibilité à des modifications de l'albédo des surfaces. Pour les conséquences de ces modifications météorologiques sur la qualité de l'air, le modèle *Urban Airshed Model* (UAM) a été utilisé.

L'albédo moyen du bassin est de 0,14. Pour connaître la modification possible de l'albédo, Taha (1997b) a distingué les espaces dont l'albédo est modifiable (zones résidentielles, zones de bureaux, commerces, parkings, etc.) et les espaces sans modification possible (parc, désert, etc.). Pour chaque maille de 5x5km, la fraction de ces deux types d'espaces a été déterminée pour pouvoir ensuite estimer l'augmentation possible de l'albédo. Pour les surfaces où l'albédo est modifiable, l'augmentation d'albédo a été fixée à 0,15 pour le cas modéré et à 0,30 pour le cas extrême. Les simulations, effectuées sur une journée d'août, suggèrent qu'une diminution de température allant jusqu'à 2°C est possible dans certaines mailles dans le cas modéré. Dans ce cas, les diminutions les plus importantes ont lieu pour la plupart dans le centre du bassin, c'est-à-dire à Los-Angeles. Pour les alentours des diminutions de l'ordre de 1°C sont observées. Dans le cas extrême, des diminutions de température de 4,5°C ont lieu au centre du bassin, et pour les zones aux alentours la diminution est en moyenne de 2°C. En ce qui concerne l'ozone, les simulations suggèrent que des augmentations à grande échelle de

l'albédo peuvent causer localement des effets positifs ou négatifs selon l'endroit du bassin (la diminution de la température diminuerait également à certains endroits la hauteur de la couche limite au sein de laquelle se dispersent les polluants). Cependant, l'effet moyen sur le bassin entier est quand même une réduction des concentrations d'ozone.

Si la couleur d'une surface a une forte influence sur l'absorption de la chaleur⁴⁴, Givoni (1998) signale que les surfaces ayant une couleur d'une teinte similaire (foncée comme claire) peuvent avoir un albédo différent et auront ainsi, pour des conditions identiques de températures de l'air et de rayonnement solaire, des températures différentes. Givoni (1998) concède cependant que la couleur reste un indicateur souvent juste de la réflectivité d'une surface.

⁴⁴ Escourrou (1981) propose ainsi une absorption de 100% pour le noir ; de 85 à 90% pour le bleu, le brun et le vert ; de 75 à 85% pour le gris, le ciment et le métal ; de 70 à 75% pour le rouge, le brun clair et le kaki ; de 50 à 55% pour les couleurs pâles ; et de 40 à 45% pour le blanc.

VII 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.

Le climat urbain s'analyse 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 mécanismes physiques mis en jeu concernent les écoulements de l'air, fortement perturbé par le milieu urbain, l'évapotranspiration, en nette diminution par rapport au milieu rural voisin, 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 que nous avons explicités 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 fortement, l'ensemble de ces phénomènes. Ces derniers peuvent également être favorisés par des prédispositions naturelles telles que la topographie (montagne, vallée, plaine, etc.). Plusieurs facteurs entrent dans 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.) et des facteurs urbains, qui comprennent à la fois 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).

Cette analyse nous a donc permis de mieux comprendre et d'expliquer les processus à l'origine de la formation du climat urbain.

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.

Deuxième partie :
Méthodes et modèles de simulation
numérique

I Déroutement de la recherche et méthodes utilisées

Ce travail de recherche a pour objectif de contribuer à l'analyse de l'intégration des enjeux du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. Il s'inscrit dans un cadre pluridisciplinaire où les champs distincts mais complémentaires de la climatologie urbaine et de l'urbanisme s'associent pour répondre à la problématique qui est la notre, à savoir : *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 ?*

Le caractère pluridisciplinaire de cette thèse s'inscrit dans une volonté actuelle d'intégrer à la pratique de l'aménagement urbain et de l'architecture des éléments de climatologie urbaine. Aujourd'hui, le fossé entre les études pointues mais théoriques en climatologie urbaine et la pratique de l'aménagement urbain tente d'être comblé par différents auteurs d'ouvrages et d'outils relatifs à la prise en compte du climat urbain dans l'aménagement et l'architecture ou relatifs au rafraîchissement des villes. Le premier chapitre de la première partie a explicité ce contexte de notre recherche.

Pour répondre à notre problématique, un des premiers points à étudier a été la formation du climat urbain. Ceci fait l'objet de la première partie. Cette analyse permet d'identifier les facteurs, contrôlables et incontrôlables par l'homme, participant à la formation du climat urbain et à l'intensité des modifications climatiques observées. Nous nous sommes appuyés pour cela sur une analyse bibliographique dans le domaine de la climatologie urbaine. Or la description du milieu urbain utilisée dans ce cadre n'est pas forcément identique ou en adéquation avec la façon de concevoir la ville, il était donc intéressant de mettre en relation facteurs influant sur le climat urbain et domaines d'actions de l'urbanisme. Cette proposition est présentée dans le premier chapitre de la troisième partie.

L'état de l'art ne permettait également pas de proposer une hiérarchie entre les différents leviers, chaque étude ne comportant pas les mêmes hypothèses, analysant seulement un nombre limité de facteurs, ou se situant dans un contexte climatique uniquement estival. Nous avons donc décidé de mettre en place nos propres simulations pour essayer de quantifier l'influence de différents facteurs sur le climat urbain. Le choix du modèle de simulation s'est appuyé sur l'étude des différents modèles existants (chapitre suivant). Pour le sélectionner, plusieurs critères ont été proposés en relation avec leur capacité à modéliser les mécanismes

physiques à l'origine de la formation du climat urbain et leur capacité à prendre en compte les domaines d'action identifiés.

Nous avons ensuite pu effectuer des tests de sensibilité à différents critères dépendant de la structure du modèle et des domaines d'action identifiés précédemment. L'ensemble des hypothèses et des choix effectués, et des résultats des simulations sont présentés dans la troisième partie.

Dans la mesure où nous avons une ambition opérationnelle, notre étude ne pouvait se limiter à l'analyse quantitative des effets de différents leviers sur le climat urbain. Nous avons donc choisi d'analyser, au travers des moyens actuels à disposition des collectivités territoriales françaises, la possibilité d'intégrer de nouveaux critères climatiques à la conception urbaine.

La dernière partie s'intéresse donc à la mise en application c'est-à-dire aux moyens à disposition des collectivités pour intégrer des notions de climatologie urbaine à la conception de la ville. Alors que les première et troisième parties qui la précèdent peuvent être associées à une approche analytique, c'est-à-dire s'intéressant plus particulièrement aux éléments du système formé par la ville, cette dernière partie se rapprochera d'une analyse systémique, tenant compte des relations entre les éléments de l'écosystème urbain (cf. lexique).

II Modèles de simulation numérique du climat urbain

Pour l'étude des perturbations climatiques engendrées par une ville, il est intéressant de distinguer, nous l'avons vu, trois échelles d'étude : la micro-échelle, l'échelle locale et la méso-échelle (première partie). Le climat urbain ou, plus précisément, les différents phénomènes physiques à son origine sont aujourd'hui modélisés à chacune de ces trois échelles avec plus ou moins de précision. Plusieurs modèles ont ainsi été développés, avec chacun leurs propres hypothèses et leur propre portée.

L'échelle micro ne permet pas de regarder l'influence globale sur le climat urbain de choix concernant la conception urbaine mais seulement les conséquences climatiques en un lieu précis. L'échelle locale ne permet également pas de prendre en considération l'ensemble de la ville mais nous avons préféré ne pas l'exclure de notre recherche dans l'immédiat afin d'éviter de manquer un modèle pertinent pour notre étude. Nous nous sommes donc intéressés aux modèles permettant une représentation du climat urbain aux échelles locale et méso.

L'objectif n'est pas de lister de façon exhaustive tous les modèles existants mais d'identifier et d'exposer quelques modèles avec certaines de leurs portée et limites. Nous présenterons dans la mesure du possible pour chacun d'entre eux : le ou les auteurs à l'origine du modèle, l'échelle de la modélisation, les bases scientifiques, la portée et les limites du modèle, et le stade de la validation.

Ces présentations nous permettront par la suite d'argumenter notre choix de modèle.

II.1 Modèles climatiques à échelle locale

Les modèles s'intéressant aux échelles locales s'appuient sur une discrétisation spatiale (maillage) relativement fine du cadre bâti. Cette description du cadre bâti permet une représentation relativement précise des qualités climatiques d'un lieu. Cette finesse de la description ne permet cependant pas une représentation entière d'une ville.

Pour illustrer cette échelle, nous avons sélectionné deux modèles : ENVI-met et SOLENE.

II.1.1 ENVI-met (Environmental Meteorology)

ENVI-met (Environmental Meteorology) a été développé au sein du Groupe de Recherche en climatologie (GRC) au département de géographie de l'université de Bochum en Allemagne par Michael Bruse. Ce modèle simule les interactions entre différentes surfaces urbaines, la

végétation et l'atmosphère. Il permet ainsi d'analyser l'impact sur le microclimat de modifications de l'environnement urbain à petite échelle (arbres, cours intérieures végétalisées, etc.). (Bruse, 1999 ; www.envi-met.com/)

ENVI-met est un modèle 3D non hydrostatique⁴⁵ qui s'appuie sur une grille géométrique. La résolution horizontale est entre 0,5m et 5m pour une maille. Au total, la grille entière (le maillage) peut avoir une dimension de 250x250x25 mailles pour les ordinateurs récents. Cela permet de couvrir une zone de 100mx100m jusqu'à 1kmx1km. ENVI-met n'est donc pas conçu pour modéliser le climat d'une ville entière mais seulement d'un quartier.



Figure 41 : Un exemple de l'éditeur utilisé pour créer les fichiers nécessaires à la simulation pour ENVI-met (Bruse, 2004).

ENVI-met s'appuie sur la résolution numérique des équations de la mécanique des fluides et sur le bilan d'énergie. En d'autres termes, il calcule l'écoulement du vent autour des différentes structures urbaines ainsi que les autres variables associées au bilan d'énergie et aux processus de transfert atmosphérique (calcul des ombres, de la réflexion, de la turbulence,

⁴⁵ En météorologie, l'approximation hydrostatique stipule que la composante verticale de la force de pression (poussée d'Archimède) est en équilibre exact avec la force gravitationnelle (poids) : l'équilibre hydrostatique. Elle permet de négliger, dans le calcul de la pression le long de l'axe vertical, les forces dues : au mouvement horizontal ou vertical de l'air ; à la force de Coriolis. Il s'ensuit que la pression, en tout point du volume atmosphérique, est uniquement et directement proportionnelle au poids de la colonne d'air au-dessus de ce point. Cette approximation est valide à un grand degré de précision dans un très grand nombre des états naturels de l'atmosphère en particulier pour les mouvements de grande échelle. Elle cesse d'être valide à petite échelle (< 10 km) et pour des systèmes intenses comme les tornades et les orages.

de l'évaporation des plantes, etc.) (Bruse, 2004). En plus de ces éléments, le modèle simule également la dispersion des particules ou encore le confort thermique en extérieur.

L'interface utilisée pour entrer les paramètres de simulation (pas de temps, implantation du bâti, hauteur des bâtiments, type de végétation, sources de pollution, etc.) est plutôt simple d'utilisation (figure 41) et permet de visualiser en deux dimensions la zone urbaine à modéliser. La simulation, qui peut être effectuée sur un ordinateur de bureau, peut prendre entre quelques heures et quelques jours selon la modélisation effectuée.

Un outil de visualisation (LEONARDO) permet ensuite de visualiser les résultats de la modélisation, en 2d comme en 3d (Bruse, 2004).

Ce modèle est accessible gratuitement et ce avec les explications (en anglais) sur son fonctionnement et son utilisation (Site web : www.envi-met.com/). Il existe déjà une communauté d'utilisateurs et plusieurs exemples de l'usage qui peut être fait d'ENVI-met.

Yu et Hien (2006) ont par exemple étudié l'impact thermique d'un parc urbain. Leur étude montre que l'effet refroidissant du parc dépend de la direction du vent et de la distance des bâtiments par rapport au bois. La simulation effectuée a eu lieu lors d'un jour ensoleillé et sans nuage, avec un vent allant du sud vers le nord d'une vitesse de 1,6 m/s à 10 m au-dessus du sol. Il y a eu 48h de simulation. Les conditions initiales ont été celles mesurées sur le site existant, c'est-à-dire celui avec la forêt (a).

Il faut toutefois signaler qu'ENVI-met est un modèle qui n'a jusqu'à ce jour pas fait l'objet de validation complète. Les rares essais de validation réalisés en milieu urbain ont été assez sommaires, notamment du fait du manque de données sur les zones étudiées (Samaali, 2002). Il est donc difficile de savoir à quel point une modélisation se rapproche de la réalité.

Des simulations effectuées à une échelle micro sur plusieurs surfaces de Thessalonique en Grèce ont été confrontées à des mesures effectuées sur site. La comparaison entre les mesures et les simulations pour les températures de surface et de l'air révèle quelques différences positives comme négatives. Celles-ci s'expliquent en partie par les effets d'ombre temporaires des bâtiments voisins. Elles peuvent être considérées, selon Chatzidimitriou *et al.* (2006), comme étant suffisamment faibles pour ne pas remettre en cause la justesse du modèle.

A cela s'ajoute le fait qu'ENVI-met présente quelques difficultés à « tourner » sans vent selon son créateur Michael Bruse (www.envi-met.com/) et qu'il ne prend pas en compte les rejets de chaleur liés au trafic automobile qui peuvent être importants dans certains cas.

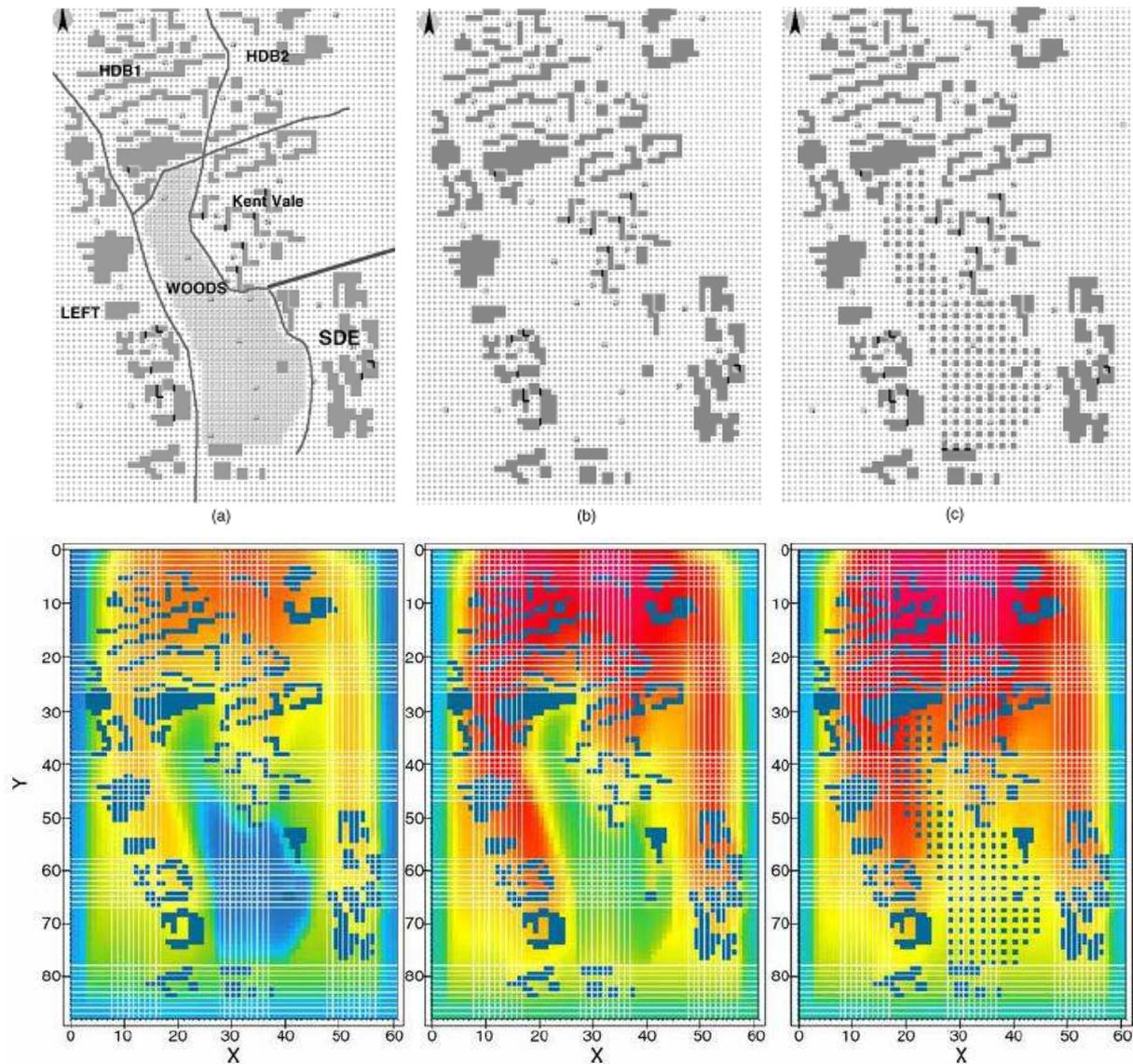


Figure 42 : Trois scenarii et leurs profiles des températures (limite basse : 303.45 K; limite haute : 301.8 K) pour $z = 2\text{m}$ à 06:00 h. (a) forêt d'origine, (b) pas de forêt, (c) des bâtiments (Yu et Hien, 2006).

II.1.2 SOLENE

Le logiciel de simulation SOLENE est un modèle thermo-radiatif qui a été développé par le laboratoire CERMA (Centre de recherche méthodologique d'architecture) à Nantes suite à des recherches sur les paramètres solaires, lumineux et radiatifs des projets architecturaux et urbains.

SOLENE s'appuie sur une modélisation 3D des volumes construits et intègre de nombreux calculs qui permettent de tenir compte des effets solaires, lumineux et thermiques de la forme urbaine sur les conditions et le confort en extérieur. Son principal intérêt est de permettre l'analyse des interactions entre la forme urbaine et ses dimensions environnementale et climatique, et ce en corrélant des données géométriques de la forme urbaine (agencement, direction, densité, profil des rues, type de bâti...) avec des propriétés physiques de l'espace bâti (rugosité, perméabilité de l'air, ouverture au ciel, exposition solaire, potentiel de lumière...) (Groleau *et al.*, 2003).

Les applications de SOLENE sont variées et il propose divers modes de visualisation pour rendre compte des comportements observés dans l'espace et le temps. Ainsi SOLENE permet, à partir d'une scène géométrique 3D complexe, de calculer des durées d'ensoleillement, des flux d'énergie solaire, des températures de paroi (figure 45) ou encore des niveaux d'éclairement intérieurs et extérieurs en prenant en compte les transparences, les effets de masques, les modèles de ciels spécifiques et les inter-réflexions (Musy *et al.*, 2006). Il permet également de traiter des fonctions diverses d'analyse de l'éclairement comme les facteurs de ciel, les facteurs de lumière du jour sur des plans horizontaux⁴⁶, etc. ou encore les problèmes de rayonnement thermique (solaire et thermique IR) permettant d'évaluer les températures de surface des parois et d'appréhender le niveau de confort en extérieur (<http://www.cerma.archi.fr/CERMA/Expertise/solene/>). Champs de vitesse et température de l'air à 1,5m de hauteur sont également calculés.

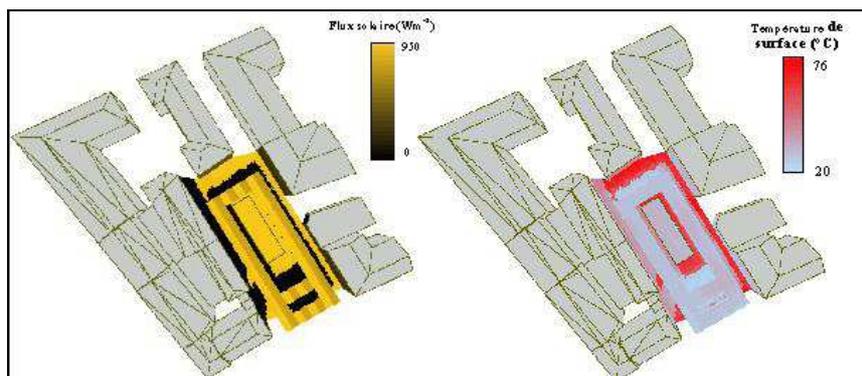


Figure 43 : Températures et flux solaires calculés sur les surfaces des bâtiments, des arbres et sur le sol (UMR 1563 Ambiances architecturales et urbaines, 2002-2005)

⁴⁶ Facteur de lumière du jour (FLJ) : rapport de l'éclairement intérieur reçu en un point du plan de référence (généralement le plan de travail ou le niveau du sol) à l'éclairement extérieur simultané sur une surface horizontale en site parfaitement dégagé. Il s'exprime en %.

Le modèle 3D représente, sous forme de facettes planes polygonales, les surfaces externes du site urbain à modéliser (toits, façades, cours intérieures et rues). Une maille triangulaire est appliquée à ces facettes et le calcul s'effectue pour le barycentre de chacun des éléments de la maille (figure 44). Le modèle thermique fonctionne dans des conditions instationnaires, c'est-à-dire instable dans le temps, avec des données météorologiques variables (air extérieur, rayonnement solaire) et considère les effets de l'inertie grâce à un modèle thermique de mur. Le modèle géométrique et le modèle du mur sont associés ; à chaque élément de maille correspond une définition spatiale, une liste de propriétés physiques (albédo, émissivité...) et un modèle de mur. (Groleau *et al.*, 2003).

Les températures de surfaces sont estimées à partir des flux infrarouges précédemment calculés et qui dépendent eux-mêmes des températures de surface. Les différentes opérations de calculs sont réitérées tant que l'on ne constate pas une convergence des températures de surface calculées⁴⁷ (Ringebach, 2004).

SOLENE permet donc une représentation fine de la morphologie du quartier à simuler.

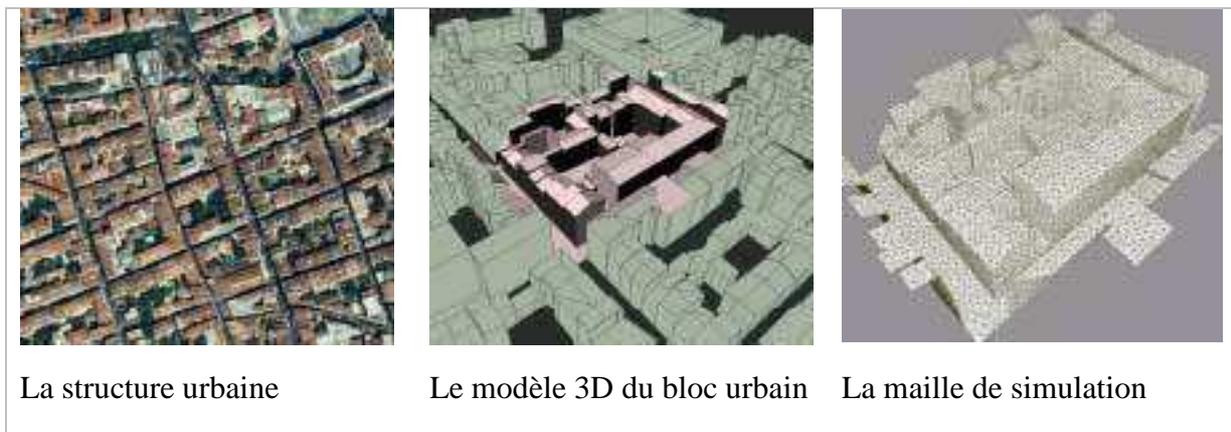


Figure 44 : De la structure urbaine à la maille de simulation (Groleau *et al.*, 2003).

Le modèle SOLENE peut permettre une simulation à l'échelle de la rue et de la place ainsi qu'à l'échelle de l'îlot ou du quartier. Il se positionne donc sur des échelles micro et locale.

Une application du modèle sur un quartier de Marseille (Groleau *et al.*, 2003) ou encore sur plusieurs sites de Strasbourg (Ringebach, 2004) ont permis de valider la pertinence du

⁴⁷ Les différentes températures de surfaces calculées forment une suite mathématique qui est amenée à devenir convergente vers un point I (une température ici). Une définition simplifiée d'une suite convergente est : une suite u est dite convergente vers un point I (pas nécessairement unique) lorsque tout voisinage de I contient tous les termes de la suite à partir d'un rang suffisamment grand.

modèle. Notons cependant que SOLENE ne prend pas en compte les flux de chaleur latente et d'origine anthropique (Ringenbach, 2004) et n'intègre pas encore les bilans hydriques.

II.2 Modèles climatiques de l'échelle locale à la méso-échelle

Les modèles de villes de méso-échelle sont issus en partie des représentations des milieux urbains au sein des modèles climatiques régionaux. En effet, au sein de ces modèles, les zones urbaines étaient initialement représentées pour la plupart par des sols secs et rugueux, ce qui était loin de représenter la complexité du fonctionnement climatique d'une ville. Des schémas de surface ont donc été développés pour permettre une meilleure représentation des phénomènes climatiques urbains.

La majorité de ces modèles permettent ainsi un couplage avec des modèles atmosphériques de plus grande échelle, tels que ceux utilisés pour les prévisions météorologiques (figure 45).

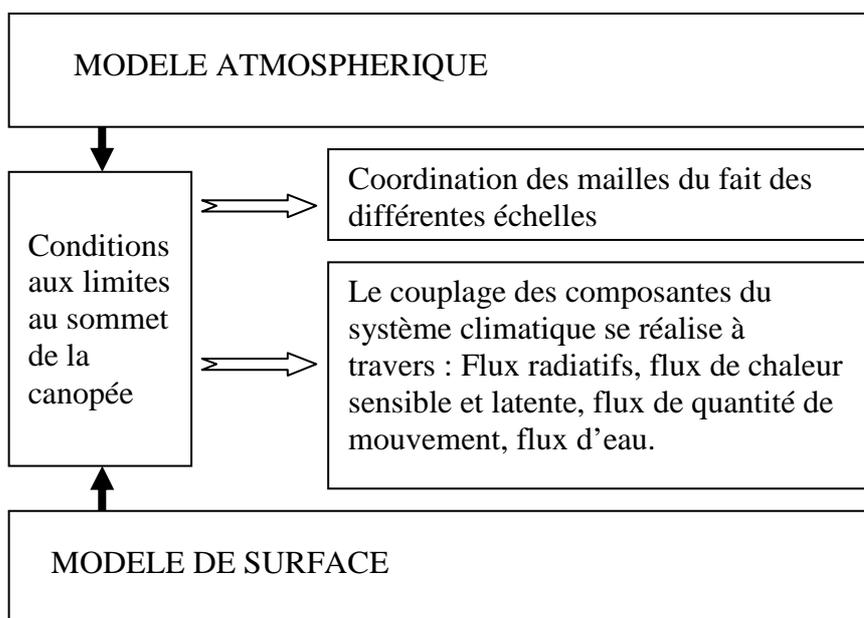


Figure 45 : Fonctionnement d'un couplage entre un modèle atmosphérique et un modèle de surface.

Trois catégories peuvent être distinguées au sein de ces modèles : les modèles empiriques, les modèles d'espaces végétalisés adaptés pour inclure des surfaces urbanisées, et les modèles de la canopée urbaine (Masson, 2006).

II.2.1 Modèles empiriques

Les modèles empiriques s'appuient principalement sur l'observation du bilan d'énergie de la surface. L'objectif est de reproduire les flux énergétiques de la canopée en utilisant des

relations statistiques obtenues avec l'observation. De tels modèles empiriques utilisent très peu de forçage (exemples : type de surface, radiation solaire), et ne requièrent pas la résolution de nombreuses équations. Cette approche s'appuie sur le fait que le comportement physique est déjà contenu dans les données observées (Masson, 2006).

Pour illustrer ces modèles empiriques nous avons choisi un des plus précis et complet selon Masson (2006), le NARP-LUMPS (Net All-wave Radiation Parameterization / Local-scale Urban Meteorological pre-processing Scheme), développé par Grimmond et Oke (2002).

Le schéma NARP-LUMPS consiste à évaluer le bilan énergétique de la ville. Il simplifie cependant l'équation de ce bilan en n'intégrant pas le flux de chaleur anthropique produit par les processus de combustion, de métabolisme et de rejets thermiques (Q_F) et en ignorant le flux de chaleur advectif (ΔQ_A) ce qui revient à considérer l'équation suivante (Grimmond *et al.*, 1991) :

$$Q^* = Q_H + Q_E + \Delta Q_S \quad (\text{formule 14})$$

Avec : Q^* le rayonnement net

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.

NARPS-LUMPS s'appuie sur plusieurs étapes (figure 46).

Tout d'abord, le rayonnement net (Q^*) est estimé soit par le biais de mesures, soit en utilisant le rayonnement de courtes longueurs d'onde (K_{\downarrow}), des observations météorologiques (température de l'air, pression de vapeur réelle⁴⁸, fraction de nuages) et des propriétés radiatives de la surface (albédo, émissivité), permettant d'estimer le bilan radiatif de la surface.

Ensuite la quantité de chaleur stockée (ΔQ_S) est estimée par le biais d'un modèle théorique et expérimental développé par Grimmond et al (1991) (*l'objective hysteresis model*) et dépend, en plus du rayonnement net, des caractéristiques physiques de la couverture terrestre. Les

⁴⁸ La pression de vapeur est la pression partielle de la vapeur d'eau d'un corps présent également sous forme liquide ou solide. Lorsque le système est à l'équilibre (les proportions relatives de gaz et liquide ou solide ne varient pas), la pression de vapeur est dite « saturante ».

coefficients utilisés pour représenter ces caractéristiques ont été initialement calibrés de manière statistique par Grimmond et Oke (1999(a)) à partir de plusieurs type de zones urbaines (urbain dense, urbain, industriel).

Ensuite, les flux de chaleurs sensible (Q_H) et latente (Q_E) sont déterminés en s'appuyant sur le rayonnement net et le flux de chaleur stockée mais également sur deux paramètres empiriques dépendant des caractéristiques du sol. Ces mesures permettent de comptabiliser en partie les flux de chaleur d'origine anthropique (ceci sont en effet intégrer aux flux de chaleur turbulents et stocké). Les contributions anthropiques de ces flux sont ainsi déjà incluses et ne nécessitent pas un calcul supplémentaire.

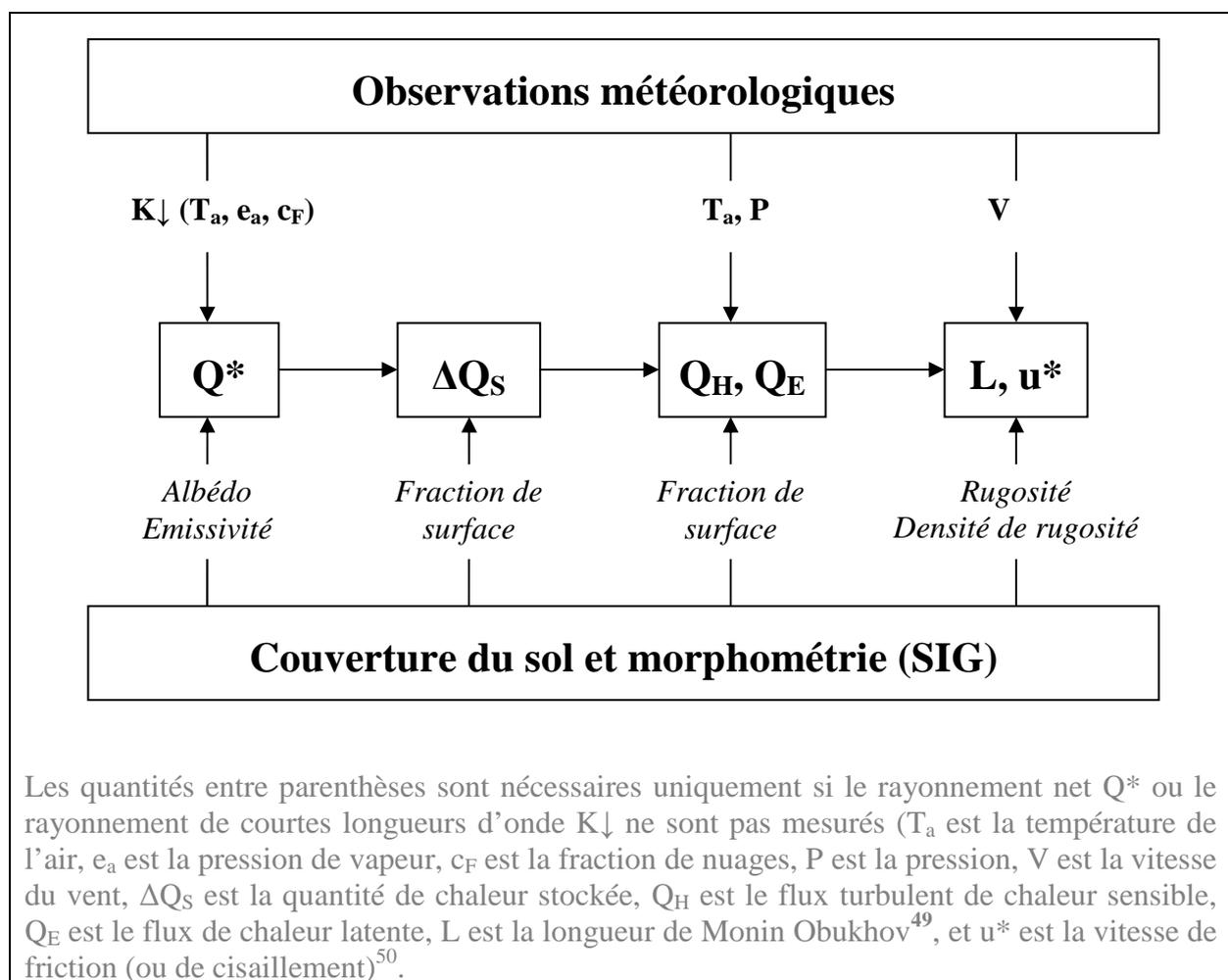


Figure 46 : Structure de NARP-LUMPS (d'après Grimmond et Oke, 2002).

Les données d'entrée de ce modèle se limitent ainsi à :

⁴⁹ La longueur de Monin Obukhov est une grandeur qui permet de caractériser la stabilité de l'atmosphère à différente altitude. Plus précisément, cette longueur permet de qualifier l'importance relative de la turbulence mécanique et de la turbulence convective, à une altitude donnée.

⁵⁰ La vitesse de friction permet de représenter la fluctuation de la vitesse du vent.

- le rayonnement net (ou le rayonnement de courtes longueurs d'onde) ;
- la couverture du sol (surface de végétation, bâtiments et matériaux imperméables) et la morphométrie (rugosité et densité des éléments), qu'il est possible d'obtenir par le biais d'un système d'information géographique ;
- les paramètres climatiques standards (température de l'air, humidité, pression et vitesse du vent).

Comme le signale Masson (2006), ce type d'approche permet d'utiliser des schémas extrêmement simples. Cependant, leur principal défaut est que les statistiques sont effectuées sur des données de certains couverts et donc limités par une gamme de conditions (couverture du sol, climat, saison, etc.) rencontrées dans les études initiales.

NARP-LUMPS a été évalué sur plusieurs villes nord-américaines et a montré de bonnes performances, c'est-à-dire une représentation des flux énergétiques en accord avec les observations. Cependant, comme le signalent les auteurs eux-mêmes (Grimmond et Oke, 2002), les effets du vent et des sources importantes de chaleur d'origine anthropique sont incorporés de façon inadéquate dans le schéma (l'un par la vitesse de friction et l'autre par le biais des flux de chaleur). Pour les situations dans lesquelles ces variables seraient importantes, NARP-LUMPS, dans sa configuration actuelle, ne pourrait être utilisé.

II.2.2 Modèles d'espaces végétalisés adaptés pour inclure des surfaces urbanisées

Les modèles d'espaces végétalisés adaptés pour inclure des surfaces urbanisées ont été, comme leur nom l'indique, développés initialement pour des milieux non urbanisés et l'objectif est d'y intégrer des paramètres urbains. Pour illustrer ce modèle, nous avons choisi SM2-U (Soil Model for Sub-Mesoscale Urban) et ses différentes évolutions.

SM2-U est un modèle de sol urbain développé par l'Ecole Centrale de Nantes et qui calcule les flux de chaleur à l'interface canopée-atmosphère à l'échelle du quartier. Il peut être couplé avec SUBMESO, un modèle non-hydrostatique développé également par l'Ecole Centrale de Nantes. SUBMESO permet de simuler les flux atmosphériques avec une résolution allant de quelques mètres à plusieurs kilomètres. (Leroyer *et al.*, 2004)

SM2-U est une extension du modèle ISBA (Noilhan et Planton, 1989) et peut fonctionner avec ce dernier pour modéliser conjointement des sols ruraux et urbains (Dupont *et al.*, 2002).

Les caractéristiques aérodynamiques des surfaces urbaines sont représentées par une surface apparente où les obstacles sont modélisés par une longueur de rugosité et une hauteur de déplacement. Les échanges horizontaux à l'intérieur de la canopée urbaine ne sont pas modélisés, excepté ceux concernant les réflexions des rayonnements et l'eau de ruissellement. L'advection du vent entre les surfaces urbaines n'est pas prise en considération. (Mestayer *et al.*, 2004)

SM2-U permet de prendre en compte huit types de surface (Mestayer *et al.*, 2004) : un sol nu sans végétation; un sol nu localisé entre des éléments épars de végétation; de la végétation au-dessus d'un sol nu; de la végétation au-dessus d'une surface minérale (arbres sur un trottoir); des surfaces minérales localisées entre des éléments épars de végétation ; des surfaces minérales localisées en-dessous de la végétation ; les toits des bâtiments ; et des surfaces d'eau. Ces surfaces sont notées au sein de la figure 47 respectivement bare, nat, vegn, vega, pav, cova, roof et wat.

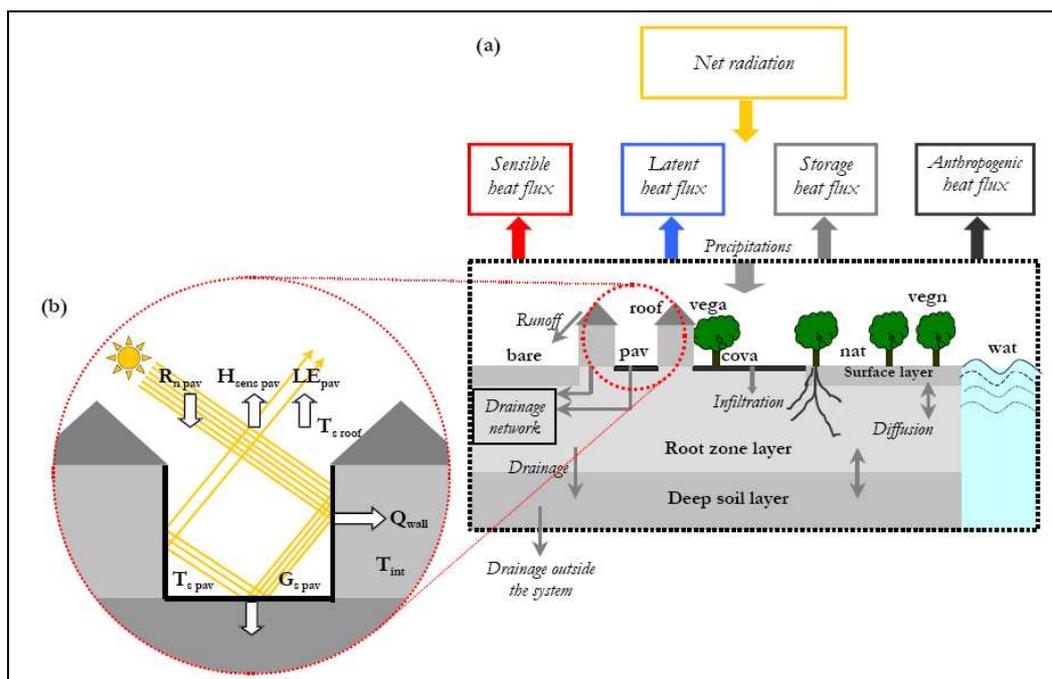


Figure 47 : Schéma représentant les modèles de bilan d'énergie et hydrique de SM2-U avec huit types de surface (pav, cova, bare, nat, roof, vega, vegn, wat) et 3 couches de sols (Mestayer *et al.*, 2004).

Le sol est découpé en trois couches : une couche de surface uniquement pour les surfaces non-urbaines; une deuxième couche de sol qui correspond à la zone d'influence des racines de la végétation; et une troisième couche de sol utilisé comme un réservoir d'eau pour la deuxième couche de sol, cet eau se diffusant à la deuxième couche en période sèche.

Pour chaque cellule, SM2-U détermine pour chaque type de surface une température de surface, une humidité spécifique et les flux d'énergie en résolvant les équations des bilans hydriques et de chaleur. Ensuite une moyenne est effectuée de façon proportionnelle au type de sol.

L'influence de la canopée urbaine est modélisée dans l'équation du bilan de chaleur de la surface artificielle en introduisant le stock de chaleur supplémentaire des murs et en tenant compte du piégeage radiatif à l'intérieur des rues canyon. Alors, la température de la surface artificielle correspond à une moyenne sur toutes les surfaces des rues. (Dupont *et al.*, 2002)

Les composantes thermiques du modèle SM2-U ont été évaluées avec quatre quartiers typiques de villes européennes (centre ville, quartier résidentiel, quartier industrialo-commercial, et un quartier avec des bâtiments de grande hauteur), et ce sans couplage avec un modèle régional. La répartition du rayonnement net entre les flux de chaleur sensible, latent et stocké, en fonction des caractéristiques du quartier, était en accord avec les observations disponibles sur des quartiers similaires d'une ville américaine (Mestayer *et al.*, 2004).

Le SM2-U couplé avec le modèle atmosphérique SUBMESO simule bien les principales caractéristiques de la couche limite urbaine au-dessus d'une ville « classique », c'est-à-dire fortement urbanisée et faiblement pourvue en espaces végétalisés : le développement de cellules convectives durant la journée ; un important îlot de chaleur urbain le soir et durant la nuit, transporté par le vent hors de la ville ; et le développement d'une brise urbaine entre les quartiers urbains les plus frais et les plus chauds (Mestayer *et al.*, 2004).

Des validations en mode forcé, c'est-à-dire sans couplage ou retour sol-atmosphère, ont également été effectuées sur un quartier central de Marseille durant la campagne UBL-ESCOMPTE (Baklanov *et al.*, 2005).

Au départ simplement 2D, le modèle de sol urbain SM2-U a été développé par la suite pour permettre la prise en compte la troisième dimension de la surface urbaine et modéliser ainsi l'effet canyon des rues.

La résolution spatiale de la maille d'analyse est horizontalement de l'ordre de 1km et de 1m dans le sens vertical. Les critères pris en compte pour décrire la surface urbaine sont les suivants : la hauteur moyenne des bâtiments, la densité bâtie au sol, la densité des surfaces végétales, la densité de surface des toitures, la densité frontale des bâtiments, la densité

frontale de la végétation, la fraction de surface des murs par rapport à celle de la maille analysée, le prospect moyen des bâtiments.

L'interaction entre le modèle de sol SM2-U et le modèle atmosphérique SUBMESO a été étudiée par Leroyer (2006) et a permis de relever notamment l'importance des paramètres du modèle de sol. Nous présentons ici uniquement les bilans d'énergie effectués pour quatre types d'aménagement, à savoir : (a) zone pavillonnaire, (b) centre ville, (c) quartier des grands ensembles, et (d) zone industrielle et commerciale (figure 48). Toutes les simulations ont été menées un jour d'été par ciel clair à la position géographique correspondant à Marseille.

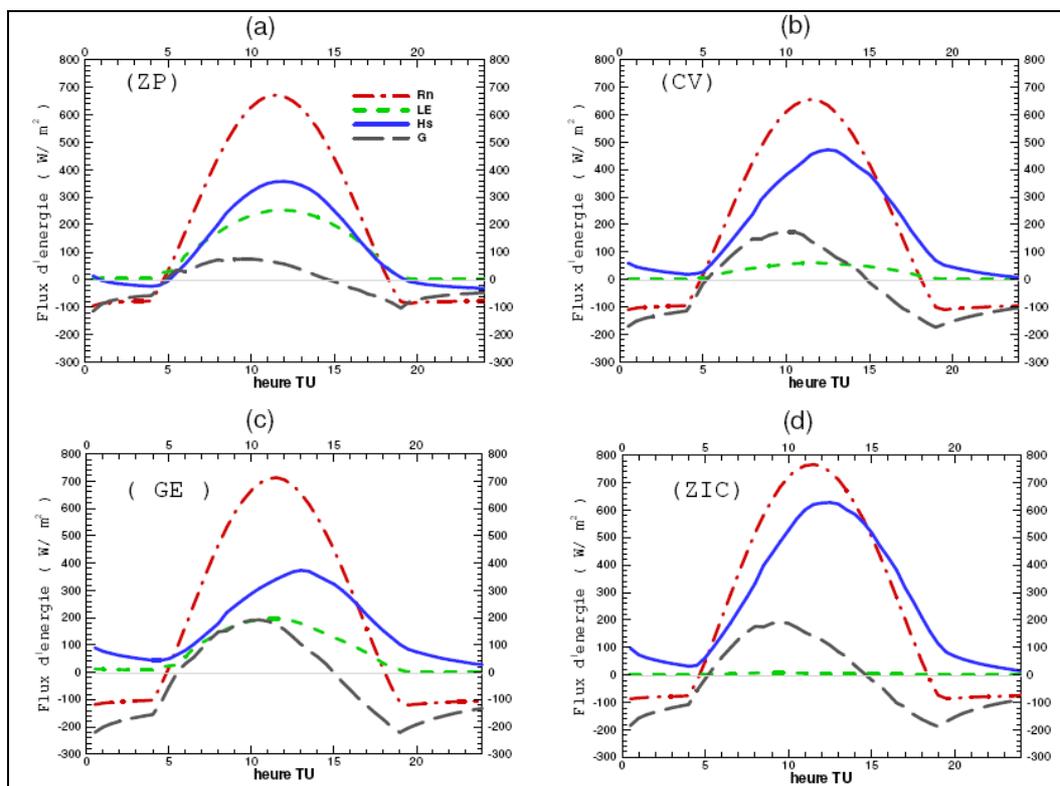


Figure 48 : Bilan d'énergie sur les 4 différents quartiers de la ville (a) : zone pavillonnaire, (b) : centre ville, (c) : quartier des grands ensembles, (d) : zone industrielle & commerciale. Rn le rayonnement net, LE le flux de chaleur latente, Hs le flux de chaleur sensible et G la quantité de chaleur stockée (Leroyer, 2006).

Ces modélisations montrent bien les différences de réponses thermiques existant entre ces quartiers. Par exemple, le maximum du rayonnement net en milieu de journée diffère de quasiment 100 W/m^2 selon le quartier. Cela s'explique principalement par les différences de composition des toitures et les densités de sol bâti et de sol artificiel. Le rayonnement net peut atteindre jusqu'à 770 W/m^2 en milieu de journée pour le quartier industriel et commercial. La

différence est encore plus nette pour le flux de chaleur latente qui est nul pour la zone industrielle et commerciale, qui n'a que très peu de végétation.

Les évolutions de la quantité de chaleur stockée et du flux de chaleur sensible correspondent également bien aux caractéristiques physiques et géométriques des différents quartiers.

Une troisième version a été développée, appelée DA-SM2-U, pour être couplée avec le modèle atmosphérique Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). DA-SM2-U utilise la force de résistance aérodynamique pour représenter les effets dynamiques et turbulents des bâtiments et de la végétation, et s'appuie sur la version 3D de SM2-U appelé SM2-U(3D), pour représenter les effets thermodynamiques des éléments de la canopée.

Des simulations sur la ville de Philadelphie (USA) avec une simple représentation de la morphologie urbaine ont montré que le modèle était capable de simuler les principales caractéristiques climatiques des zones urbaines et rurales, telles que la vitesse du vent, les flux autour des obstacles, la température de l'air ou encore l'humidité spécifique (Dupont *et al.*, 2004).

II.2.3 Modèles de la canopée urbaine

Les modèles de la canopée urbaine ont pour objectif d'établir le bilan d'énergie de la surface par le biais d'une canopée urbaine 3D réelle. Ils ont en communs les trois paramètres suivants : les bâtiments sont en 3D ; les bilans d'énergie des toits, routes et murs sont calculés séparément ; les interactions radiatives entre les murs et les routes sont prises en compte.

Ces modèles peuvent être séparés en deux catégories : les modèles simple-couche où la canopée de l'air est modélisée (il y a une interaction directe avec uniquement une couche atmosphérique, au-dessus du plus haut niveau des toits) et les modèles multi-couches qui utilisent une approche par la résistance aérodynamique (plusieurs couches d'air sont explicitement influencées par les bâtiments) (Masson, 2006).

Au sein des modèles simple-couche, les échanges entre la surface et l'atmosphère ont lieu uniquement en haut des canyons et des toits. Cela signifie que lors d'un couplage avec un modèle atmosphérique, la base du modèle atmosphérique est localisée au niveau des toits. Cela a pour avantage une certaine simplicité et une facilité de couplage, mais cela signifie également que les caractéristiques de l'air au sein du canyon doivent être calculées. La

température de l'air et l'humidité sont généralement considérées comme étant uniformes au sein du canyon.

Pour illustrer ces modèles simple-couche de la canopée urbaine, nous avons choisi TEB (Town Energy Balance).

Les modèles multi-couches utilisent une approche par la résistance aérodynamique, c'est-à-dire que les échanges avec l'atmosphère ont lieu au niveau du sol et à plusieurs niveaux atmosphériques en contact avec les bâtiments. Le bilan d'énergie de la surface est toujours calculé pour chaque surface ou partie de surface, mais les propriétés atmosphériques, comme le vent et la température, ne sont pas fixées, elles dépendent plus précisément de l'interaction entre la canopée et l'air. En particulier, de tels modèles sont capables de représenter les profils de turbulence de l'air du canyon et dans la sous-couche de rugosité. Cependant, une telle précision se fait au dépend de l'interaction avec le modèle atmosphérique. En effet, ces schémas sont relativement complexes à coupler avec un modèle atmosphérique.

Pour illustrer ces modèles multi-couches de la canopée urbaine, nous nous sommes intéressés au FMV (Finite Volume Model).

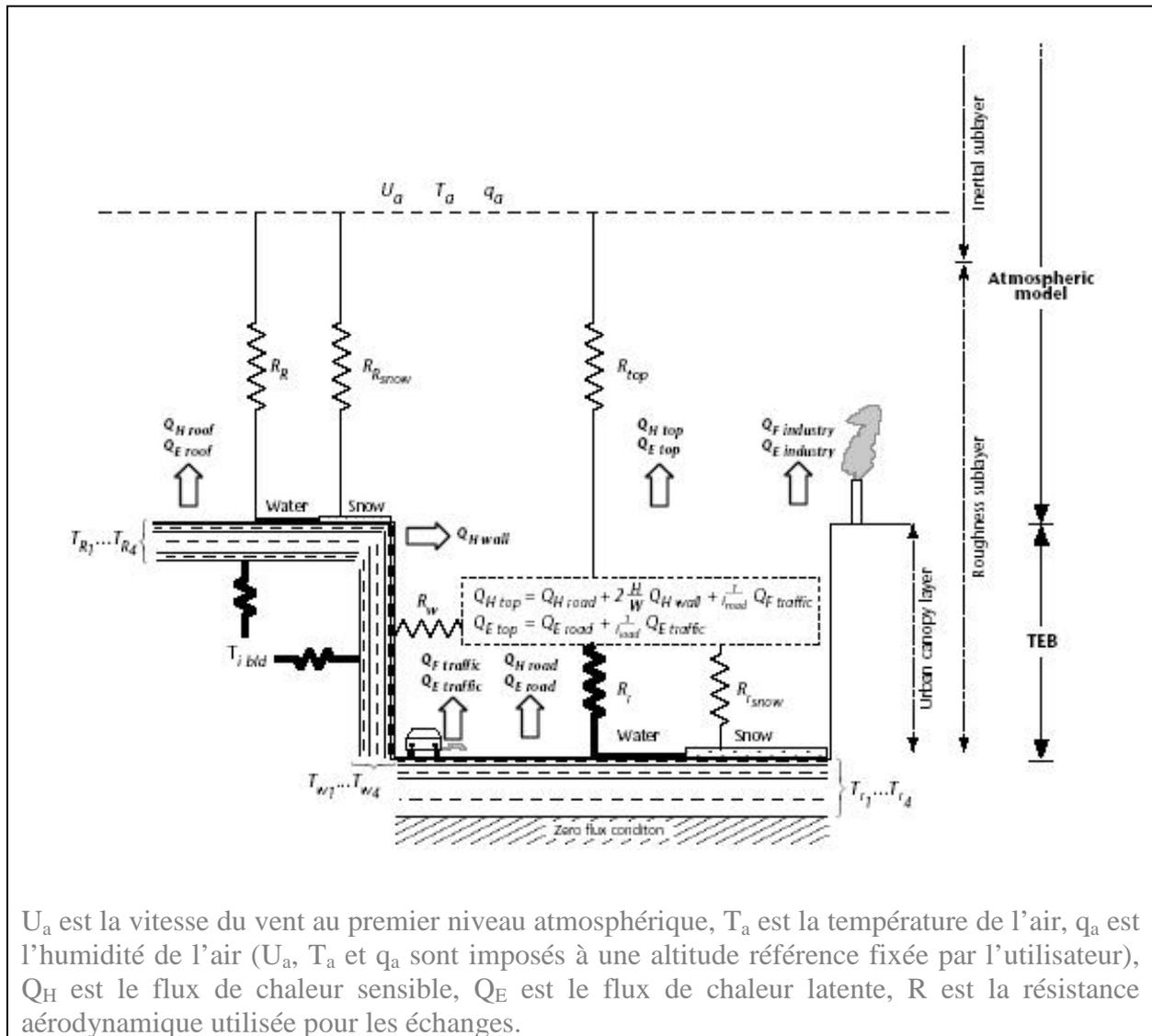
II.2.3.a TEB (Town Energy Balance) : un modèle à simple couche

Le modèle TEB est un schéma de surface développé par Masson (2000) au CNRM (Centre National de Recherche Météorologique) de Toulouse.

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), qui modélise les échanges entre la végétation, les sols naturels et les étendues d'eau et l'atmosphère. Si plusieurs types de couverts sont présents sur une maille, les paramètres sont moyennés en fonction de la surface relative des types de couvert.

Ces deux schémas peuvent être utilisés 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). Ils peuvent également être couplés 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 nouveau modèle de prévision de Météo-France, opérationnel fin 2008).



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

TEB s'appuie sur le concept du canyon urbain (Oke, 1978), 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 49).

TEB simplifie considérablement la morphologie urbaine puisqu'il applique le concept de canyon urbain pour toute la surface urbaine. 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).

II.2.3.b Finite Volume Model (FVM) urban module : un modèle multicouches

Un schéma permettant de paramétrer en détail les échanges de surfaces a été développé par Martilli (2001) au sein du modèle de méso-échelle FVM pour simuler de façon semi explicite les couches de la canopée urbaine.

La ville est caractérisée par les paramètres suivants (Roulet, 2004) :

- La forme des rues canyon, qui dépend de la distance entre les rangés de bâtiments (W), et la forme des bâtiments qui s'exprime en fonction de la largeur des toits (B) et la hauteur des murs (figure 50) ;
- La hauteur des bâtiments se fait selon une distribution statistique (modèle multicouches). On exprime à la fois la probabilité γ d'avoir des bâtiments avec une certaine hauteur z et la part Γ en bâtiments plus hauts que cette hauteur z (figure 50) ; γ et Γ sont liés par l'équation suivante :

$$\Gamma(z_{iu}) = \sum_{ju=iu}^{nu} \gamma(z_{ju})$$

Avec nu le plus haut niveau de la grille urbaine.

- L'orientation des rues ;

- Les propriétés des matériaux (diffusivité thermique⁵¹, capacité thermique, albédo et émissivité pour les trois types de surfaces urbaines : rue, mur et toit).

Le module calcule le flux turbulent et les paramètres climatiques pour chaque direction de rue en tenant compte des différentes hauteurs du cadre bâti. Une moyenne est ensuite effectuée en fonction des orientations spécifiées par l'utilisateur.

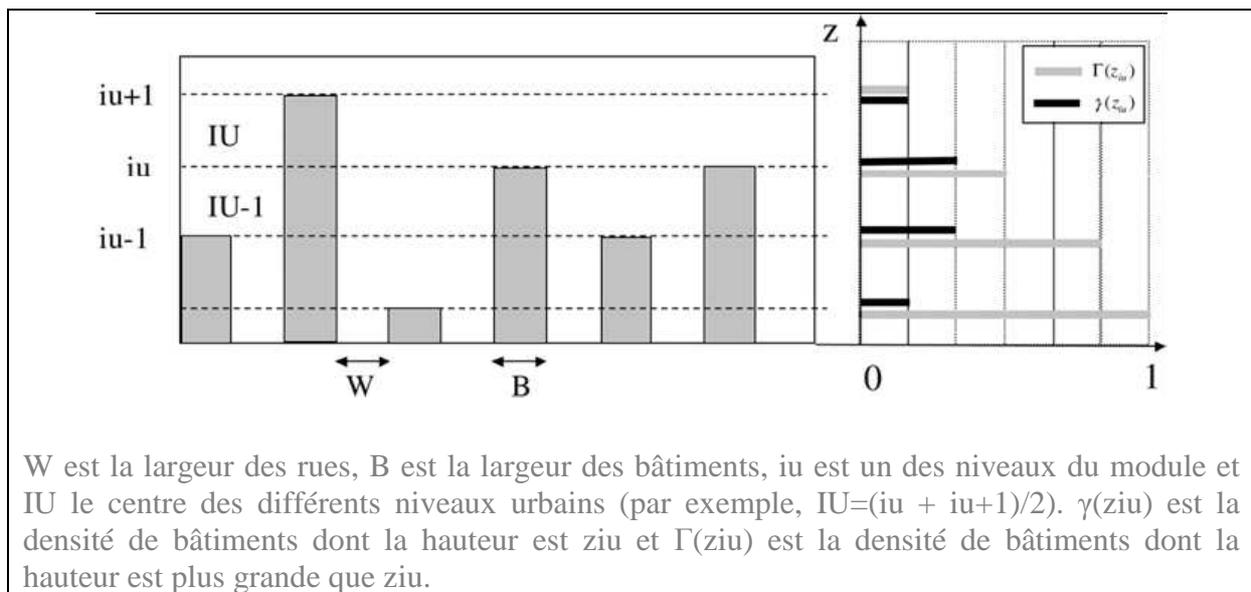


Figure 50 : Représentation schématique de la grille numérique du module urbain (Martilli *et al.*, 2002)..

Les principaux impacts du cadre bâti sur le flux d'air sont pris en compte (Roulet, 2004) (figure 51) :

- La force de traînée⁵² due aux surfaces verticales des bâtiments (murs) ainsi que la perte associée de quantité de mouvement⁵³,
- Les forces de frictions⁵⁴ des surfaces horizontales (rues et toits), avec également la perte associée de quantité de mouvement,
- L'ombrage et le piégeage du rayonnement au sein de la rue canyon, avec les conséquences induites sur les flux de chaleur,

⁵¹ La diffusivité thermique représente la vitesse de pénétration et l'atténuation d'une onde thermique dans un milieu. Elle exprime l'aptitude d'un corps à transmettre la chaleur plutôt qu'à l'absorber. Plus la chaleur met de temps à traverser un corps et plus sa diffusivité est faible.

⁵² La force de traînée est une force qui s'oppose au mouvement du corps et c'est le travail de cette force qui entraîne une consommation d'énergie.

⁵³ En physique, la quantité de mouvement est la grandeur physique associée à la vitesse et à la masse d'un objet.

⁵⁴ La friction est la force de résistance au glissement d'un objet au contact de l'autre.

- La production plus importante d'énergie cinétique⁵⁵ turbulente à partir de l'énergie cinétique moyenne.

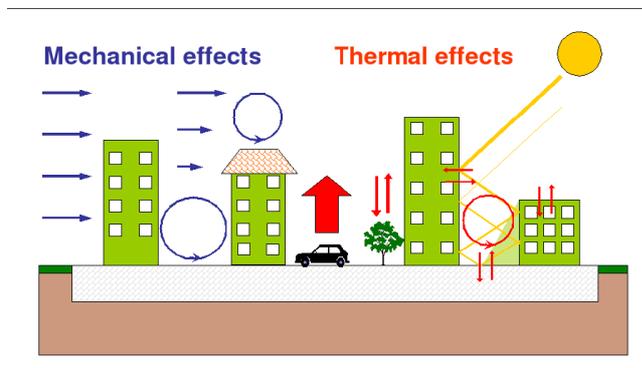


Figure 51 : Effets thermiques et mécaniques pris en compte dans le module urbain du *Finite Volume Model* (Krpó *et al.*, 2006).

Les équations de masse, de quantité de mouvement, d'énergie et d'énergie cinétique sont résolues, et des termes extérieurs sont inclus pour représenter les effets thermiques (radiation solaire, sources anthropiques, etc.) et les effets mécaniques (le cisaillement du vent, la turbulence, etc.) des surfaces des bâtiments (toit, murs et rue) (Krpó *et al.*, 2006).

Les effets les plus importants des bâtiments sur leur environnement climatique sont : des forces de cisaillement (ou forces de frottement) et de résistance importantes, un différentiel chaud/froid des surfaces au soleil/à l'ombre, des effets de piégeage du rayonnement, et un stockage de chaleur (Krpó *et al.*, 2006).

Le FVM permet en cas de couplage avec un modèle atmosphérique de plus grande échelle de reproduire les effets de la zone urbaine. Le cas de la ville de Bâle a été simulé en couplage (figure 52). L'image de gauche montre la température au-dessus de Bâle quand le modèle atmosphérique utilise une représentation simple de la ville, c'est-à-dire avec un sol nu et sec. L'image de droite montre les résultats lorsque les effets liés à la ville sont pris en compte par le biais du FVM. Cette dernière simulation montre mieux les influences de la ville de Bâle, qui sont faiblement perçues dans le premier cas.

⁵⁵ L'énergie cinétique est l'énergie que possède un corps du fait de son mouvement. L'énergie cinétique d'un corps est égale au travail nécessaire pour faire passer le dit corps du repos à son mouvement de translation ou de rotation.

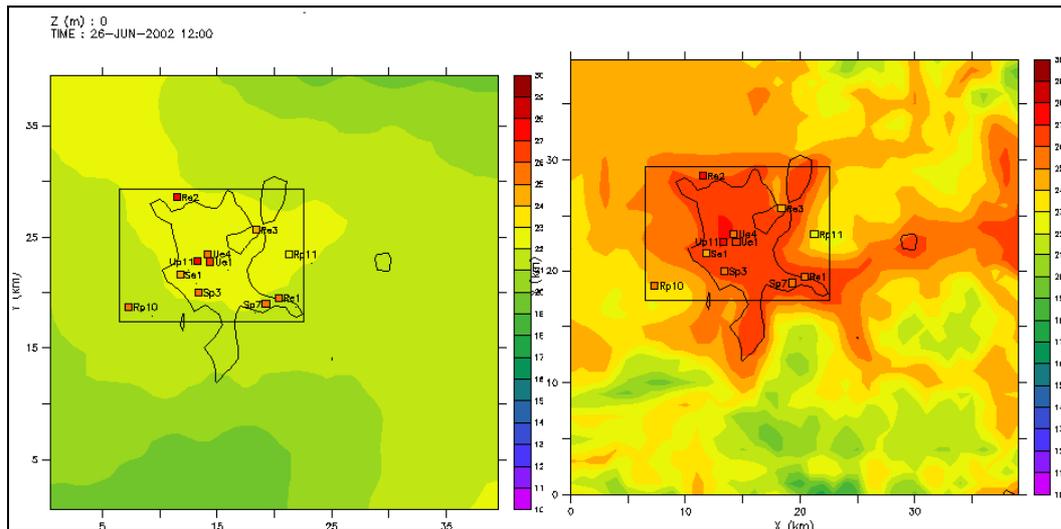


Figure 52 : Simulation de la température au-dessus de la ville de Bâle (Suisse) sans (gauche) et avec (droite) une représentation de la ville par le biais du *Finite Volume Mode*. (Krpó et al., 2006). La résolution est de 1km x 1km.

Ce modèle a également été testé en mode couplé avec la ville de Mexico et a donné des résultats en accord avec les mesures effectuées sur sites (Roulet, 2004).

La finesse proposée par le *Finite Volume Model* pour décrire le cadre bâti (densité des bâtiments en fonction de la hauteur) a cependant quelques inconvénients. Ce schéma est en effet difficile à coupler avec des modèles atmosphériques et le temps de calcul est important (Masson, 2006).

Plusieurs modèles ont ainsi été développés aujourd'hui pour permettre de simuler le climat urbain ou, plus précisément, les différents phénomènes physiques à son origine. Chacun d'eux s'appuie sur ses propres hypothèses et possède sa propre portée.

Le choix du modèle de simulation que nous allons présenter dans la partie suivante s'est appuyé sur l'étude présentée ici des différents modèles existants. Pour le sélectionner, plusieurs critères ont été proposés en relation avec leur capacité à modéliser les mécanismes physiques à l'origine de la formation du climat urbain et leur capacité à prendre en compte les domaines d'action que nous allons identifier dans la partie suivante.

Troisième partie :
Quantification des effets de différents
facteurs sur le climat urbain

I Introduction

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 les études de Rosenfeld *et al.* (1995), qui ont travaillé sur Los Angeles (Etats-Unis), de Sailor et Dietsch (2005), qui ont travaillé sur plusieurs villes américaines, ou encore de Rosenzweig *et al.* (2006), qui ont travaillé sur New-York (Etats-Unis), et dont nous avons présenté les résultats en fin de première partie.

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

II Proposition de domaines d’actions et de leviers pour agir sur le climat urbain

Dans la première partie, nous avons explicité l’influence de différents facteurs urbains dans l’apparition du climat urbain. Nous avons ainsi mis en évidence les conséquences climatiques dues à une couche superficielle du sol faiblement pourvue en espaces végétalisés et fortement imperméabilisée, à des activités génératrices de chaleur et à la présence de bâtiments et d’infrastructures.

Ces trois catégories de facteurs (couche superficielle du sol, activités et cadre bâti) ne correspondent pas en tant que telles à des leviers d’actions. En effet, elles correspondent plus à une description de la ville par « couches », où le sol est le lieu recevant un certain cadre bâti (contenant) dans lequel des activités sont effectuées (contenu). Ceci ne reflète pas la manière dont se construit, se gère et « s’utilise » la ville.

Cinq grands domaines d’action apparaissent pour influencer sur le climat urbain : le bâtiment, l’espace public, l’organisation urbaine, les activités industrielles et les transports. Pour chacun de ces domaines, les sous-chapitres suivants présentent tout d’abord leur définition et les leviers d’actions, que ce domaine contient, avec leurs critères d’évaluation. Il est à noter que ces cinq domaines ne sont pas indépendants et que des relations existent entre les éléments qui les composent.

Les leviers d’action concernant les activités industrielles et les transports étant plus de l’ordre de l’organisation ou de l’amélioration des équipements que d’une modification du cadre bâti, nous avons choisi de ne pas les spécifier dans notre étude même si nous tenons compte de leur influence.

II.1 Bâtiment

Le bâtiment est défini comme une construction destinée à servir d’abri et à protéger des personnes et des biens individuels ou collectifs. Ses caractéristiques techniques et physiques sont avant tout déterminées par ce qu’il va protéger, par sa fonction mais également par les contraintes réglementaires auxquelles il est soumis⁵⁶.

⁵⁶ Nous faisons ici volontairement abstraction de l’influence sur les éventuelles caractéristiques du bâtiment des envies et goûts en termes d’habitat des différentes catégories sociales. L’article de Cluzel (1986) examine cette

Trois leviers d'actions en relation avec ce domaine apparaissent suite à l'analyse précédemment effectuée sur la formation du climat urbain :

- La forme du bâtiment, souvent représentative d'une époque et/ou d'une architecture. Elle peut se décrire par la taille, le gabarit de l'immeuble, son nombre d'étage, sa surface, etc. (figure 54).
- L'enveloppe du bâtiment, représentative également d'une époque et/ou d'une architecture. Les matériaux utilisés et la couleur extérieure constitue les principaux éléments descriptifs de ce levier d'action.
- Le fonctionnement du bâtiment. Il se décrit avec le type d'occupation, les systèmes de ventilation, de climatisation et de chauffage installés, etc.

II.2 Espace public

L'espace public trouve de multiples définitions. Comme le signale Dumont (2005), c'est un « *terme protéiforme, à la fois « espace métaphysique », « espace d'émergence de la raison », « phénomène sociologique de rencontre », « miroir des comportements », « manière de vivre ensemble » ou encore éléments du « tissu construit »* ». Il est ainsi parfois défini par opposition aux espaces commerciaux, culturels et privés. Par espace public, nous entendons ici uniquement la voirie (terrestre), les rues principalement et les places, et les espaces verts ou végétalisés (privatifs compris).

Il existe un grand nombre de types de rues (Allain, 2004). Dans notre cas nous resterons sur une typologie restreinte contenant simplement des ruelles et rues ordinaires, des rues principales, des boulevards et des avenues et donc en excluant les rues-ponts, les escaliers urbain, les passages couverts, les skyways, les rues souterraines, les rues-canaux, les rues-quai. Trois leviers d'actions peuvent être mis en avant :

- La forme des rues, qui inclut leur largeur, leur profil en travers, leur gabarit, le rapport chaussée-trottoir.
- La composition (les matériaux) du sol de la voirie, c'est-à-dire principalement le revêtement en surface.

différence de définition de l'habitat idéal selon les modes de vie, les aspirations et la part de rêve des catégories de personnes.

- La géométrie des rues, c'est-à-dire leur tracé, rectiligne ou sinueux, leur orientation.

Il existe également le levier d'action suivant, qui concerne à la fois la voirie et les espaces verts :

- Les arbres d'alignement, présents principalement sur les boulevards et les avenues.

Les espaces végétalisés d'une ville comprennent les parcs et jardins publics mais également les jardins privés. Ces derniers peuvent constituer une surface importante. Le levier d'action suivant peut être proposé :

- La nature de l'espace végétalisé, qui comprend à la fois le type d'espace (parc, jardin ou square) et la nature de la végétation présente.

II.3 Organisation spatiale

Par organisation spatiale, nous entendons l'agencement spatial des bâtiments et de l'espace public les uns par rapports aux autres et leur importance en termes de surface au sein de la ville. Les techniques de construction des bâtiments sont dans le champ d'étude de l'architecture ; déterminer la manière dont les bâtiments sont organisés à l'échelle de la ville incombe à l'urbanisme.

Les bâtiments constituent les pleins, alors que l'espace public, tel que nous l'avons défini, constitue la majorité des vides. C'est l'agencement de ces pleins et de ces vides qui nous intéressent. C'est à la fois le plan, le maillage, le volume urbain que constitue l'ensemble des deux domaines précédents.

Concernant ce domaine d'action, trois leviers d'action peuvent être proposés :

- Les densités, qui donnent un aperçu synthétique de l'espace urbain. Ces densités comprennent ainsi la densité construite, la densité de population, la densité résidentielle, la densité d'espaces verts, la densité d'arbres d'alignement, la densité de voirie, etc.
- L'agencement des espaces publics au sein de la ville, que l'étude du rapport entre les pleins et les vides peut éclairer ainsi que la position des espaces verts dans la ville.

- La forme et le profil de l'espace urbain, qui comprennent les rapports entre largeur de rue et hauteur d'immeuble, l'alignement des bâtiments sur la rue, la silhouette des villes, etc. (figure 53).

La densité est très utilisée en urbanisme et en architecture, mais selon son usage et l'échelle considérée (parcelle, îlot, secteur d'habitat ou de ville), elle n'est pas définie de façon identique comme nous le montre le tableau 8 issu du livre de Allain (2004). Sur l'ensemble de ces densités, seul le coefficient d'emprise au sol a une réelle influence pour l'étude de la climatologie urbaine, les autres types de densité étant plus destinées à décrire l'espace intérieure du bâtiment.

Tableau 8 : Types de densité et indicateurs (Allain, 2004)

| Notions | Critères, unités | Usage principale |
|--|-------------------------|----------------------------|
| Densité de secteur (DS) | Logements/ha | Projet urbain, SD, PLU |
| Densité d'îlot (DI) | SHON, logt/ha | Programmation urbanistique |
| Densité parcellaire (DP) | SHON | Programme de construction |
| COS net réel (COSr) | SHON existante / SP | Analyse morphologique |
| COS net légal (COSl) | SHON autorisée / SP | POS/PLU ; constructibilité |
| COS brut (COSb) | SHOB / SP | Volumétrie générale |
| Emprise au sol | SHOB du rez-de-chaussée | Consommation d'espace |
| Epannelage moyen | SHOB / emprise bâtie | Analyse morphologique |
| - SHOB (Surface hors œuvre brute) = Surface de planchers calculée à partir du mur extérieur de façade, sans aucune déduction. - SHON (Surface hors œuvre nette) = SHOB – combles et sous-sols non aménageables (h < 1,80 mètres), balcons, loggias, toitures-terrasses accessibles, surfaces non-closes en rez-de-chaussée. - Surface habitable = SHON – surface des murs, cloisons et gaines techniques et espaces communs. - CES (Coefficient d'emprise au sol) : exprime le pourcentage de surface bâtie au sol. Il s'évalue à la parcelle (SP), à l'îlot ou au secteur d'habitat ou de ville. | | |

Tableau 9 : Part du sol occupé par la voirie (%) (Allain (2004), d'après Métropolis, OCDE, Banque Mondiale).

| | |
|---------------------------|-----|
| Villes d'Europe | 25% |
| Villes d'Amérique du Nord | 30% |
| Villes d'Asie | 15% |
| Calcutta | 5% |
| Bangkok | 11% |
| Los Angeles | 40% |

La densité de la voirie, c'est-à-dire la part de sol occupé par la voirie, varie d'un urbanisme à l'autre comme le montrent les chiffres publiés par la Banque Mondiale (tableau 9). Dans le

cadre de notre étude, c'est également une densité qui a une certaine importance, du fait du comportement des sols en asphalte (cf. première partie).

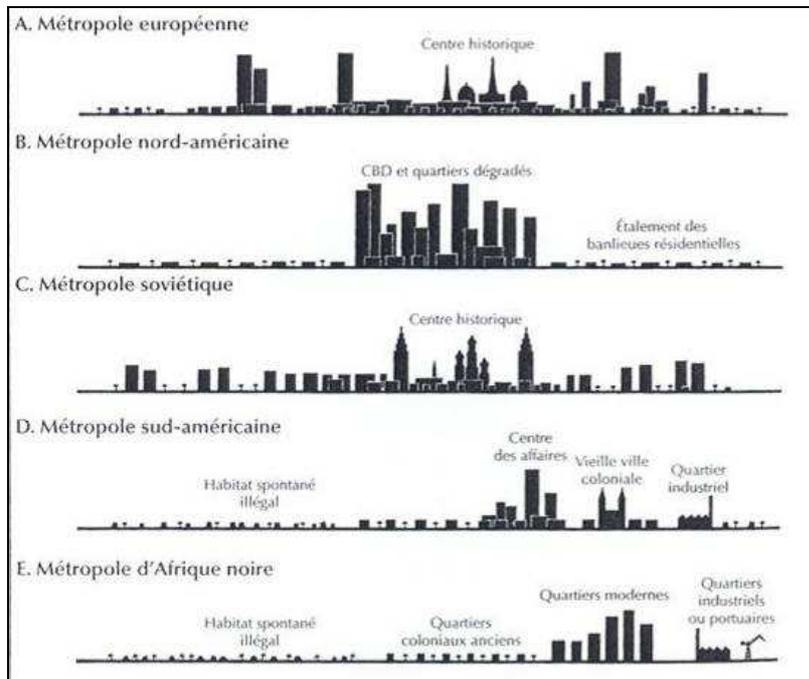


Figure 53 : Profils et domaines urbains (Allain (2004), d'après J.-P. Paulet, Géographie urbaine, Armand Colin, 2000)

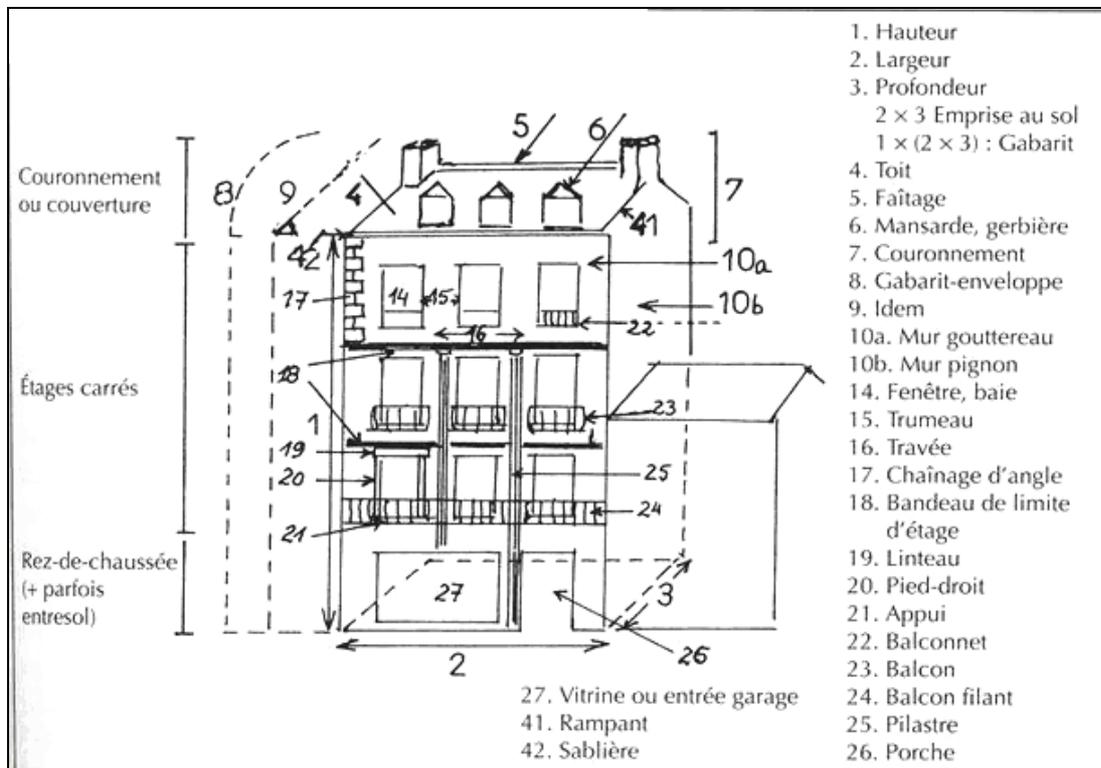


Figure 54 : Volumétrie générale et éléments de façade (Allain, 2004)

Si pour Allain (2004), « *Les silhouettes des villes sont révélatrices des types de sociétés, de leur traditions et leurs règlements, de leur plus ou moins grand dynamisme* », elles correspondent dans notre cas à une influence plus ou moins importantes sur différents paramètres climatiques (figure 53).

La figure 54 permet d'expliciter certains termes descriptifs utilisés pour un bâtiment en architecture.

II.4 Synthèse des leviers d'actions et des critères d'évaluation en relation avec la climatologie urbaine

Les leviers d'actions peuvent être décrits à partir de différents critères. Le tableau 10 ci-dessous présente de façon non exhaustive les critères existants.

Tableau 10 : Domaines, leviers d'actions et critères descriptifs des leviers.

| Domaine | Levier d'action | Critère | Définition du critère | Unité du critère | Remarques |
|-------------|-------------------|---|--|------------------|---|
| Le bâtiment | Forme du bâtiment | Hauteur (ou gabarit-enveloppe ⁵⁷) de l'immeuble | Hauteur verticale (à la sablière) plus couronnement (volume des combles) | m | Ces deux critères sont en relation avec la hauteur du bâtiment et donc la rugosité du milieu urbain. |
| | | Nombre d'étages | Nombre d'étages | - | |
| | | Coefficient d'emprise au sol | Pourcentage de surface bâtie au sol pour la ville à la parcelle ou l'îlot. | % | Ces critères influencent la proportion de surfaces de toits, qui n'a pas forcément la même influence que les autres surfaces. |
| | | Largeur du bâtiment | Largeur du bâtiment | m | |
| | | Profondeur du bâtiment | Profondeur du bâtiment | m | |
| | | Compacité | Rapport entre le volume protégé et la surface de déperdition, l'enveloppe extérieure du bâtiment | - | |

⁵⁷ Le gabarit-enveloppe « est le volume fictif que les immeubles ne doivent pas dépasser. Défini par la hauteur verticale (à la sablière) plus couronnement (volume des combles), il est couramment exprimé par le nombre de niveaux ou d'étages (R+1, R+4+combles). Le toit peut être plat ou à pente variable, à 2 rampants (et donc 2 pignons) ou à 4 rampants. Le couronnement est défini réglementairement par une pente à 45° ou le rayon d'un quart de ce cercle limité par une ligne de faîtage horizontale. La hauteur et le gabarit sont le plus souvent déterminés par les règles de prospect ($H = L$) et la distance aux limites parcellaires : $L = H/2 \geq 3m$ (article R.111-18 à 20, code de l'Urbanisme) sauf quand les bâtiments sont mitoyens. Ils peuvent voir une précision beaucoup plus grande dans les règlements de POS/PLU. » (Allain, 2004).

| | | | | | |
|-------------|--------------------------|---|--|--|---|
| | | Nombre de façades | L'immeuble peut-être à l'alignement et accolé à ses voisins (mitoyenneté) ou en milieu de parcelle | - | exposées au rayonnement solaire. |
| | | Contacts | Nombre de contact entre bâtiments | - | |
| | | Contigüité surfacique totale | Surface totale de mitoyen / surface totale d'enveloppe | - | |
| | | Contigüité surfacique verticale | Surface verticale de mitoyen / surface verticale d'enveloppe | - | |
| | | Age | Date de construction | date | Ce critère peut permettre de déterminer un bâtiment représentatif d'une époque. |
| | Enveloppe du bâtiment | Surface vitrée | Surface vitrée extérieure / surface totale extérieure | - | |
| | | Caractéristiques thermiques du vitrage | Albédo, émissivité, conductivité et capacité thermiques, épaisseur du vitrage | τ , τ , $W.m^{-1}.K^{-1}$, $J.m^{-3}.K^{-1}$, m. | |
| | | Epaisseur moyenne des murs | Moyenne des épaisseurs | m | Ces critères permettent de qualifier ou quantifier le comportement thermique et radiatif du bâtiment. |
| | | Coupe du mur et du toit avec les matériaux utilisés | Description des matériaux utilisés | | |
| | | Caractéristiques thermiques des matériaux de construction | Albédo, émissivité, conductivité et capacité thermiques, épaisseur | τ , τ , $W.m^{-1}.K^{-1}$, $J.m^{-3}.K^{-1}$, m. | |
| | | Couleur des murs | Teinte moyenne des murs | | |
| | | Couleur des toits | Teinte moyenne des toits | | |
| | | Age | Date de construction et dates des rénovations | dates | |
| | Exploitation du bâtiment | Type d'occupation (habitation, activité) | Type d'occupation (habitation, activité) | - | |
| | | Température à l'intérieur du bâtiment | Température à l'intérieur du bâtiment | °C (ou K) | |
| | | Nature de l'énergie utilisée pour le chauffage | Nature de l'énergie utilisée pour le chauffage | - | Ces critères influencent directement ou indirectement les pertes de chaleur du bâtiment. |
| | | Energie consommée pour le chauffage | Energie consommée pour le chauffage | GJ/an | |
| | | Nature de l'énergie utilisée pour la climatisation | Nature de l'énergie utilisée pour la climatisation | - | |
| | | Energie consommée pour la climatisation | Energie consommée pour la climatisation | GJ/an | |
| | | Nature de l'énergie utilisée pour la ventilation | Nature de l'énergie utilisée pour la ventilation | - | |
| | | Energie consommée pour la ventilation | Energie consommée pour la ventilation | GJ/an | |
| Les espaces | Forme de la rue | Largeur de la rue | Largeur de la rue | m | Ces critères |

| | | | | | |
|--|---|---|---|--|--|
| publics | | Profil en travers | Coupe perpendiculaire à l'axe de la route de l'ensemble des points définissant sa surface | - | influencent la proportion de voirie. |
| | | Rapport chaussée-trottoir | Surface de chaussée / surface de trottoir | - | |
| | Composition (matériaux) du sol de la voirie | Caractéristiques thermiques des revêtements | Albédo, émissivité, conductivité et capacité thermiques, épaisseur | $\tau, \epsilon, W.m^{-1}.K^{-1}, J.m^{-3}.K^{-1}, m.$ | Ces critères permettent de qualifier ou quantifier le comportement thermique et radiatif de la voirie. |
| | | Couleur en surface | Couleur moyenne des rues | | |
| | Géométrie des rues | Tracé (rectiligne ou sinueux) | Projection orthogonale des linéaires des rues sur une direction donnée | - | Ces critères influencent la ventilation du milieu. |
| | | Longueur | Longueur moyenne des rues | m | |
| | | Orientation | Orientation moyenne des rues | - | |
| | Arbres d'alignement | Présence d'arbres d'alignement | Présence d'arbres d'alignement | Oui/non | |
| | | Espacement entre les arbres | Espacement moyen entre les arbres | - | |
| | | Natures des arbres | Espèces des arbres | - | |
| Nature de l'espace végétalisé | Type d'espace (parc, jardin, square, toiture végétalisée, fontaine, plan d'eau) | Type d'espace (parc, jardin, square, toiture végétalisée, fontaine, plan d'eau) | - | | |
| | Nature de la végétation présente | Genre, espèces de la végétation présente | - | | |
| L'organisation urbaine | Densités | Coefficient d'emprise au sol | Pourcentage de surface bâtie au sol pour la ville | % | Ces critères influencent entre autres la part de surface minérale au sein de la ville. |
| | | Densité de construction ou coefficient d'occupation des sols (COS) | Surface de plancher hors œuvre nette (SHON) / surface de la parcelle | - | |
| | | Taux, densité de minéralisation | Surface minérale / surface totale | - | |
| | | Emprise des rues | Part du sol occupé par la voirie | % | |
| | | Densité humaine | Nombre d'habitants / surface de la ville | Hab/m ² | |
| | | Taux, densité de végétal (toiture végétalisée exclue) | Surface végétale / surface totale | - | |
| | | Densité d'arbres d'alignement | Nombre d'arbres d'alignement / surface de voirie ou surface de la ville | Arbres/m ² | |
| | | Part de toitures végétalisées | Surface de toitures végétalisées / surface de toitures | - | |
| | | Densité de plan d'eau | Surface des plans d'eau / surface totale | - | |
| | | Densité de fontaine | Nombres de fontaines / surface de la ville | Fontaines/m ² | |
| Agencement des espaces publics au sein de la ville | Rapport entre les pleins et les vides | Cartographie des pleins et des vides de la ville | - | | |

| | | | | | |
|------------------------------------|--|--|--|---|--|
| | | Position des espaces verts dans la ville | Cartographie de la ville avec la localisation et la surface des espaces verts | - | Les influences d'un espace vert à l'est ou à l'ouest d'une ville sont, spatialement au moins, différentes. |
| Forme et profil de l'espace urbain | Prospect | | Hauteur moyenne des bâtiments / largeur moyenne des rues | - | |
| | Facteur de vue du ciel | | Angle solide d'ouverture au ciel | - | |
| | Profil en long et élévation | | Elévation verticale dans le sens de l'axe de la route de l'ensemble des points constituant celui-ci. | - | |
| | Alignement des bâtiments sur la rue | | Retrait ou reculement du bâtiment par rapport à l'alignement | m | |
| | Rugosité de la ville | | Longueur de rugosité de la ville (souvent environ 1/10 de la hauteur moyenne des bâtiments) | m | |
| | Profil urbain, silhouette de la ville (nord-américaine, européenne, d'Afrique noire, etc.) | | Dessin du profil urbain, de la silhouette de la ville | - | |
| Activités professionnelles | | | | | |
| Transports | | | | | |

Ce tableau peut être utilisé pour effectuer un graphe arborescent avec objectifs. Par exemple, pour le cas d'une diminution de l'intensité de l'îlot de chaleur la diminution de température constitue la problématique fondamentale, qui se décline en quatre sous-problématiques que sont :

- réduire les rejets directs de chaleur sensible,
- réduire les stocks de chaleur,
- apporter des sources de fraîcheur,
- et améliorer la ventilation du milieu urbain.

Plusieurs objectifs sont attribuer à chacune de ces sous-problématiques, puis des sous-objectifs (ou critères) eux-mêmes caractérisés par des indicateurs (en annexe 8, le cas de la diminution de température est disponible).

III Choix d'un modèle de simulation numérique et analyse de sa portée et de ses limites

Au sein de la deuxième partie, nous avons présenté différents modèles de simulation numérique du climat urbain avec certaines de leur portée et limites. Ces modèles sont : ENVI-met développé par Bruse (2004) de l'université de Bochum (Allemagne), SOLENE développé par le laboratoire CERMA de Nantes, NARP-LUMPS développé par Grimmond et Oke (2002), SM2-U développé par l'Ecole centrale de Nantes, TEB développé par Masson (2000) au CNRM et FVM développé par Martilli (2001). Le choix de notre modèle s'appuie sur leurs descriptions.

III.1 Choix d'un modèle de simulation numérique selon sa portée

Chaque modèle a ses avantages et ses inconvénients qui influencent plus ou moins leur capacité à modéliser les modifications climatiques de la ville. Nous avons fixé plusieurs critères pour essayer de départager ces différents modèles. Ces critères, en ce qui concerne les données d'entrée du modèle, sont en relation avec les domaines d'action identifiés précédemment (bâtiment, espace public, organisation spatiale, activités industrielles et transport).

Les critères pour les données d'entrée sont les suivant :

- Représentation fine du cadre bâti ;
- Représentation entière de la ville ;
- Prise en compte de la végétation ;
- Prise en compte des flux de chaleur d'origine anthropique ;
- Prise en compte des caractéristiques thermiques et radiatives des matériaux urbains.

En ce qui concerne le fonctionnement du modèle et les résultats à obtenir, les critères suivant ont été choisis :

- Calcul du bilan d'énergie ;
- Calculs aérodynamiques ;

- Calcul du bilan hydrique ;
- Ambiance thermique au niveau de la rue.

En effectuant, au regard de ces critères, une comparaison entre les différents modèles présentés précédemment (tableau 11), les modèles ENVI-MET, SM2-U, TEB et FVM sont ceux qui y répondent le mieux.

Tableau 11 : Critères disponibles ou non pour différents modèles et schémas climatiques (ENVI-met, SOLENE, NARP-LUMPS, SM2-U, TEB, FVM).

| | ENVI-MET | SOLENE | NARP-LUMPS | SM2-U | TEB/ISBA (SURFEX) | FVM |
|---|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Représentation fine du cadre bâti | Intègre ce critère | N'intègre pas ce critère | N'intègre pas ce critère | N'intègre pas ce critère | N'intègre pas ce critère | N'intègre pas ce critère |
| Représentation entière de la ville | N'intègre pas ce critère | N'intègre pas ce critère | Intègre ce critère | Intègre ce critère | Intègre ce critère | Intègre ce critère |
| Prise en compte de la végétation | Intègre ce critère | N'intègre pas ce critère | Intègre ce critère | Intègre ce critère | Intègre ce critère | Intègre ce critère |
| Prise en compte des flux de chaleur d'origine anthropique | Intègre partiellement ce critère | Intègre ce critère | Intègre partiellement ce critère | Intègre partiellement ce critère | Intègre ce critère | Intègre ce critère |
| Prise en compte des caractéristiques thermiques et radiatives des matériaux urbains | Intègre ce critère | Intègre ce critère | Intègre partiellement ce critère | Intègre ce critère | Intègre ce critère | Intègre ce critère |
| Calcul du bilan d'énergie | Intègre ce critère | Intègre ce critère | Intègre partiellement ce critère | Intègre ce critère | Intègre ce critère | Intègre ce critère |
| Calculs aérodynamiques | Intègre partiellement ce critère | Intègre ce critère | Intègre ce critère | Intègre ce critère | Intègre ce critère | Intègre ce critère |
| Calcul du bilan hydrique | Intègre ce critère | N'intègre pas ce critère | N'intègre pas ce critère | Intègre ce critère | Intègre ce critère | N'intègre pas ce critère |
| Ambiance climatique au niveau de la rue | Intègre ce critère | Intègre ce critère | N'intègre pas ce critère | Intègre ce critère | Intègre ce critère | Intègre ce critère |

| | | | | | | |
|---------|---|--------------------------|---|----------------------------------|---|--------------------|
| LEGENDE |  | N'intègre pas ce critère |  | Intègre partiellement ce critère |  | Intègre ce critère |
|---------|---|--------------------------|---|----------------------------------|---|--------------------|

La validité du modèle, la simplicité d'utilisation ainsi que la disponibilité du modèle nous ont permis de faire notre choix parmi ces derniers modèles.

ENVI-Met, malgré de nombreux atouts, n'a pas été retenu en grande partie du fait de sa validation partielle mais également du fait des difficultés à modéliser les situations

climatiques sans vent et d'une échelle ne permettant pas de prendre en compte une ville entière.

En ce qui concerne les autres modèles, tous les trois validés, Masson (2006) a mis en avant certains avantages et inconvénients des différentes catégories de modèles de méso-échelle tels que SM2-U, TEB et FVM, chacun appartenant respectivement aux modèles d'espaces végétalisés adaptés pour inclure des surfaces urbanisées, aux modèles de la canopée urbaine simple-couche et aux modèles de la canopée urbaine multicouches. Son analyse fait apparaître, entre autres, la difficulté d'utilisation du modèle FVM développé par Martilli (2001).

Le choix du modèle TEB a été permis par la disponibilité du modèle et l'aide à l'usage offert par son concepteur (Valéry Masson) et d'autres utilisateurs. La base de données d'entrée du modèle peut être, dans le cadre de villes fictives, constituées sans trop de difficultés puisque TEB ne s'attache pas aux particularités entre les bâtiments mais aux caractéristiques globales du tissu urbain. Cette simplification architecturale peut cependant être perçue comme une limite. Une description plus fine des différentes hypothèses physiques de TEB ainsi que de sa portée et de ses limites est effectuée au sein de l'annexe 9. Nous retiendrons cependant les points suivants.

III.2 Hypothèses et limites du modèle choisi

Tout d'abord, au sein de TEB, la surface urbaine est découpée uniquement selon un maillage horizontal. Chaque maille possède ses propres caractéristiques qui s'appuient sur le concept du canyon urbain (figure 55). Ce canyon est constitué de trois types de surfaces : une route, deux murs et un toit. Le toit et la route sont des surfaces planes horizontales et les murs des surfaces verticales de même hauteur. Si pour les routes et les murs ces hypothèses se retrouvent effectivement dans les méthodes constructives, les toits plats ne concernent pas encore la majorité du paysage urbain. On regrettera donc la possibilité d'intégrer une pente au toit, qui influence, entre autres, la surface d'échange entre le bâtiment et l'atmosphère mais également les processus radiatifs.

Les hypothèses suivantes sont également imposées par TEB :

- Les bâtiments sont localisés le long de routes identiques, dont la longueur est considérée comme étant plus importante que la largeur. Il n'est donc pas possible de modéliser un espace urbain dont la largeur des rues serait trop hétérogène.
- Toutes les orientations de rue sont possibles, et elles existent avec la même probabilité. Cette hypothèse ne permet donc pas de modéliser pour une ville une orientation prédominante des rues, qui n'est pas sans influence sur la ventilation du milieu urbain.

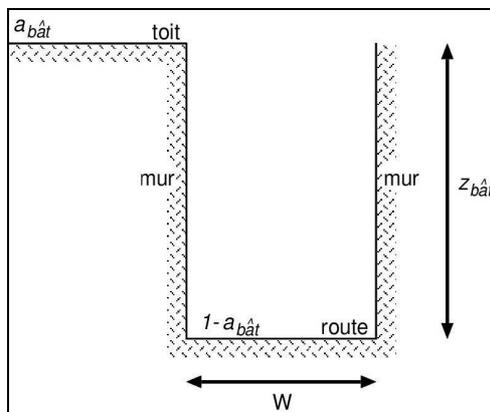


Figure 55 : Schématisation du canyon urbain dans TEB - avec W la largeur moyenne des rues, $a_{bât}$ la fraction de bâtiment et $z_{bât}$ la hauteur moyenne des bâtiments (Lemonsu, 2003).

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

- la longueur de rugosité dynamique du couvert urbain⁵⁸ ($z_{0mville}$) ;
- la fraction occupé par les bâtiments ($a_{bât} = \text{surface de toit} / \text{surface de toit et route}$) ;
- la hauteur du bâti ($z_{bât}$) ;
- et le facteur de forme du bâti ($\text{surface de mur} / \text{surface de route et toit} = (z_{bât}/W) * (1 - a_{bât})$).

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.

⁵⁸ Pour nos modélisations, nous fixerons la longueur de rugosité à 1/10 de la hauteur de bâti.

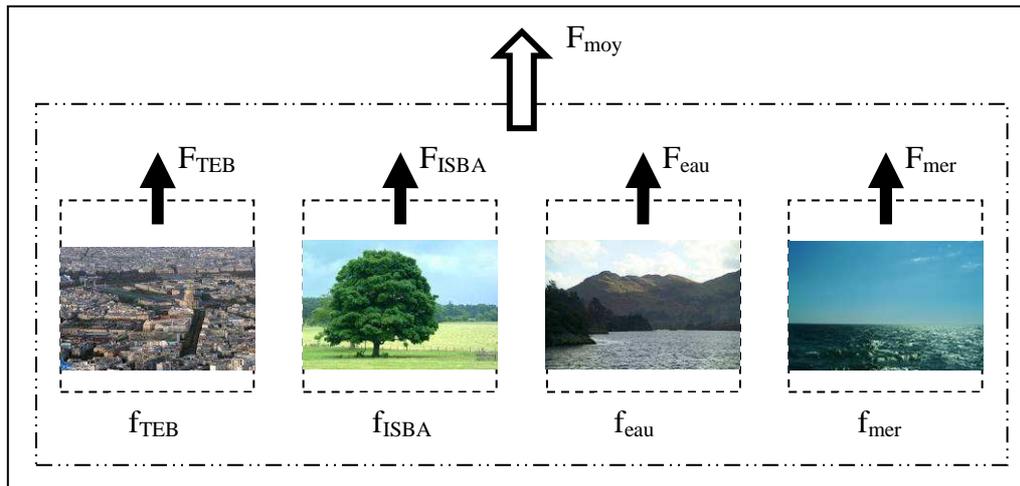


Figure 56 : Représentation des flux de surfaces moyens. D'après Lemonsu (2003).

Comme nous l'avons signalé lors de la présentation des différents modèles numériques, pour modéliser un milieu urbain pas uniquement minéral, TEB fonctionne conjointement avec ISBA, 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 56). 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 connaître l'influence d'une position particulière (nord, sud, est, ouest) d'un point d'eau ou d'un espace vert sur le milieu urbain.

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 :

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S \text{ (W.m}^{-2}\text{)} \quad \text{(Formule 15)}$$

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 19°C), Q_H le flux turbulent de 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.

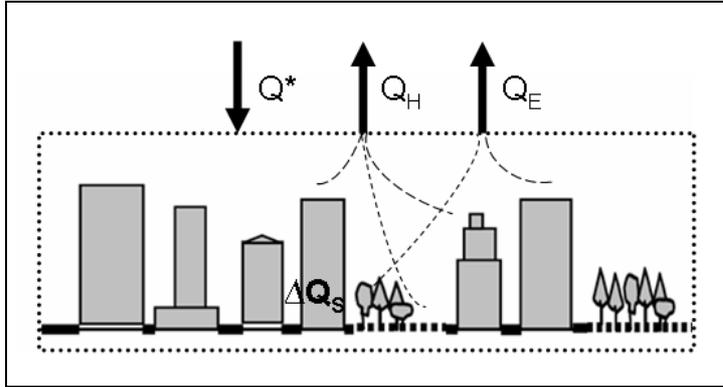


Figure 57 : Flux du bilan d'énergie calculé par SURFEX ($Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S$).

IV Choix d'une ville-témoin : Paris ou 'urbain dense'

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.

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 permettant la description d'un tissu de type 'urbain dense'⁵⁹, et utilisées actuellement pour la description de Paris intra-muros dans leurs propres simulations avec TEB, ainsi qu'aux données météorologiques de l'année 2006 de la station Montsouris de Paris.

Il a été décidé de choisir Paris pour cas-témoin de nos modélisations, d'où le choix, également, du forçage climatique utilisé. Préalablement à la mise en place de nos modélisations, il nous a semblé intéressant d'affiner les données de type 'urbain dense' pour décrire plus précisément Paris et ceci fait l'objet de ce chapitre.

IV.1 Paris, une ville très minérale

Paris est une ville très minérale⁶⁰ (figure 58). Selon que sont comptés ou non les deux bois, Paris offre 14,5 m² d'espaces plantés ou 5,8 m² par habitant. Ces chiffres sont inférieurs à ceux d'Amsterdam avec 36 m² par habitant, de Londres 45 m², de Bruxelles 59 m², de Madrid 68 m², de Vienne 131 m² ou de Rome 321 m² (Atelier parisien d'urbanisme, 2004).

⁵⁹ Le fichier de données 'urbain dense' est utilisé à l'heure actuelle principalement pour les villes françaises de conception traditionnelle (du fait de la représentation en rue canyon) ou pour des villes étrangères ayant une géométrie urbaine similaire aux villes françaises.

⁶⁰ « La place du végétal dans le paysage de la ville obéit aussi à des règles propres à Paris : Paris est une ville minérale inégalement aérée par de grands jardins hérités de l'ancien régime et surtout de l'époque haussmannienne. Ce réseau complété au XX^{ème} siècle par quelques parcs supplémentaires et de nombreux petits squares de proximité est jugé insuffisant et mérite encore d'être développé. En revanche, Paris bénéficie de 92 000 arbres d'alignement plantés le long des rues les plus larges et sur les berges de la Seine. Ce caractère très végétal des grands espaces publics parisiens, héritier de la tradition des cours, des mails et des boulevards plantés, lieux de promenade et de loisirs dès le XVIII^{ème} siècle mérite aussi d'être perpétué, préservé et renforcé car il contribue fortement à l'agrément des rues parisiennes. » Diagnostic du rapport de présentation du PLU de la Ville de Paris.

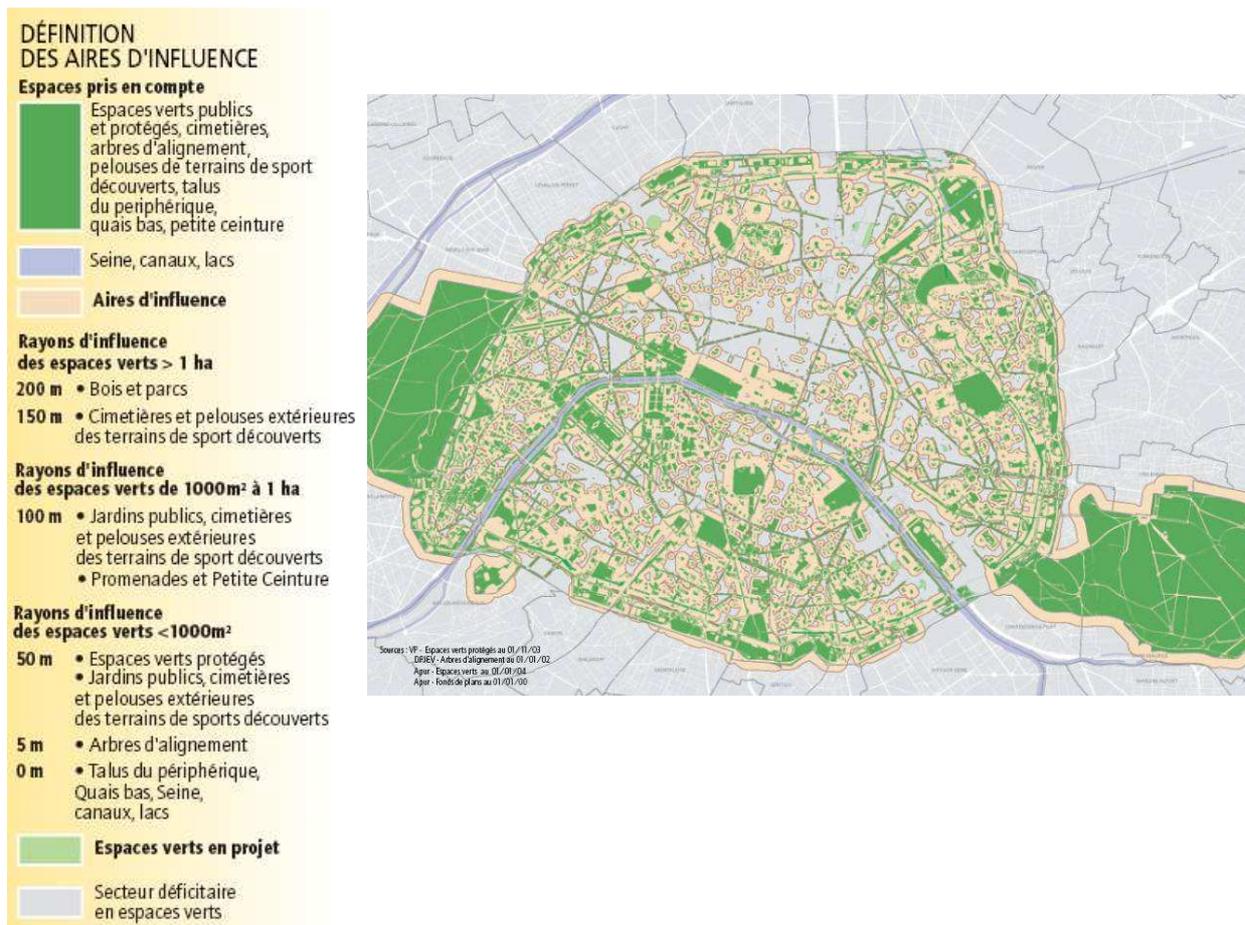


Figure 58 : Les espaces verts parisiens et leurs aires d'influence⁶¹. (Atelier parisien d'urbanisme, 2004)

Les chiffres précis donnés par l'Atelier parisien d'urbanisme (2004) concernant la part d'espaces verts sont les suivants

- hors bois de Boulogne et de Vincennes, Paris possède 1248,40 ha d'espaces verts⁶², pour une surface totale de 8692,50 ha, soit un pourcentage de 14,40% d'espaces verts.

⁶¹ L'aire d'influence d'un parc ou d'un square correspond ici à l'aire au sein de laquelle les habitants qui y résident se déplacent pour aller dans ce parc ou ce square.

⁶² Dans ces espaces verts sont comptabilisés uniquement :

- Les espaces verts ouverts au public : qui couvrent une superficie d'environ 500 hectares (hors bois de Boulogne et de Vincennes) auxquels il convient d'ajouter les jardins propriété de l'Etat et du Sénat.
- Les bois de Boulogne et de Vincennes qui occupent respectivement une superficie de 846 et 995 hectares.
- Les « espaces verts protégés » au nombre de 1428 qui couvrent une superficie de 236 hectares.
- Les espaces plantés des équipements publics : 20,5 hectares inclus dans les terrains de sports, 13,5 hectares au sein des établissements scolaires et des crèches.
- Les cimetières.
- Les talus plantés, notamment le long du boulevard périphérique : 58 hectares.
- Les espaces plantés de la Petite Ceinture.
- Les espaces plantés des ensembles de villas et de hameaux.

- Bois de Boulogne et de Vincennes compris, Paris possède 3089,40 ha d'espaces verts, pour une surface totale de 10533,50 ha, soit un pourcentage de 29,30% d'espaces verts.

Les espaces verts comptabilisés ici ne prennent pas en compte les cours d'immeuble végétalisés, les jardins des ambassades et des ministères, les cours des écoles, les jardins privés, etc.

Selon l'Atelier parisien d'urbanisme (2002) « *Les terrains affectés aux autres équipements, à l'habitat et aux activités ne s'étendent [...] que sur 5000 ha et ne forment que 48% de l'espace total. Le coefficient d'emprise (assiette des constructions rapportée à la surface de terrain) y est d'environ 2/3, ce qui laisse peu de place pour les cours et les jardins privés, y compris les cours de récréation dans les écoles ou les jardins des ambassades ou des ministères.* » Il y a donc une surface d'environ 1 600 ha susceptible d'être également de la végétation. Aucun ordre de grandeur n'a pu être trouvé. Pour éviter une surestimation de ce paramètre, nous avons pris comme hypothèse qu'un tiers de cette surface correspond à de l'espace végétalisé, soit environ 500 ha.

Sur les 10533,50 ha de la ville de Paris, c'est-à-dire bois de Boulogne et de Vincennes compris, les plans d'eau constitués par la Seine et les canaux constituent 2,4% de l'espace (APUR, 2002). En ne tenant pas compte des deux bois, les plans d'eau constituent 2,9% de la surface parisienne, ce qui constitue toujours un faible pourcentage.

Les 1248,40 ha d'espaces verts, plans d'eau, canaux et Seine compris, qui constituent 14,40% de la surface de Paris hors bois de Boulogne et de Vincennes, se répartissent donc en 2,9% de plans d'eaux constitués principalement par la Seine et les canaux, et 11,5% d'espaces végétalisés (soit environ 1 000 ha). A ces derniers s'ajoutent les 500 ha estimés des cours et jardins privés, ce qui nous donne une part d'espaces végétalisés au sein de Paris de 17%.

La surface parisienne, hors bois de Boulogne et de Vincennes, peut donc se décomposer, en arrondissant, en :

- 3% de voies d'eau ;

-
- Les arbres d'alignement au nombre de 92500 qui caractérisent le paysage de nombreuses avenues et rues de la capitale.
 - Les surfaces des quais et des plans d'eaux, de la Seine et des canaux.

- 17% d'espaces végétalisés (hors voies d'eau) ;
- 80% de surfaces minérales.

Les espaces végétalisés seront répartis également entre les catégories 'jardins et parcs' et 'arbres à feuilles caduques' proposées par ISBA (Annexe 10).

IV.2 Morphologie et géométrie de Paris

Même si la ville de Paris présente un tissu urbain très caractéristique⁶³, elle n'en possède pas moins de multiples morphologies et formes urbaines liées à son histoire. Les différents quartiers de Paris sont représentatifs de l'évolution des morphologies urbaines qui s'est opérée dès le Moyen Age (IAURIF, 2005). Ainsi se côtoient des « morceaux » de ville représentatif de la cité médiévale du cœur de Paris au XIV^{ème} siècle, des villes et faubourgs du XVIII^{ème}, de la ville haussmannienne du XIX^{ème}, de l'habitat social de l'entre-deux-guerres, ou encore des grands ensembles. Chacun possède alors des densités résidentielle, de population, bâtie, ou encore un coefficient d'emprise au sol différent, qui participe à la variété des quartiers parisiens⁶⁴.

⁶³ « Les rues occupent plus de 25 % de la superficie de la ville sans les bois. De même que les percées haussmanniennes, les places royales du XVII^{ème} siècle et les grands tracés du XVIII^{ème} siècle ont modelé et structuré le territoire de la ville. Ils ont aussi produit un réseau viaire hiérarchisé qui donne au tissu urbain parisien une lisibilité remarquable. Les règles de composition de ces espaces publics ont peu varié au fil du temps : alignement des constructions le long de la rue, commerces et activités en rez-de-chaussée, largeur des trottoirs proportionnelle à la largeur de la rue, plantations d'arbres pour les voies les plus larges et mobiliers urbains coordonnés. Les altérations fortes que la période moderne a fait subir à ces règles séculaires d'ordonnement de la ville ont été vite rejetées : constructions sur dalle, voies rapides et plan libre ont suscité et suscitent toujours critiques et défiance. Aussi les aménagements de nouveaux quartiers dès le début des années 1980 ont-ils repris les règles de composition traditionnelle de la ville afin de mieux relier ces nouveaux espaces aux tissus urbains environnant. Quant à la restauration des espaces publics existants, elle privilégie désormais le respect et la mise en valeur de ces compositions urbaines, essentielles à l'urbanité de la ville. » Diagnostic du rapport de présentation du PLU de la Ville de Paris.

⁶⁴ Le diagnostic du rapport de présentation du PLU de la Ville de Paris présente la disparité des densités au sein de Paris :

« La densité bâtie est de l'ordre de 3,6 à Paris. Il s'agit du rapport de la somme des surfaces de plancher à la somme des surfaces des terrains, en excluant les superficies des voies, des voies d'eau, des espaces verts et équipements publics ; autrement dit, le rapport des surfaces de planchers aux surfaces des parcelles bâties ordinaires. Elle est beaucoup plus importante que dans les communes limitrophes.

Les densités les plus élevées s'observent dans le 2^e, les 8^e et 9^e arrondissements, le nord du 16^e et le sud du 17^e. Les îlots les plus denses se situent autour de l'Opéra et des grands magasins. Les densités les plus faibles s'observent dans le 20^e, les 13^e et 19^e arrondissements. Le 20^e comporte le plus grand nombre d'îlots de faible densité.

La densité chiffrée n'est pas toujours représentative de la perception qu'ont les habitants de leur environnement immédiat. En effet, l'impression de densité est liée à de nombreux autres facteurs :

- la hauteur et la continuité des façades, en relation avec la largeur des rues,
- la présence plus ou moins importante d'espaces de respiration : places, squares, élargissements de l'espace public...

Ces discontinuités rendent difficile la description de Paris à l'aide de caractéristiques physiques moyennes. Quelques approximations peuvent cependant être effectuées comme nous allons le voir. Rappelons avant quelques éléments sur le schéma de surface TEB.

Le schéma de surface TEB s'appuie sur les bilans énergétiques des trois types de surfaces : mur, voirie et toit. L'estimation de leur surface à partir des données d'entrée du modèle a donc une certaine importance, ces données étant : la hauteur des bâtiments, la longueur de rugosité dynamique du couvert urbain (environ 1/10 de la hauteur des bâtiments), la fraction occupée par les bâtiments⁶⁵ ($a_{\text{bât}}$) et le facteur de forme du bâti⁶⁶.

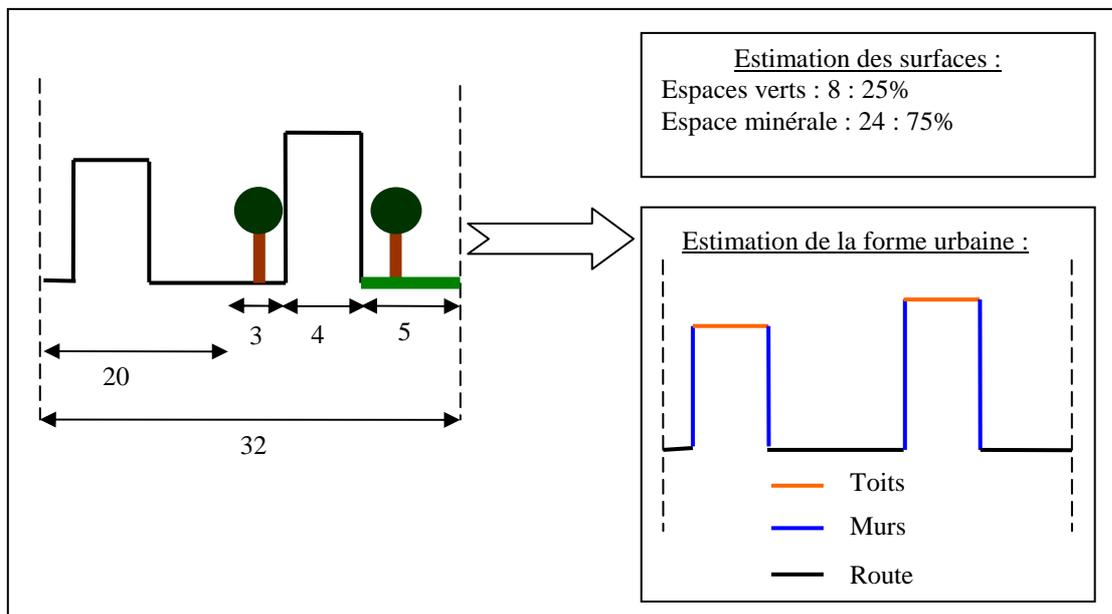


Figure 59 : Estimation de la nature des surfaces et de la forme urbaine pour obtenir des données d'entrée nécessaire à SURFEX.

Le schéma de surface TEB ne tient pas compte dans sa description géométrique des cours, jardins ou autres espaces intérieurs. Si dans le cadre de notre estimation de la part d'espaces végétalisés sur le territoire parisien, nous avons considéré qu'une partie de ces cours et autres espaces intérieurs étaient de la végétation, pour la description de la géométrie urbaine, il est

- la présence plus ou moins importante de plantations d'alignement, qui modifient la perception visuelle des façades,
- les flux plus ou moins importants de voitures, dont la présence visuelle et sonore sature l'espace,
- la présence plus ou moins importante de commerces ou de grands équipements publics, qui créent de l'animation et de la diversité et rendent plus admissible une forte densité bâtie. »

⁶⁵ $a_{\text{bât}}$ = surface de toit / surface de toit et route

⁶⁶ facteur de forme du bâti = surface de murs / surface de route et toit = $2(z_{\text{bât}}/W) \cdot (1 - a_{\text{bât}})$ avec $z_{\text{bât}}$ la hauteur moyenne des bâtiments, W la largeur des rue et $a_{\text{bât}}$ la fraction occupée par les bâtiments.

intéressant de considérer ces espaces comme étant de la voirie (figure 59) pour ne pas surestimer le piégeage du rayonnement lié au caractère plus ou moins étroit des rues.

La part de chaque type de surfaces est importante pour le calcul global du bilan d'énergie au sein de TEB. Pour minimiser les approximations et les erreurs dans l'évaluation des surfaces, cette dernière hypothèse va être utilisée uniquement pour le calcul du facteur de forme (qui dépend des surfaces de routes et de toits) et non sur la fraction occupée par les bâtiments (qui dépend des surfaces des murs, des routes et des toits). En effet, c'est à partir du facteur de forme, de la hauteur du cadre bâti et de la fraction occupée par les bâtiments que TEB calcule la proportion de chaque type de surfaces. Ainsi nous aurons une approximation et donc un risque d'erreur plus importants principalement sur la surface de murs.

IV.2.1 Hauteur moyenne des bâtiments et longueur de rugosité dynamique du couvert urbain

Au sein du diagnostic du rapport de présentation du PLU de la Ville de Paris, le rôle des règlements d'urbanisme parisien dans la forme relativement homogène de la ville est mis en avant⁶⁷.

Un des objectifs du nouveau PLU (approuvé par délibération du Conseil de Paris des 12 et 13 juin 2006) en ce qui concerne l'espace bâti, est de poursuivre ce qui a été engagé avec le POS de 1977, c'est-à-dire d'« *assurer ou maintenir l'harmonie d'ensemble du paysage urbain issue notamment de la volumétrie du bâti ou de l'existence d'un front bâti sur rue* » (Rapport de présentation du PLU de la Ville de Paris).

Le plan des hauteurs, qui accompagne le règlement du PLU de la Ville de Paris, indique les hauteurs plafonds fixées pour l'application de l'article 10 de ce règlement (hauteur maximale

⁶⁷ « *Le caractère des rues parisiennes ne tient pas seulement à la forte identité de l'espace public : il s'explique aussi par la forme très homogène des bâtiments qui les bordent.*

En effet, dès le XVIII^{ème} siècle, les règles d'urbanisme ont proportionné la hauteur maximale des façades et la forme du couronnement des immeubles à la largeur des rues. Ces dispositions ont peu varié au cours du XIX^{ème} siècle et ont largement été respectées dans le règlement d'urbanisme de 1902 qui a été en vigueur jusqu'à la fin des années 1950. Aussi, le paysage des onze premiers arrondissements ainsi que des 16^{ème}, 17^{ème} et 18^{ème} arrondissements est-il très largement issu de l'application de ces règles.

Cependant en 1961, sous l'influence du mouvement moderne, des préoccupations hygiénistes et du développement de la circulation automobile, le plan d'urbanisme directeur a imposé un urbanisme nouveau qui abandonnait l'alignement des voies, la gradation mesurée des hauteurs et, de manière plus générale, le souci d'insertion des constructions dans la ville ancienne. Dans les arrondissements périphériques, particulièrement sur la rive gauche et sur la couronne de Paris, cette rupture a produit des formes urbaines et architecturales inhabituelles qui vont très vite susciter un rejet et conduire à l'élaboration et à l'application anticipée dès 1975 du plan d'occupation des sols (POS) approuvé en 1977.

Le POS de 1977 a rétabli la continuité des formes urbaines. Il a réintroduit l'exigence d'homogénéité du bâti inscrite dans les règlements anciens par l'obligation d'alignement et le retour aux gabarits traditionnels sur rue. » (diagnostic du rapport de présentation du PLU de la Ville de Paris).

des constructions) (figure 60). Paris est ainsi découpée en plusieurs zones avec des hauteurs plafonds que l'on peut estimer proche des hauteurs du bâti déjà construit du fait de ce qui a été dit précédemment (« *harmonie d'ensemble du paysage urbain* »). Une approximation de la hauteur moyenne du bâti parisien peut ainsi être proposée à environ 30m.

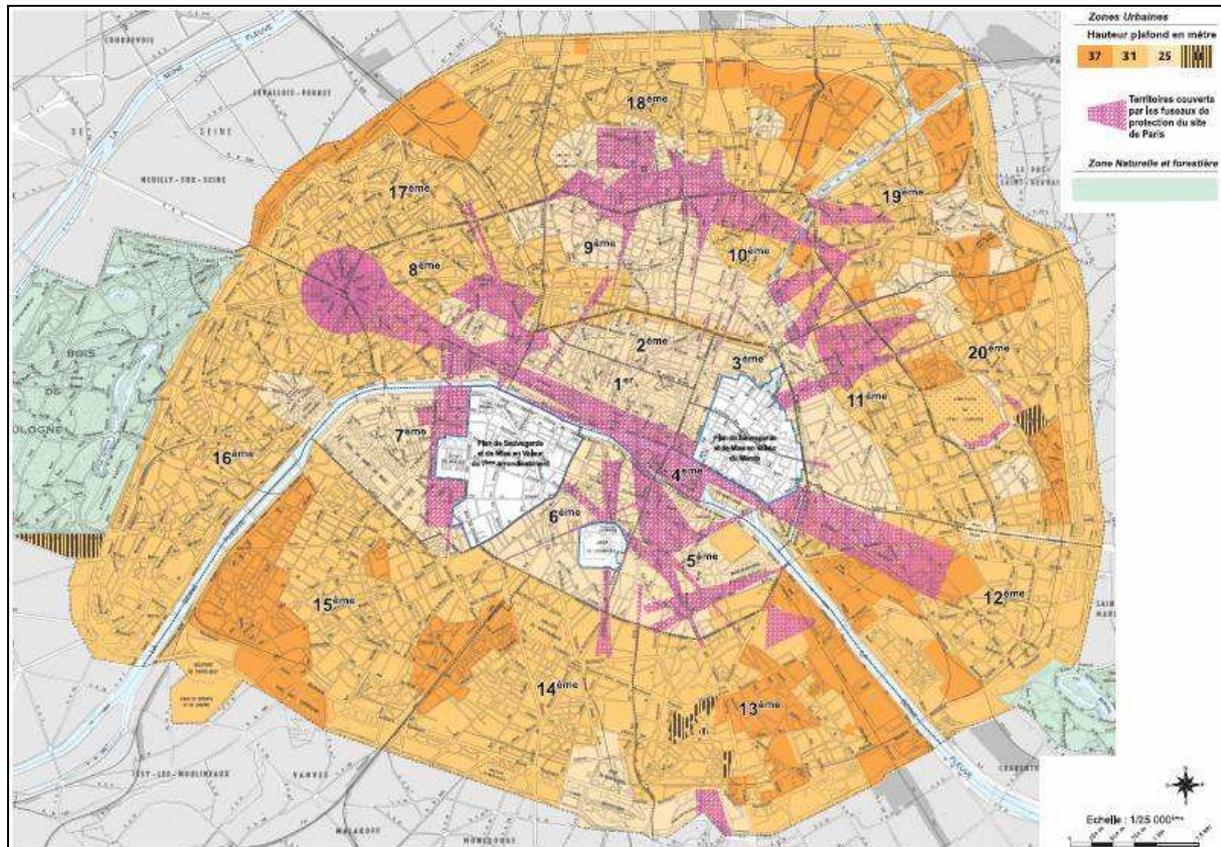


Figure 60 : Plan des hauteurs indiquant les hauteurs plafonds fixées pour l'application de l'article 10 du règlement du PLU de Paris (Ville de Paris).

La longueur de rugosité est estimée en règle générale comme étant 1/10 de la hauteur moyenne des bâtiments⁶⁸. Pour Paris, elle vaut alors environ 3m.

IV.2.2 Fraction occupée par les bâtiments

Selon les services de la Ville de Paris, les chiffres suivants peuvent être donnés concernant la totalité des voies publiques (hors voies des bois), privées ouvertes et fermées au public :

- Nombre de voies : 5 971,
- Longueur : environ 1 700 km,

⁶⁸ « *La longueur de rugosité est voisine du dixième de la hauteur moyenne des aspérités de la surface* » (De Parcevaux et Hubert, 2007).

- Superficie : environ 26 500 000 m² (soit 2 650 ha).

Selon l'Atelier parisien d'urbanisme (2002), comme nous l'avons déjà signalé, le coefficient d'emprise (assiette des constructions rapportée à la surface de terrain) est d'environ 2/3 pour les terrains affectés aux équipements, à l'habitat et aux activités (ces terrains s'étendent sur environ 5 000 ha ou plus précisément sur 4790,78 ha⁶⁹).

Nous avons donc une surface de toit⁷⁰ d'environ 3 350 ha, (2/3 de 5 000 ha) et une surface de type voirie d'environ 3 750 ha (voies publics + surface de terrain non construite et non végétalisée⁷¹ = 2 650 + 1 100). La fraction occupée par les bâtiments ($a_{\text{bât}} = \text{surface de toit} / \text{surface de toit et route}$) définie dans TEB peut ainsi être estimée à environ 0,47 soit, en arrondissant, à 0,5, ce qui correspond à la donnée de 'urbain dense'.

IV.2.3 Facteur de forme

Le facteur de forme est défini comme la surface de murs sur surface de routes et de toits. N'oublions pas que TEB s'appuie sur le concept de la rue canyon uniforme sur toute la maille modélisée. Pour le calcul de ce facteur de forme, nous allons tenir compte de l'hypothèse présentée plus haut, c'est-à-dire considérer que les cours végétalisés et autres jardins intérieurs sont de la voirie.

La surface de toits reste la même que précédemment : 3 350 ha.

La surface de « voirie » devient alors égale à 4 250 ha (2 650 + 1 600).

La surface de murs comprend la surface des murs sur rue et celle des murs sur cours. La première correspond à peu près à deux fois le linéaire des rues multiplié par la hauteur des bâtiments. Pour tenir compte de la surface des murs au sein des cours dont nous ne connaissons pas l'estimation, nous avons choisi d'arrondir au nombre supérieur l'estimation de la surface de murs sur rue, ce qui en l'occurrence ici correspond à une multiplication par 1,5.

⁶⁹ L'espaces minéralisés s'étendent sur 85,6% de la ville soit $0,856 \times 8\,692,50 = 7\,440,78$ ha auquel on enlève les 2 650 ha de voirie, soit 4 790,78 ha.

⁷⁰ TEB ne prend en compte que des toits plats. Nous supposons donc ici que la surface des toits équivaut à l'emprise bâti. On fonctionne avec la surface « vue du ciel » et non pas en surface effective.

⁷¹ Nous avons considéré précédemment que sur les 1 600 ha susceptibles d'être de la végétation, seuls 500 ha l'était.

Le facteur de forme est donc d'environ 2⁷².

L'estimation de la hauteur moyenne des bâtiments, de la fraction occupée par les bâtiments et du facteur de forme permettent d'obtenir une description d'un canyon ayant une hauteur de 30m, une largeur de rue de 15m et une profondeur des bâtiments de 15m, ce qui semble en adéquation avec ce que nous pouvons observer à Paris. Nous confirmons donc notre estimation de ces trois facteurs.

IV.3 Flux de chaleur liés aux différentes activités de Paris

Au sein du schéma de surface TEB, les flux de chaleur liés au trafic sont rejetés au niveau de la rue et ceux d'origine industrielle au niveau des toits. Pour ce qui est des flux de chaleur sensible liés au chauffage, ceux-ci sont calculés à partir des caractéristiques physiques et thermiques des bâtiments et de leur température intérieure. Cette dernière est fixée en moyenne, en hiver, à 19°C (le chauffage est mis en marche pour maintenir la température à 19°C (Pigeon *et al.*, 2006)). En été, elle est calculée en fonction des températures des surfaces intérieures, ce qui ne prend pas en compte les apports de chaleur par les fenêtres qui peuvent être importants en été. La température intérieure des bâtiments durant l'été est ainsi sous-estimée, ce qui se constate lors de l'analyse des différentes sorties de simulation.

Pour le calcul des flux de chaleur sensible liés au trafic routier, nous allons partir des consommations énergétiques. Cette approche a été notamment utilisée par Pigeon *et al.* (2007) pour leur travail sur les rejets de chaleur anthropique à Toulouse, par Ichinose *et al.* (1999) pour leur étude sur l'impact de la chaleur anthropique sur le climat urbain de Tokyo (Japon), par Klysik (1996) pour son étude sur la distribution spatiale et saisonnière des émissions de chaleur anthropique à Lodz (Pologne) ou encore par Sailor et Lu (2004) qui ont développé une méthode pour apprécier les profils journaliers et saisonniers de la chaleur anthropique en zone urbaine.

A partir de la méthode développée par Sailor et Lu (2004) pour évaluer le flux de chaleur lié au trafic (annexe 11), nous obtenons pour Paris intramuros et hors Bois de Boulogne et de Vincennes environ 16 W.m⁻² pour toute la surface minérale (et pas uniquement par m² de surface de voirie).

⁷² Facteur de forme = surface de murs / (surface de toits + surfaces de voirie) = 1700000*2*30*1,5 / (33500000 + 42500000) = 2,0

Ce chiffre correspond à l'ensemble du flux de chaleur lié au trafic. Selon Pigeon *et al.* (2007), le flux de chaleur latente correspond à 8% et donc le flux de chaleur sensible à 92%. Pour trouver ce chiffre, ils ont considéré que les carburants utilisés sont proches de l'octane (C_8H_{18}) et à partir de l'équation de combustion complète ($2C_8H_{18} + 25O_2 \rightarrow 16 CO_2 + 18H_2O$), la quantité de vapeur d'eau émise est estimée. Cette quantité est ensuite multipliée par la chaleur latente d'évaporation de l'eau⁷³ et le rapport avec le pouvoir calorifique du carburant donne 8%.

On obtient donc environ pour Paris hors bois de Boulogne et de Vincennes les flux de chaleur sensible et latente suivant sur toute la journée :

$$Q_{Htrafic} = 14,7 \text{ W.m}^{-2}$$

$$Q_{Etrafic} = 1,3 \text{ W.m}^{-2}$$

En ce qui concerne l'industrie, celle-ci n'est plus très présente au sein de Paris. Au 1^{er} janvier 2005, selon l'édition 2007 des chiffres-clés de la région Ile-de-France éditée par le CRCI de Paris, l'IAURIF et l'INSEE, Paris compte 19 959 établissements dits industriels (hors industries agro-alimentaires et énergie) pour un effectif de 86 670 salariés. Les industries de l'habillement et des fourrures, du cuir et de la chaussure, et du textile représentent à elles trois 31% des établissements industriels (et 22% des emplois industriels). L'industrie de l'édition-imprimerie-reproduction représente quant à elle 41% des établissements industriels (et 43% des emplois industriels) ; il est vrai que Paris accueille un grand nombre de sièges sociaux de grands éditeurs et de groupes de presse nationaux.

Paris n'accueille plus d'industries à risque classées Seveso sur son territoire. Les usines d'incinération des déchets encerclent Paris (Ivry-sur-Seine, Issy-les-Moulineaux, Saint-Ouen) mais n'ont pas été construites sur son territoire. Cependant, la Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain (CPCU) possède quatre sites de production sur Paris qui fonctionnent essentiellement en hiver :

- Le site CPCU de La Villette : Mis en service en 1964, cette unité de production fonctionne avec deux chaudières au fioul TTBTs (Très Très Basse Teneur en Soufre). Ces équipements ont une capacité de production de 235 tonnes/heure de vapeur,

⁷³ La chaleur latente d'évaporation de l'eau est la quantité de chaleur requise pour transformer un gramme d'eau liquide en vapeur, sans changement de température. Par exemple, à 35°C, elle vaut 2 420 J/g.

vapeur envoyée dans le réseau de chauffage urbain. La Villette n'est engagée qu'exceptionnellement, en appoint secours du réseau et rejette en moyenne annuelle 200 tonnes par an de vapeur d'eau dans l'atmosphère.

- Le site CPCU de Bercy : Cet établissement dispose de cinq chaudières qui fonctionnent au fioul TTBTBS représentant une capacité de production de 615 tonnes/heure de vapeur. Ce site rejette en moyenne annuelle 18 000 tonnes par an de vapeur d'eau dans l'atmosphère.
- Le site CPCU de Vaugirard : Ce site comprend quatre chaudières au fioul TTBTBS avec une capacité de production totale de 490 tonnes/heure de vapeur. Ce site rejette en moyenne annuelle 26 000 tonnes par an de vapeur d'eau dans l'atmosphère.
- Le site CPCU de Grenelle : Ce site utilise également du fioul TTTBS. Sa capacité de production s'élève à 675 tonnes/heure de vapeur, pour cinq chaudières. Ce site rejette en moyenne annuelle 6 000 tonnes par an de vapeur d'eau dans l'atmosphère.

Ainsi, en tout, 50 200 tonnes de vapeurs d'eau sont rejetées en moyenne par an dans l'atmosphère de Paris par ces quatre sites. L'enthalpie de la vapeur d'eau, qui comprend à la fois la chaleur sensible et latente, est comprise selon la pression et la température entre 2500 et 2800 kJ/kg (Cours du Lycée de La Salle à ALES, <http://fee.ales.free.fr/>). Ces rejets se concentrent a priori sur les trois mois d'hiver ce qui nous donne pour la surface de Paris ($87,10 \cdot 10^6 \text{ m}^2$) un rejet moyen maximal de : $0,21 \text{ W.m}^{-2}$, qui comprend à la fois le flux de chaleur sensible et le flux de chaleur latente. Il est donc possible d'estimer pour nos modélisations que l'industrie ne rejette pas aujourd'hui de flux de chaleur latente ou sensible significatifs au sein de Paris.

Les rejets de flux de chaleur étant appliqués uniquement au sein de TEB et non au sein des schémas pour la végétation et l'eau, il est nécessaire de multiplier nos évaluations par 1,25 (Les surfaces de ville (TEB) ne constituent que 80% de la ville de Paris comme nous l'avons estimé précédemment), les flux de chaleur journaliers liés aux différentes activités de Paris peuvent donc être décrits au sein de TEB par les données suivantes :

- $Q_{\text{Htrafic}} = 18,5 \text{ W.m}^{-2}$
- $Q_{\text{Etrafic}} = 1,5 \text{ W.m}^{-2}$

- $Q_{\text{Hindus}} = 0 \text{ W.m}^{-2}$ (été et hiver)
- $Q_{\text{Eindus}} = 0 \text{ W.m}^{-2}$ (été et hiver)

IV.4 Matériaux de constructions parisiens

IV.4.1 Hypothèses de calcul

Pour le coefficient de transmission surfacique moyen d'une surface composée de plusieurs couches de matériaux et de conductivités différentes, l'équation est la suivante :

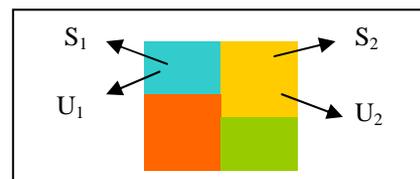
$$\frac{1}{U} = \sum_k \left(\frac{e_k}{\lambda_k} \right) + \left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} \right) = \sum_k Rth_k + \left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} \right) \quad (\text{Formule 16})$$

Où :

- U est le coefficient de transmission thermique surfacique ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$),
- e_k est l'épaisseur de la $k^{\text{ième}}$ couche (m),
- λ_k est la conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$),
- $1/h_i$ et $1/h_e$ sont les résistances thermiques d'échanges superficiels intérieurs et extérieurs ($\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$) (cette somme vaut 0,17 pour les surfaces verticales comme un mur et 0,14 pour les surfaces horizontales comme un toit plat),
- Rth_k est la résistance thermique de la $k^{\text{ième}}$ couche.

Pour le coefficient de transmission surfacique moyen d'une surface composée de plusieurs types de surfaces avec des coefficients de transmission surfacique différents, l'équation est la suivante :

$$U_{\text{moyen}} = \frac{\sum_i S_i * U_i}{\sum_j S_j} \quad (\text{Formule 17})$$



Où :

- R_i est le coefficient de transmission surfacique de la $i^{\text{ème}}$ surface,
- S_i l'aire de la surface i .

IV.4.2 Caractéristiques thermiques et radiatives des murs

Une étude a été menée par l'Atelier Parisien d'Urbanisme (2007) sur, entre autres, les consommations d'énergie liées au chauffage des résidences principales parisiennes. Cette étude s'est appuyée sur une datation de la construction des immeubles (tableau 12) et sur une estimation des caractéristiques thermiques des murs en fonction de l'âge du bâtiment (tableau 13).

Tableau 12 : Nombre et part de bâtiments parisiens selon la période de construction (APUR, 2007).

| Périodes | Nombre de bâtiments par période (mai 2007) | Pourcentage de bâtiments par période | nombre de bâtiments cumulés | Pourcentage de bâtiments cumulés |
|--------------|--|--------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Avant 1800 | 8 807 | 10 % | 8 807 | 10 % |
| 1801 – 1850 | 13 610 | 15 % | 22 417 | 25 % |
| 1851 – 1914 | 42 588 | 49 % | 65 005 | 74 % |
| 1918 – 1939 | 7 605 | 9 % | 72 610 | 83 % |
| 1945 – 1967 | 4 336 | 5 % | 76 946 | 88 % |
| 1968 – 1975 | 2 941 | 3 % | 79 887 | 91 % |
| 1977 – 1981 | 1 572 | 2 % | 81 459 | 93 % |
| 1982 – 1989 | 1 673 | 2 % | 83 132 | 95 % |
| 1990 – 1999 | 3 292 | 4 % | 86 424 | 99 % |
| 2000 et plus | 1 273 | 1 % | 87 697 | 100 % |
| Non daté | 12 196 | | | |
| Total | 99 893 | | 99 893 | |

Selon que l'on tienne compte ou non de la présence des fenêtres et des différences entre les murs sur cour et rue, différentes résistances thermiques moyennes peuvent être estimées à partir de ce tableau pour les murs et parois de Paris (Pour ses calculs, l'APUR a tenu compte de la résistance thermique d'échange superficiel ($R_i + R_e$) liée à la convection et au rayonnement qui est de $0,17 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$). Ainsi, en considérant que 50% des parois sont sur cour et les autres 50% sur rue⁷⁴, la résistance moyenne des parois, fenêtres comprises, est de $0,37 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$ (fenêtres non comprises de $0,47 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$) avec la résistance thermique d'échange superficiel. En tenant compte uniquement des murs sur rue, on obtient une

⁷⁴ $U_{\text{moyen}} = (U_{\text{moyen_cour}} + U_{\text{moyen_rue}})/2$
 $U_{\text{moyen_cour}} = \sum \% \text{ bâti(période)} * U_{\text{moyen_cour}}(\text{période})$
 $U_{\text{moyen_rue}} = \sum \% \text{ bâti(période)} * U_{\text{moyen_rue}}(\text{période})$

résistance moyenne des parois, fenêtres comprises, de $0,38 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$ (fenêtres non comprises de $0,50 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$).

Tableau 13 : Résistance thermique des parois (APUR, 2007).

| | U murs (W/m ² /K) | composition des murs | | | | taux de vitrage | taux de double vitrage | conductance vitrages (W/m ² /K) | | Uparois (W/m ² /K) |
|---------------|---------------------------------|----------------------|---------------|------------------------------|---------------|--------------------|------------------------------|---|--------|-------------------------------|
| | | enduit λ (W/K/m) | épaisseur (m) | calcaire tendre λ (W/K/m) | épaisseur (m) | | | simple | double | |
| antérieur XIX | 1,76 1,91 | 0,9 0,9 | 0,06 0,06 | 1,05 1,05 | 0,35 0,3 | 20% | 30% | 4,95 | 2,4 | 2,24 2,37 |
| 1800-1850 | 1,91 2,22 | 0,9 0,9 | 0,06 0,06 | 1,4 1,4 | 0,4 0,3 | 30% | 30% | 4,95 | 2,4 | 2,59 2,81 |
| 1850-1914 | 2,01 2,42 | 0,9 0,9 | 0,03 0,06 | 1,7 1,7 | 0,5 0,3 | 30% | 30% | 4,95 | 2,4 | 2,66 2,95 |
| 1918-1939 | 2,09 2,09 | 0,9 0,9 | 0,03 0,03 | 1,2 1,2 | 0,33 0,33 | 40% | 30% | 4,95 | 2,4 | 2,93 2,93 |
| 1945-1967 | 2,8 | 0,9 | 0,04 | 1,75 | 0,25 | 40% | 30% | 4,95 | 2,4 | 3,35 |
| 1968-1974 | 2,8 | 0,9 | 0,04 | 1,75 | 0,25 | 50% | 30% | 4,95 | 2,4 | 3,49 |
| 1975-1981 | 1,8 | | | | | 50% | 100% | | 2,8 | 2,3 |
| 1982-1989 | 1,15 | | | | | 40% | 100% | | 2,8 | 1,81 |
| après 1990 | 0,55 | | | | | 40% | 100% | | 1,2 | 0,87 |

légende : établi selon la composition des murs
 établi selon les normes RT

Il est relativement difficile de proposer un mur « moyen » permettant de représenter les qualités thermiques des murs mais aussi des fenêtres des bâtiments de Paris. Cependant TEB nécessite une description de différentes propriétés : le nombre de couches du mur, l'albédo et l'émissivité de la surface extérieure, la capacité et la conductivité thermiques des différentes couches du mur et l'épaisseur de ces couches. Du fait du fonctionnement du modèle, il est nécessaire que la couche extérieure soit relativement fine (entre 1 et 3 cm) car les calculs supposent que la température de surface est à la température intérieure de cette couche.

Les données utilisées par TEB pour la situation 'urbain dense' sont les suivantes : le mur est décomposé en trois couches : deux couches de béton de 2 cm et 12,5 cm, de conductivité thermique de $0,9338 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et de capacité thermique $1,55.10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$, et d'une couche d'isolant de 5 cm, de conductivité thermique de $0,05 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, et de capacité thermique $0,29.10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$. Ces caractéristiques correspondent à un mur ayant une résistance thermique de $1,16 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$, ce qui est excessif par rapport aux $0,37$ ou $0,38 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$ déduits de l'analyse de l'APUR.

Nous proposons donc un nouveau découpage qui correspond à une résistance thermique moyenne d'environ $0,37 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$, résistance thermique d'échange superficiel ($R_i + R_e$) liée

à la convection de $0,17 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$ comprise. Pour l'inertie (capacité thermique), nous ne tenons pas compte de la présence des fenêtres (contrairement à la résistance thermique). Ce découpage correspond à un mur en béton de 27 cm d'épaisseur. Nos données s'appuient sur les valeurs d'un béton de densité moyenne de la norme européenne NF EN ISO 10456, ce qui nous donne pour chacune des couches une conductivité thermique de $1,35 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et une capacité thermique à $2.10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$.

Notre découpage pour les murs est le suivant :

- Une couche extérieure (n°1) de 0,02 m, qui correspond à l'enduit non isolant en béton,
- Une couche intermédiaire (n°2) de 0,2 m,
- Et une couche intérieure (n°3) de 0,05 m.

En ce qui concerne l'albédo et l'émissivité des murs, nous noterons dans un premier temps que Paris est, en ce qui concerne les façades, une ville claire ; c'est un nuancier de couleurs douces qui prédomine avec par exemple la pierre calcaire. L'albédo des murs ne devrait donc pas avoir une valeur faible.

Scudo *et al.* (2004) présentent une classification des matériaux selon leur albédo issue d'une recherche de Santamouris et Doulos (2001) (tableau 14).

Pour estimer l'albédo moyen des parois, il est nécessaire de tenir compte des fenêtres. Ainsi pour des fenêtres avec vitres claires, si l'angle zénithal est à moins de 40° , l'albédo est égal à environ 0,08 (et l'émissivité est entre 0,87 et 0,94) et si l'angle zénithal est entre 40° et 80° , l'albédo est entre 0,09 et 0,52 (et l'émissivité est entre 0,87 et 0,92) (Benzerzour, 2004).

Tableau 14 : Classification des matériaux en trois catégories en fonction de leur albédo (Scudo *et al.*, 2004).

| | Albédo 0,1 -0,3 | Albédo 0,4 – 0,6 | Albédo 0,7 – 0,9 |
|----------|--------------------|---------------------|---------------------|
| Surfaces | Asphalte noir | Béton clair | Pierre calcaire |
| | Béton sombre | Cuivre oxydé | Marbre blanc |
| | Pelouse | Brisque rouge | Peinture blanche |
| | Ardoise | Pierre | |

Malgré l'importance des pierres calcaires dans l'architecture parisienne, il n'est pas possible de considérer que l'albédo moyen des matériaux approche 0,7 pour les murs, ne serait-ce que

du fait, par exemple, de la pollution atmosphérique qui « noircit » les façades. Les pierres calcaires ne constituent de plus pas la totalité des matériaux utilisés. Un albédo compris entre 0,4 et 0,6 est ainsi plus probable pour les matériaux, autres que le vitrage, qui constituent les murs parisiens.

Pour tenir compte en partie des surfaces vitrées, nous fixons l'albédo à 0,4.

En ce qui concerne l'émissivité, celle-ci varie également d'un matériau à l'autre. Elle peut être estimée à 0,94 pour le béton, 0,90 pour les briques rouges (Santamouris, 2001(c)), entre 0,90 et 0,92 pour la pierre, et entre 0,87 et 0,94 pour les fenêtres (Benzerzour, 2004). Nous fixons l'émissivité des murs parisiens à 0,90.

IV.4.3 Caractéristiques thermiques et radiatives de la voirie

L'asphalte est le matériau le plus présent sur la voirie parisienne. Ainsi comme le signale la Ville de Paris dans le rapport de présentation de son PLU : « *L'asphalte, qui a progressivement remplacé le pavé scié sur les chaussées, et les trottoirs, dont les bordures sont en granit, ont donné à la voie parisienne sa couleur allant du gris clair au gris foncé, dont l'homogénéité ne se retrouve dans aucune autre ville d'Europe.* »

Selon Santamouris (2001(c)), l'albédo de l'asphalte est compris entre 0,05 et 0,2, sachant que 0,05 correspond à un asphalte posé récemment et 0,2 à l'asphalte vieilli. Rachele et Tunick (1993) proposent également des valeurs d'albédo pour le granit de 0,12 à 0,18, et pour l'asphalte de 0,10 et 0,15 selon qu'il est respectivement humide ou sec. Dans l'ouvrage *Energy and climate: Studies in Geophysics* de 1977 du Geophysics Study Committee entre autres, des valeurs d'albédo mais également d'émissivité sont proposées pour le granit, l'asphalte et les zones urbaines en général. Ainsi le granit a un albédo compris entre 0,12 et 0,15 et une émissivité de 0,90 ; l'asphalte a un albédo de 0,08 et une émissivité de 0,95 ; et les zones urbaines ont un albédo moyen compris entre 0,10 et 0,15. Enfin pour Mills (1993), l'asphalte a un albédo de 0,10 et une émissivité de 0,94.

Peu de trottoirs sont faits entièrement de granit ou de grès, et la majorité sont en asphalte. Nous fixons pour la voirie de Paris un albédo de 0,10 et une émissivité de 0,94.

A Paris, une grande partie de la voirie est constituée en surface d'une couche de béton bitumineux⁷⁵ de 4 cm, puis d'une couche d'enrobé à modules élevés⁷⁶ de 12 cm (il s'agit du corps de chaussée), et d'une fondation en béton de 25 cm. En dessous, nous conservons l'hypothèse d'un sol sec utilisé au sein de l'« urbain dense ».

On notera également que de nombreuses voiries en bitume sont réalisées non pas au-dessus d'une fondation en béton mais au-dessus de pavés. Nous n'en tiendrons cependant pas compte.

La norme NF EN ISO 104564 (sur les propriétés hygrothermiques de matériaux et produits pour le bâtiment) propose pour l'asphalte une conductivité thermique de $0,70 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et une capacité thermique de $2,1 \text{ MJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$, et pour un béton à densité moyenne une conductivité thermique de $1,35 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et une capacité thermique de $2 \text{ MJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$.

Selon le site de l'ancien ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables (aujourd'hui ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire), la conductivité thermique d'un béton bitumineux est comprise entre 2 et $2,5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et sa capacité thermique de $2 \text{ MJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$.

Tout comme pour les murs, du fait du fonctionnement du schéma TEB, il est nécessaire que la couche extérieure soit relativement fine (entre 1 et 3 cm) car les calculs supposent que la température de surface est la température intérieure de cette couche. Nous proposons donc le découpage suivant :

- Une première couche de béton bitumineux de 1 cm (conductivité thermique de $2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et capacité thermique de $2 \text{ MJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$) ;
- Une deuxième couche de béton bitumineux de 15 cm (conductivité thermique de $2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et capacité thermique de $2 \text{ MJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$) ;
- Une troisième couche de béton de 25 cm (conductivité thermique de $1,35 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et capacité thermique de $2 \text{ MJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$) ;

⁷⁵ Le béton bitumineux (aussi appelé enrobé bitumineux) est composé de différentes fractions de gravillons, de sable, de filler et utilise le bitume comme liant. Le béton « classique » utilise le ciment comme liant.

⁷⁶ Les enrobés à module élevé, ou bétons bitumineux à module élevé, sont obtenus à partir d'un mélange de bitume pur ou modifié, de granulats fabriqués dans une centrale d'enrobage. Ils se caractérisent par un module de rigidité E plus élevé que les enrobés classiques et par une bonne tenue à l'orniérage.

- Une quatrième couche de sol sec de 1 m (conductivité thermique de $0,2513 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et capacité thermique de $1,28 \text{ MJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$, nous conservons les valeurs de l'urbain dense).

IV.4.4 Caractéristiques thermiques et radiatives des toits

Paris est réputé pour ses toits en zinc mais possède également des toits plats qui pourraient à terme être végétalisés, comme le signale la Ville de Paris au sein de son Plan Climat : « *Dans le cadre de l'étude de l'APUR, un recensement indique que Paris comporte 314 ha de toits terrasses végétalisables.* ». Ces toits plats sont plutôt gris, ni très clairs ni très foncés. La ville de Paris possède également des toits en tuiles. Le tableau 15 présente quelques valeurs d'albédo et d'émissivité.

Tableau 15 : Valeurs de l'albédo des matériaux âgés ou non pour l'ensemble des longueurs d'onde.

| Matériau | Albédo « neuf » | Albédo « âgé » | Emissivité | Source |
|-------------------|-------------------------------------|------------------------------|---|--------------------------------|
| Ciment coloré : | | | | |
| Gris foncé | 0,13 | 0,15 | 0,90 | Prado et Ferreira (2005) |
| Gris clair | 0,33 | 0,29 | 0,90 | Prado et Ferreira (2005) |
| Zinc | 0,68 | 0,54 (un an) | 0,25 | Prado et Ferreira (2005) |
| Zinc | | | 0,10 | CSTB Grenoble |
| Zinc | 0,8 | 0,60 (avec l'usure du temps) | Entre 0,10 (neuf) et 0,05 (avec l'usure du temps) | International Zinc Association |
| Tuiles | Entre 0,10 et 0,35 selon la couleur | | | Santamouris (2001(c)) |
| Tuiles (Toulouse) | 0,15 | | 0,90 | CNRM (PIGEON) |

Nous avons présenté ici plusieurs valeurs pour le zinc pour illustrer la dispersion des valeurs selon les sources.



Figure 61 : Vue du ciel d'un quartier du 5^{ème} arrondissement de Paris (Ville de Paris).



Figure 62 : Vue du ciel d'un quartier du 20^{ème} arrondissement de Paris (Ville de Paris).

Comme l'illustrent ces deux photos (figures 61 et 62), si dans le centre de Paris, les toits en zinc prédominent largement, ce n'est pas forcément le cas des arrondissements en périphérie.

Selon un rapport du CSTB (Abraham *et al.*, 2007), « les toitures-terrasses sont [en France] des dispositifs typiques du 20^e siècle, leur apparition datant de la toute fin des années 1910. Cependant, elles se sont considérablement développées au lendemain de la Seconde Guerre Mondiale. Pour l'habitat construit avant 1975, les toitures-terrasses ne concernent pratiquement que les immeubles de logement collectif. » Le rapport de l'APUR (2007) nous indique que 74% des bâtiments parisiens ont été construits avant 1915, 83% avant 1945 et 91% avant 1976. Sachant que nous avons estimé à 3 350 ha, la surface totale de toit

précédemment, Il est possible d'estimer qu'il y a à Paris au maximum 500 ha de toitures-terrasses.

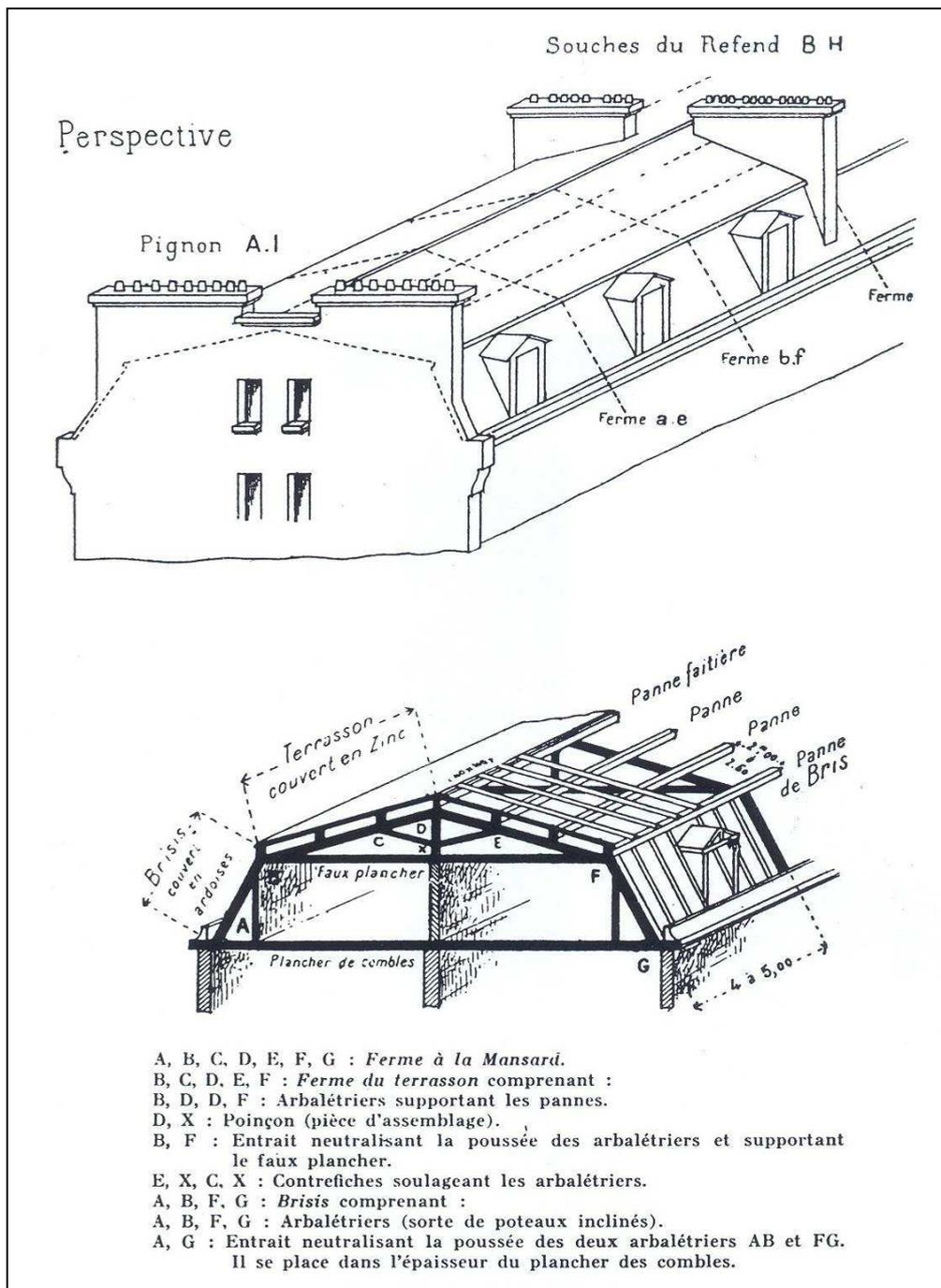


Figure 63 : Coupe de toit correspondant à un bâtiment typique parisien, avec toiture zinc et comble (A Paris le terrasson⁷⁷ est recouvert de zinc et généralement le brisis⁷⁸ d'ardoises) (L'ANAH et le Ministère de l'Urbanisme et du Logement, 1984).

⁷⁷ Terrasson : Versant supérieur, de faible pente, d'une toiture à comble brisé.

⁷⁸ Brisis : sur une toiture à comble brisé, c'est le versant inférieur à forte pente.

Il existe peu de références sur la constitution des toits de Paris. Gromaire *et al.* (2001) estiment pour leur part que pour une surface de 1 016 ha, 40% des toitures parisiennes sont couvertes en zinc. Avec notre estimation de 3 350 ha de surface de toits, 40% correspond plutôt à 1 300 ha.

Comme pour le mur, trois couches sont actuellement utilisées pour décrire le toit au sein de TEB. Celles-ci correspondent globalement à l'étanchéité, à l'élément porteur et à l'isolation. A noter que TEB considère que les toits sont plats.

Un toit en zinc (ou en tuile) est constitué au minimum d'une charpente et de la couche de zinc (ou de tuile) (figure 63). Une couche d'isolant peut être ajoutée.

Les comportements thermiques des toits plats, des toits en tuile ou en zinc, peuvent être très différents comme nous pouvons le constater à partir des valeurs du tableau 16.

Nous ne pouvons pas proposer plusieurs types de toits au sein d'une maille de TEB, comme nous l'avons vu, et nous ne pouvons également pas moyenniser les valeurs des différentes caractéristiques. Nous avons décidé ici de décrire les toits de Paris comme étant tous en zinc, soit avec un albédo de 0,6 et une émissivité de 0,1.

Tableau 16 : Conductivité et capacité thermiques de différents matériaux de toiture.

| Matériaux | Conductivité thermique ($W m^{-1} K^{-1}$) | Capacité thermique ($MJ.m^{-3}.K^{-1}$) | Source |
|-----------|--|---|--|
| Zinc | 110 | 2,74 | NF EN ISO 10456 |
| Tuile | 1,15 | 1,58 | PIGEON G. (Travail sur la ville de Toulouse) |
| Béton | 1,35 | 2 | NF EN ISO 10456 |

Selon le DTU 40.41 sur les couvertures par éléments métalliques en feuilles et longues feuilles en zinc, les épaisseurs courantes des feuilles et longues feuilles pour les parties courantes des couvertures à tasseaux et des couvertures à joint debout : 0,65 mm, 0,70 mm, 0,80 mm ; et pour les ouvrages particuliers : 0,65 mm minimum, 0,70 mm, 0,80 mm, 1,00 mm. Ces feuilles sont disposées sur un support en bois massif (sapin, épicéa, pin sylvestre ou peuplier) qui, selon la nature de la pose, peut être d'une épaisseur comprise entre 12mm et 25mm. Le cas du voligeage jointif⁷⁹ est illustré avec la figure 64.

⁷⁹ Le voligeage est « l'ensemble des voliges qui composent un platelage destiné à recevoir un matériau de couverture ». La volige est pour sa part une « planche légère de sapin ou de peuplier d'environ 1,2, 1,8 ou 2,6 cm d'épaisseur et de 10,5 cm de largeur, utilisée en couverture pour composer des platelages jointifs : les

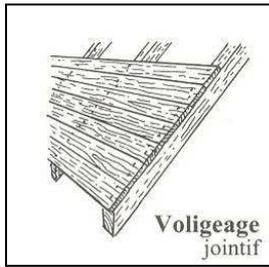


Figure 64 : Dessin d'un voligeage jointif (DICOBAT).

TEB ne tient pas compte d'une éventuelle convection au sein des couches décrivant le toit, il n'est donc pas possible de tenir compte d'une couche d'air important (entre un faux plancher et le toit par exemple) qui constituerait dans le cas présent un très bon isolant (l'air immobile a une conductivité thermique de $0,0262 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Vient ensuite, en dessous de la toiture, un faux plancher. A Paris, dans les immeubles de type haussmannien, les combles, qui correspondent à l'étage des anciennes chambres de bonnes, sont habités et seule une petite partie peut être encore inoccupée si l'on ne tient pas compte des aménagements ayant pu être réalisés depuis la construction de ces bâtiments (figure 63). Ce faux plancher est souvent constitué en bacula⁸⁰ ou plus simplement en bois.

Une couche d'isolant a été ajoutée au niveau des toits dans un grand nombre d'immeubles, nous proposons ainsi le découpage suivant :

- Une première couche de zinc de 0,7 mm (soit 0,07cm) (conductivité thermique de $110 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et capacité thermique de $2,74 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$ (NF EN ISO 10456)) ;
- Une deuxième couche de bois de 2 cm (conductivité thermique de $0,18 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et capacité thermique de $1,12 \text{ MJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$ (NF EN ISO 10456)) ;
- Une couche d'isolant (laine minérale) de 10 cm (conductivité thermique de $0,04 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et capacité thermique de $0,1 \text{ MJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$ (NF EN ISO 10456)).

IV.5 Description de Paris et comparaison avec les valeurs de l'urbain dense

Le tableau 17 résume pour 'urbain dense' et Paris la majorité des critères à renseigner pour la modélisation. Certains, nous le allons le voir, sont identiques.

voliges, clouées horizontalement sur les chevrons, servent à fixer les couvertures en ardoise, bardeau, feuilles métalliques, etc. » (DICOBAT, 1992)

⁸⁰ Le bacula (qui s'écrit aussi baccula) est un « *lattis [ensemble de lattes parallèles] de fines baguettes de bois ou [...] de roseaux fendus, assemblés en claiés par des fils de fer galvanisé. Cloué sous les solives d'un plancher de bois, la bacula constitue l'armature traditionnelle des enduits de plâtre en plafond.* » (DICOBAT, 1992)

Tableau 17 : Valeurs des critères de description de TEB et ISBA pour l'urbain dense de Météo-France et notre proposition pour Paris.

| Désignation | Valeur pour l'urbain dense (Météo-France) | Valeur proposée pour Paris | Unité | Symbole SURFEX |
|---|--|--|-------------------------------|-------------------------|
| SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUE DE L'ESPACE URBAIN | | | | |
| Valeur minimale de la longitude | | 2.40 | Deg | XLONMIN |
| Valeur maximale de la longitude | | 2.40 | Deg | XLONMAX |
| Valeur minimale de la latitude | | 48.73 | Deg | XLATMIN |
| Valeur maximale de la latitude | | 48.73 | Deg | XLATMAX |
| Nombre de points de grille en longitude | | 1 | - | NLON |
| Nombre de points de grille en latitude | | 1 | - | NLAT |
| Date du début de la modélisation | | | | |
| Année | | 2006 | - | NAM_PREP_SURF_ATM_NYEAR |
| Mois | | | - | NMONTH |
| Jour | | | - | NDAY |
| Temps | | | s | XTIME |
| COUVERTURE DU SOL | | | | |
| Fraction de mers/océans | | 0 | - | XUNIF_SEA |
| Fraction de lacs | 0 | 0.03 | - | XUNIF_WATER |
| Fraction de villes (TEB) | 0.9 | 0.80 | - | XUNIF_TOWN |
| Fraction de sol nu/végétation (ISBA) | 0.1 | 0.17 | - | XUNIF_NATURE |
| STRUCTURE URBAINE ET TISSU CONSTRUCTIF | | | | |
| longueur de rugosité dynamique du couvert urbain - Z_{0ville} | | 3 | m | XUNIF_Z0_TOWN |
| la fraction occupée par les bâtiments (= surface de toit/surface de toit et route) - $a_{bât}$ | | 0.5 | - | XUNIF_BLD |
| la hauteur des bâtiments - $z_{bât}$ | | 30 | m | XUNIF_BLD_HEIGHT |
| le facteur de forme du bâti (= surface des 2 murs/surface de route et toit = $2(z_{bât}/W)*(1-a_{bât})$) | 1 | 2 | - | XUNIF_WALL_O_HOR |
| PARAMETRES RADIATIFS ET THERMIQUES DES MATERIAUX URBAINS (TEB) | | | | |
| Toit | | | | |
| nombre de couches pour le toit | 3 | 3 | - | NROOF_LAYER |
| albédo du toit - α_t | 0.15 | 0.60 | - | XUNIF_ALB_ROOF |
| émissivité du toit - ϵ_t | 0.90 | 0.10 | - | XUNIF_EMIS_ROOF |
| capacité thermique des i couche de toit (de l'extérieur vers l'intérieur) - C_t | $2.11 \cdot 10^6$ (béton dense), $0.28 \cdot 10^6$ (béton cellulaire), $0.29 \cdot 10^6$ (isolation) ⁸¹ | $2,74 \cdot 10^6$ (zinc), $1.12 \cdot 10^6$ (bois), $0.1 \cdot 10^6$ (isolation) | $J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$ | XUNIF_HC_ROOF(i) |

⁸¹ On notera que ses valeurs cumulées à l'épaisseur des couches donnent une inertie très élevée aux toits.

| Désignation | Valeur pour l'urbain dense (Météo-France) | Valeur proposée pour Paris | Unité | Symbole SURFEX |
|--|---|---|-------------------|-------------------|
| conductivité thermique des i couche de toit - λ_t | 1.51, 0.08, 0.05 | 110, 0.18, 0.04 | $W.m^{-1}.K^{-1}$ | XUNIF_TC_ROOF(i) |
| épaisseur des n couche de toit - dt_i | 0.05, 0.4, 0.1 | 0.0007, 0.02, 0.1 | m | XUNIF_D_ROOF(i) |
| Route | | | | |
| nombre de couches pour la route (j) | 3 | 4 | - | NROAD_LAYER |
| albédos de la route - α_r | 0.08 | 0,10 | - | XUNIF_ALB_ROAD |
| émissivité de la route - ε_r | | 0.94 | - | XUNIF_EMIS_ROAD |
| capacité thermique des j couche de route - Cr_j | 1.94 10 ⁶ (asphalte), 1.28 10 ⁶ (sol sec), 1.28 10 ⁶ (sol sec) | 2.0 10 ⁶ (béton bitumineux), 2.0 10 ⁶ (béton bitumineux), 2.0 10 ⁶ (béton), 1,28 10 ⁶ (sol sec) | $J.m^{-3}.K^{-1}$ | XUNIF_HC_ROAD(j) |
| conductivité thermique des j couches de route - λ_r | 0.7454, 0.2513, 0.2513 | 2.0, 2.0, 1.35, 0.25 | $W.m^{-1}.K^{-1}$ | XUNIF_TC_ROAD(j) |
| épaisseur des j couches de route - dr_j | 0.05, 0.1, 1.0 | 0.01, 0.15, 0.25, 1.0 | m | XUNIF_D_ROAD(j) |
| Murs | | | | |
| nombre de couches pour les murs (k) | | 3 | - | NWALL_LAYER |
| albédos des murs - α_m | 0.25 | 0.40 | - | XUNIF_ALB_WALL |
| émissivité des murs - ε_m | 0.85 | 0.90 | - | XUNIF_EMIS_WALL |
| capacité thermique des k couches des murs - Cm_k | 1.55 10 ⁶ (béton), 1.55 10 ⁶ (béton), 0.29 10 ⁶ (isolation) | 2 10 ⁶ , 2 10 ⁶ , 2 10 ⁶ (béton) | $J.m^{-3}.K^{-1}$ | XUNIF_HC_WALL(k) |
| conductivité thermique des k couches des murs - λm_k | 0.9338, 0.9338, 0.05 ⁸² | 1.35, 1.35, 1.35 ⁸³ | $W.m^{-1}.K^{-1}$ | XUNIF_TC_WALL(k) |
| épaisseur des k couches des murs - dm_k | 0.02, 0.125, 0.05 | 0.02, 0.2, 0.05 | m | XUNIF_D_WALL(k) |
| ACTIVITES HUMAINES : LES FLUX D'ORIGINE ANTHROPIQUE | | | | |
| Le flux de chaleur sensible dû au trafic ⁸⁴ - QH_{trafic} | 20.0 | 37 | $W.m^{-2}$ | XUNIF_H_TRAFFIC |
| Le flux de chaleur latente dû au trafic- QE_{trafic} | 0.0 | 3 | $W.m^{-2}$ | XUNIF_LE_TRAFFIC |
| Le flux de chaleur sensible d'origine industrielle - QH_{indus} | 10.0 | 0 | $W.m^{-2}$ | XUNIF_H_INDUSTRY |
| Le flux de chaleur latente d'origine industrielle. QE_{indus} | 0.0 | 0 | $W.m^{-2}$ | XUNIF_LE_INDUSTRY |
| LE TYPE DE VEGETATION | | | | |
| Fraction de végétation | | | | |

⁸² Soit une résistance thermique du mur de 1,16 K.m². W⁻¹ (1,33 K.m². W⁻¹ avec résistance superficielle liée à la convection de 0,17 K.m². W⁻¹)

⁸³ Soit une résistance thermique de 0,37 K.m². W⁻¹, avec résistance superficielle liée à la convection de 0,17 K.m². W⁻¹ incluse.

⁸⁴ 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.

| Désignation | Valeur pour l'urbain dense (Météo-France) | Valeur proposée pour Paris | Unité | Symbole SURFEX |
|--|---|----------------------------|-------|-------------------|
| <i>Sol nu (bare ground)</i> | | 0 | - | XUNIF_VEGTYPE(1) |
| <i>Rochers (rocks)</i> | | 0 | - | XUNIF_VEGTYPE(2) |
| <i>Neiges éternelles (Permanent snow)</i> | | 0 | - | XUNIF_VEGTYPE(3) |
| <i>Arbres à feuilles caduques (deciduous forest)</i> | 0.5 | 0.5 | - | XUNIF_VEGTYPE(4) |
| <i>Forêt de conifères (conifer forest)</i> | | 0 | - | XUNIF_VEGTYPE(5) |
| <i>Arbres à larges feuilles persistantes (evergreen broadleaf trees)</i> | | 0 | - | XUNIF_VEGTYPE(6) |
| <i>Cultures (C3 crops)</i> | | 0 | - | XUNIF_VEGTYPE(7) |
| <i>Cultures (C4 crops)</i> | | 0 | - | XUNIF_VEGTYPE(8) |
| <i>Cultures irriguées (irrigated crops)</i> | | 0 | - | XUNIF_VEGTYPE(9) |
| <i>Prairies (grassland (C3))</i> | | 0 | - | XUNIF_VEGTYPE(10) |
| <i>Prairies tropicales (tropical grassland (c4))</i> | | 0 | - | XUNIF_VEGTYPE(11) |
| <i>Jardin et parcs (garden and parks)</i> | 0.5 | 0.5 | - | XUNIF_VEGTYPE(12) |

IV.6 Comparaison des résultats des simulations pour les modèles Paris et urbain dense et choix d'une 'ville-témoin'

Les modélisations du bilan énergétique des deux surfaces 'Paris' et 'urbain dense' donnent des résultats très différents (figure 65), qui s'expliquent, en plus de la plus grande proportion d'espaces végétalisés au sein de 'Paris' et des activités humaines différentes, par des bilans d'énergie différents au sein des trois types de surfaces que sont les murs, les routes et les toits (figures 66, 67 et 68).

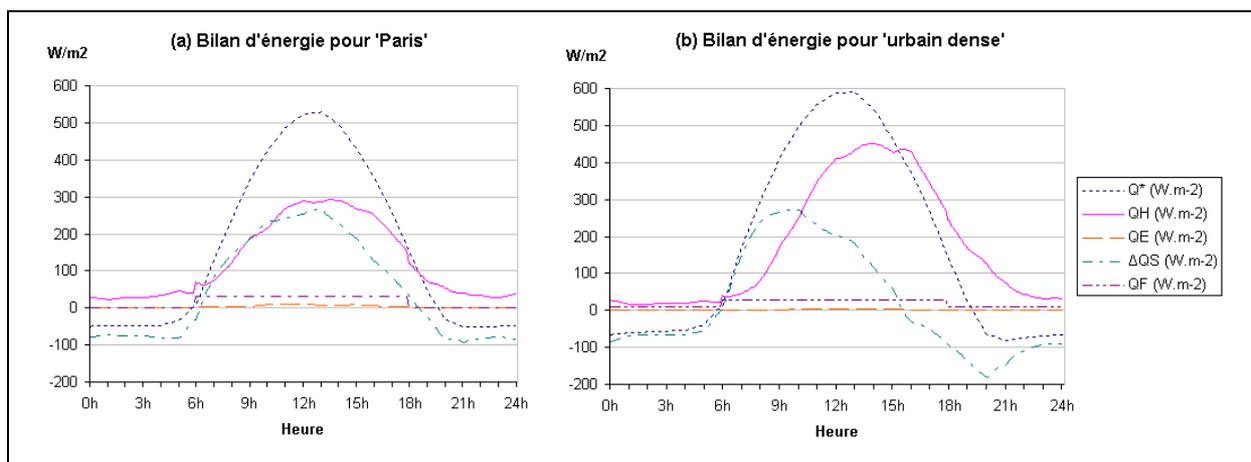


Figure 65 : Bilans d'énergie pour 'Paris' et 'urbain dense' le 30 juin 2006.

Comme Piringer et Joffre (2005) le constatent pour d'autres zones urbaines denses, le flux de chaleur sensible, pour 'Paris' comme pour 'urbain dense' (figure 65), reste positif durant la

nuit. Ce flux est soutenu par les importants rejets de la chaleur stockée au sein du bâti durant la journée. Du fait de la faible quantité de végétation au sein de la ville et de la période de modélisation ne présentant pas de pluies, les flux de chaleur latente sont faibles dans les deux situations modélisées. Comme constaté dans d'autres zones urbaines (Grimmond et Oke, 1999(b)), pour l'urbain dense, le flux de chaleur stockée (ΔQ_s) est maximal avant midi et le maximum solaire ; le flux devient également négatif avant le rayonnement net (Q^*). Le décalage est d'une heure pour 'Paris' et de plus de trois heures pour 'urbain dense'.

La description des toits est très différente entre 'Paris' et 'urbain dense' (tableau 17). Pour 'Paris', la surface du toit est en zinc, avec une faible émissivité et un fort albédo, alors que pour 'urbain dense', la surface est en béton avec un faible albédo et une forte émissivité. Cela permet dans un premier temps de comprendre la grande différence de rayonnement net (Q^*) entre les deux situations, avec par exemple un rayonnement net maximal de 326 W.m^{-2} pour 'Paris' et un rayonnement net maximal de 506 W.m^{-2} pour 'urbain dense', tout deux à 13h. La structure du toit est également différente. Le toit pour 'Paris' a une faible inertie et une résistance thermique moyenne⁸⁵ de $2,78 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$. Le toit pour 'urbain dense' a une inertie plus importante que pour 'Paris' mais surtout une isolation thermique sans doute très surestimée puisqu'elle est de $7,20 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$. Dans le cas de 'Paris', ces caractéristiques thermiques du toit couplées aux propriétés du zinc font que le peu de rayonnement solaire, qui est absorbé (40%) et transformé en chaleur, est relativement vite échangé entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment (en comparaison au cas 'urbain dense') et peu stocké au sein des matériaux. Ceci explique le fait que la courbe de flux de chaleur sensible soit très proche de celle du rayonnement net et que la chaleur stockée reste faible, pour 'Paris'. Dans le cas de 'urbain dense', la très forte résistance thermique, couplée à un faible albédo et une inertie plus importante que pour 'Paris', permet un plus grand stockage de chaleur au sein des matériaux du toit dès les premiers rayons du soleil d'où le profil observé pour les flux de chaleur stockée et de chaleur sensible.

⁸⁵ Dans la réglementation thermique de 2005, la valeur de référence pour les toitures terrasses en ce qui concerne la résistance thermique est de $3,70 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$.

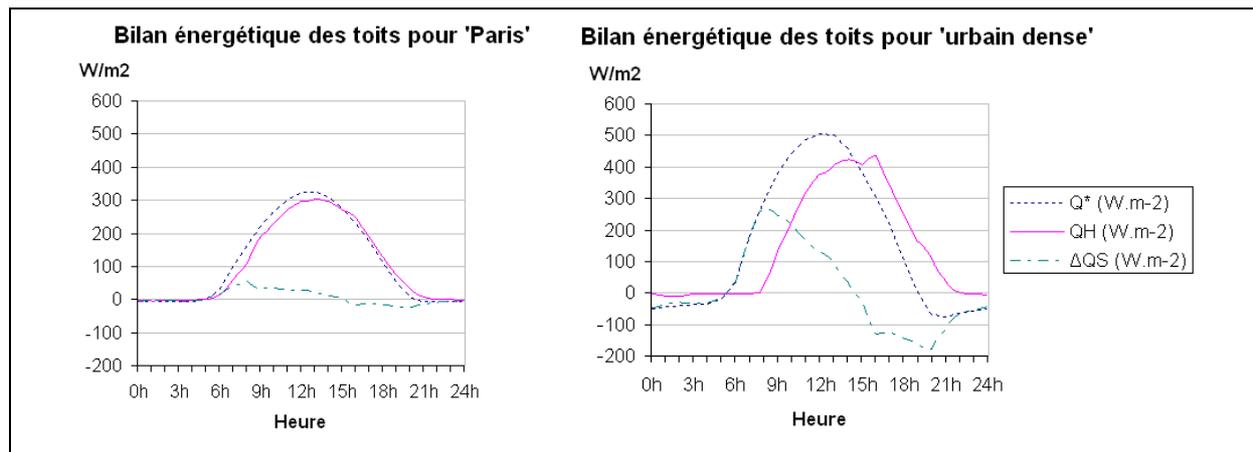


Figure 66 : Bilans énergétiques des toits pour 'Paris' et 'urbain dense' (W.m^{-2}) le 30 juin 2006.

La description des murs est également différente entre 'Paris' et 'urbain dense'. Les murs pour 'Paris' ont un albédo plus élevé (0,40 au lieu de 0,25 pour 'urbain dense') mais une émissivité proche. Cela permet, avec également la prise en compte du fait que les rues sont plus étroites pour 'Paris' que pour 'urbain dense', d'expliquer les différences de rayonnement net (Q^*) entre les deux situations, avec par exemple un rayonnement net maximal de 112 W.m^{-2} pour 'Paris' et un rayonnement net maximal de 167 W.m^{-2} pour 'urbain dense', à 14h pour le premier et 15h pour le second. La structure du mur a également des propriétés thermiques différentes. Pour 'Paris', les murs ont une faible résistance thermique ($0,37 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$)⁸⁶ qui s'explique par la prise en compte dans le calcul des fenêtres et l'absence d'isolation, alors que pour 'urbain dense' la résistance thermique est plutôt élevée ($1,33 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$). Pour ce qui est de l'inertie, celle des murs pour 'Paris' est plus importante que celle des murs pour 'urbain dense'. Cette combinaison de caractéristiques thermiques permet d'obtenir, comme nous pouvons le constater (figure 67), des évolutions proches au niveau des variations du flux de chaleur stockée (ΔQ_S) au sein des deux types de murs. Les évolutions des flux de chaleur sensible (Q_H) sont, pour leur part, très différentes.

⁸⁶ Dans la réglementation thermique de 2005, la valeur de référence pour les murs est de $2,78 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$, pour les fenêtres de $0,56 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$, soit pour des murs avec 35% de fenêtres de $1,16 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$.

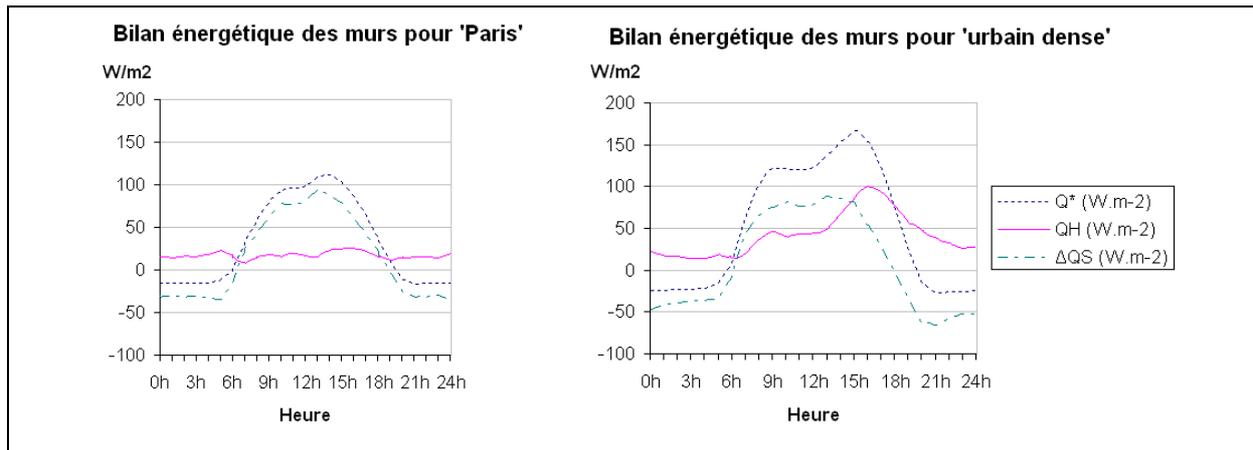


Figure 67 : Bilans énergétiques des murs pour 'Paris' et 'urbain dense' ($W.m^{-2}$) le 30 juin 2006.

La description des routes est également différente entre 'Paris' et 'urbain dense'. En effet, si les caractéristiques de surface sont proches (l'émissivité est de 0,94 dans les deux cas, et l'albédo est de 0,1 pour 'Paris' et de 0,08 pour 'urbain dense'), ce n'est pas le cas de la structure. Pour 'urbain dense', la route est constituée d'une couche mince d'asphalte (5 cm) qui recouvre du sol sec, alors que pour 'Paris', ce sol sec est recouvert par 16 cm béton bitumineux (en surface) et 25 cm de béton. Si ces caractéristiques ont sans aucun doute une importance, nous pouvons constater pour le moment uniquement l'importance de la géométrie de la rue (beaucoup plus étroite pour 'Paris' que pour 'urbain dense') qui empêche une partie du rayonnement solaire d'atteindre la route d'où cette différence, malgré des caractéristiques de surface proche, du rayonnement net. Le rayonnement net maximal est de $280 W.m^{-2}$ pour 'Paris' et de $424 W.m^{-2}$ pour 'urbain dense', et a lieu à 12h dans les deux cas.

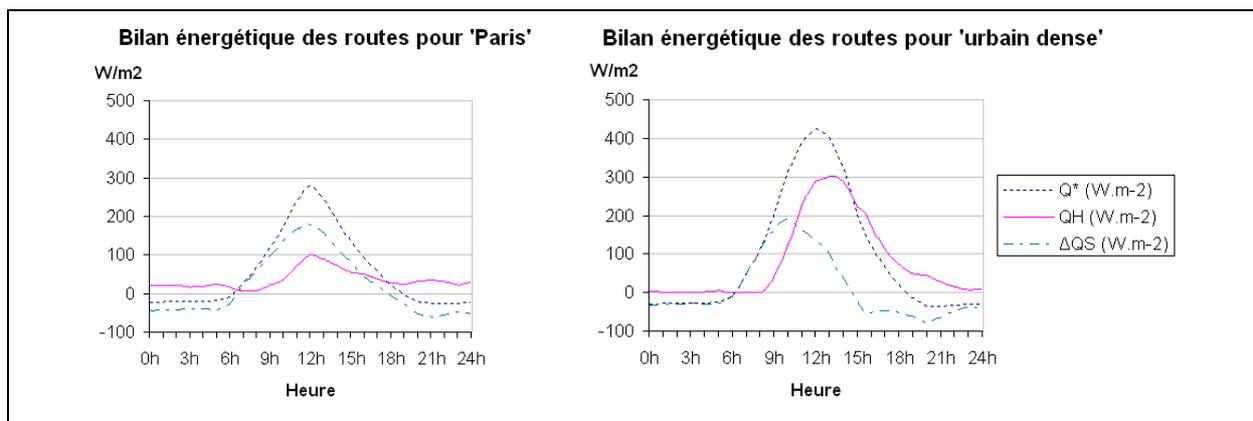


Figure 68 : Bilans énergétiques des routes pour 'Paris' et 'urbain dense' ($W.m^{-2}$) le 30 juin 2006.

Suite à ces modélisations et à l'analyse des chiffres de 'urbain dense', il a été décidé de choisir la description proposée pour Paris pour servir de support à nos différentes simulations. Celle-ci est en effet a priori plus proche du cadre bâti parisien qu'urbain dense. Sur la base de ce cas témoin, qui servira donc d'élément de comparaison, plusieurs scénarii ont été élaborés pour permettre d'évaluer la sensibilité climatique des différents paramètres et de modifications plus complexes (chapitre V).

V Présentation des différentes simulations

V.1 Etude de sensibilité du bilan d'énergie : variation simple des paramètres de SURFEX

A partir de la description de Paris présentée précédemment, nous allons tester 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, rappelons-le, 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, schéma que nous avons choisi d'utiliser.

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 des bâtiments, plutôt que celle de la fraction occupée par les bâtiments et du facteur de forme du bâti.

Nous proposerons plusieurs 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. Le détail des paramètres modifiés pour chaque modélisation est disponible en annexe 12.

V.1.1 Couverture du sol

Selon la description effectuée précédemment Paris compte, hors Bois de Boulogne et de Vincennes, 3% de surface d'eau, 80% d'espaces minéralisés (TEB) et 17% d'espaces végétalisés (ISBA).

La modification de la part dévolue aux espaces végétalisés (parcs, jardins publics et privés, arbres d'alignement, etc.) induit une modification de la part d'espace minéral (à surface d'eau constante). Nous avons choisi de tester la sensibilité du bilan d'énergie avec cinq expériences : un extrême inférieur sans végétation, une dégradation modérée avec une diminution de 50% de la surface actuelle des espaces végétalisés (soit 9% d'espaces végétalisés), une amélioration modérée avec une augmentation de 50% de la surface actuelle des espaces végétalisés (soit 26% d'espaces végétalisés), une amélioration importante de

100% de la surface actuelle des espaces végétalisés (soit 34% d'espaces végétalisés), et un extrême supérieur avec 50% d'espaces végétalisés (figure 69).

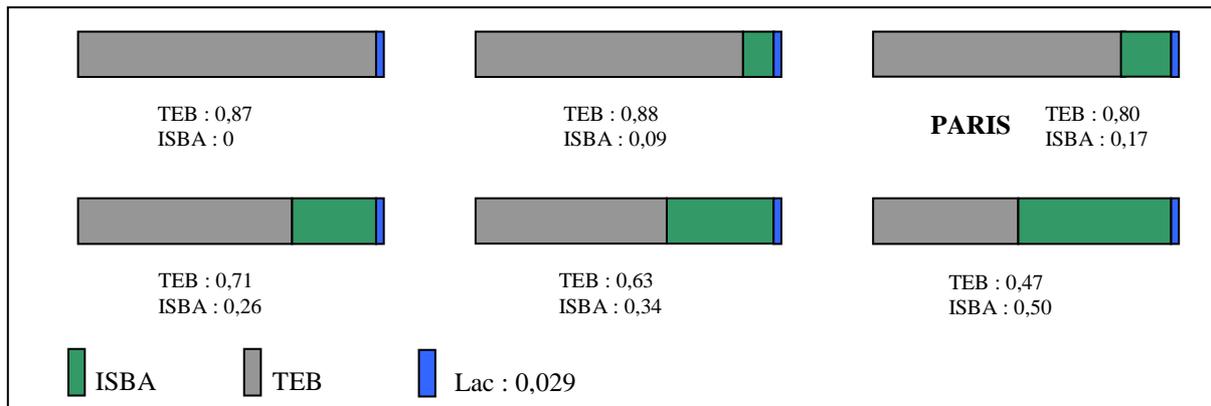


Figure 69 : Représentation des fractions de ville (TEB), de végétation (ISBA) et d'eau selon les différentes expériences modélisées.

Les surfaces d'eau comptabilisées au sein de Paris concernent la Seine et les canaux. Les possibilités pour faire varier la part de surface dévolue à l'eau sont relativement faible d'où un intervalle de propositions moins important que pour les espaces végétalisés. Nous avons donc choisi de modéliser un extrême inférieur sans eau, une dégradation modérée avec 1% de surfaces d'eau, une amélioration modérée avec 6% de surfaces d'eau (soit une augmentation de 100% par rapport à la surface actuelle), une amélioration importante avec 12% de surfaces d'eau (soit une augmentation de 200% par rapport à la surface actuelle), et un extrême supérieur avec 20% de surfaces d'eau (figure 70).

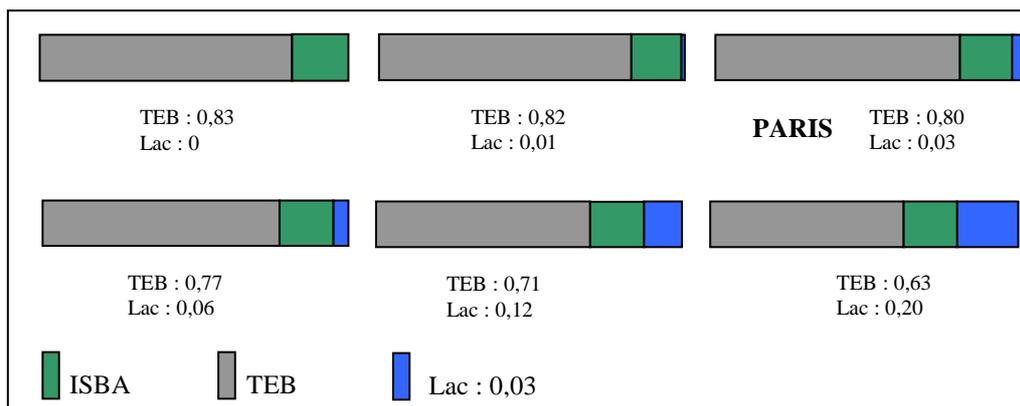


Figure 70 : Représentation des fractions de ville (TEB), de végétation (ISBA) et d'eau selon les différentes expériences modélisées.

V.1.2 Structure urbaine et tissu constructif

Le paragraphe précédent décrit la structure urbaine et le tissu constructif de Paris. On a ainsi obtenu pour Paris une hauteur moyenne des bâtiments de 30 m (soit une longueur de rugosité

de $3m^{87}$), une fraction occupée par les bâtiments ($a_{bât}$) de 0,5, et un facteur de forme du bâti de 2, ce qui donne une largeur moyenne de rue de 15 m et une profondeur de bâtiment de 15 m.

La fraction occupée par les bâtiments ($a_{bât}$), le facteur de forme du bâti et la hauteur des bâtiments ($z_{bât}$) sont dépendants l'un de l'autre, ainsi que la longueur de rugosité dynamique du couvert urbain ($z_{0mville}$) et la hauteur des bâtiments ($z_{bât}$). Pour mieux comprendre le rôle joué par la rue et le toit, nous distinguons les paramètres suivants : la hauteur des bâtiments ($z_{bât}$), la largeur moyenne des rues (W) et la profondeur des bâtiments ($P_{bât}$). (Figure 71)

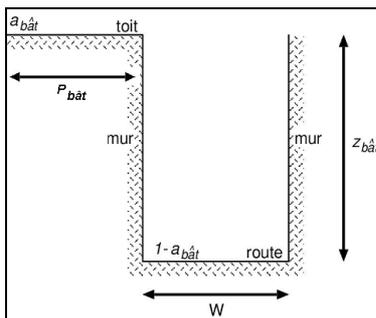


Figure 71 : Schématisation du canyon urbain dans TEB - avec W la largeur moyenne des rues, $a_{bât}$ la fraction de bâtiment, $z_{bât}$ la hauteur moyenne des bâtiments et $z_{bât}$ la profondeur moyenne des bâtiments (D'après : Lemonsu, 2003).

La largeur des rues modifie deux facteurs au sein de TEB : la fraction occupée par les bâtiments et le facteur de forme du bâti. Elle est à Paris d'environ 15 m et la profondeur moyenne des bâtiments est de 15 m. Pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à une modification de la largeur moyenne des rues, nous avons effectué quatre expériences correspondant aux hauteurs suivantes : 10m, 30m, 45m et 60m (figure 72).

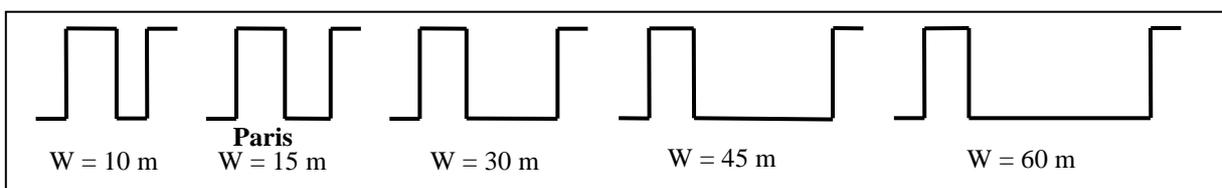


Figure 72 : Représentation des formes du canyon selon les différentes expériences modélisées, c'est-à-dire en fonction de la largeur moyenne des rues W .

En ce qui concerne la hauteur des bâtiments, trois facteurs sont concernés au sein de TEB par sa modification : la longueur de rugosité dynamique du couvert urbain, la hauteur des bâtiments bien sur, et le facteur de forme du bâti.

⁸⁷ La longueur de rugosité est égale à 1/10 de la hauteur des bâtiments et ce avec une limite de 5m.

Même si la tendance au sein des villes est à la densification et, par conséquent, sans doute à une augmentation du nombre des étages (et donc de la hauteur des bâtiments) plus qu'à une diminution, les deux tendances sont intéressantes à regarder et cinq valeurs différentes ont été choisies : 5m, 15m, 45m, 60m et 100m (figure 73).

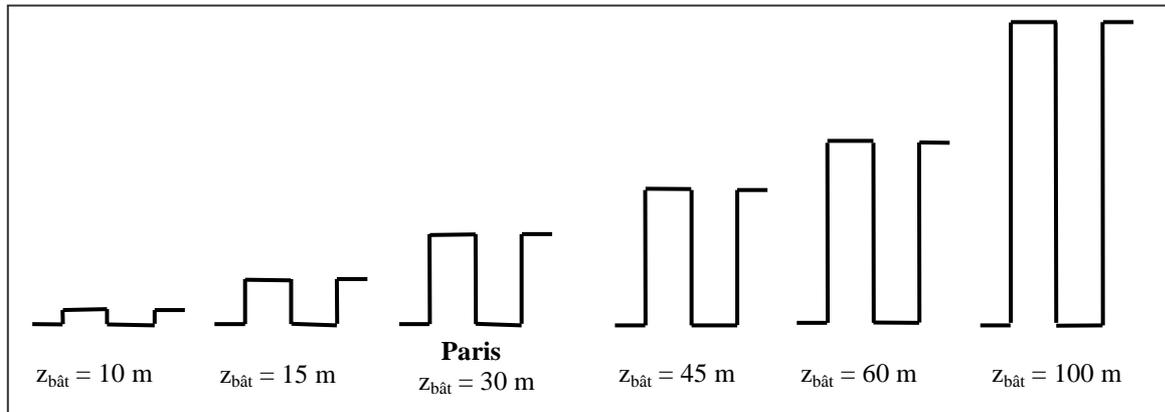


Figure 73 : Représentation des formes du canyon selon les différentes expériences modélisées, c'est-à-dire en fonction de la hauteur des bâtiments $z_{\text{bât}}$.

Deux facteurs sont concernés au sein de TEB par la modification de la profondeur des bâtiments : la fraction occupée par les bâtiments et le facteur de forme du bâti.

Pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la profondeur des bâtiments, nous avons choisi quatre valeurs : 10m, 30m, 45m et 60m (figure 74).

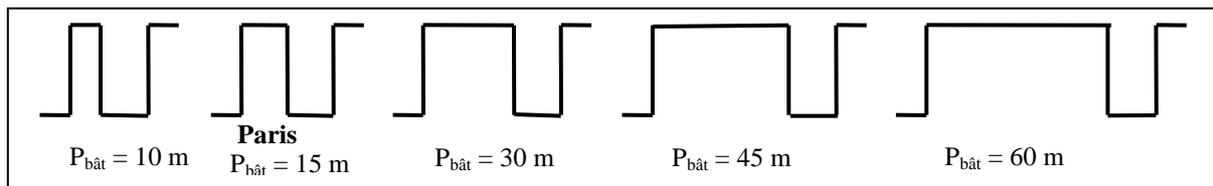


Figure 74 : Représentation des formes du canyon selon les différentes expériences modélisées, c'est-à-dire en fonction de la profondeur des bâtiments $P_{\text{bât}}$.

V.1.3 Paramètres radiatifs et thermiques des matériaux urbains

TEB permet une certaine précision dans la description des murs, routes et toits. Pour éviter de trop complexifier ce plan d'expériences nous proposons de faire varier, pour tenir compte d'une amélioration ou d'une diminution de la qualité de l'isolation, uniquement la conductivité thermique de la couche intérieure. Et pour ce qui est de l'inertie, nous proposons de faire varier uniquement la capacité thermique de la couche la plus épaisse.

La résistance thermique d'un mur (R_m) ou d'un toit (R_t) composé de plusieurs couches est la somme des résistances thermiques de chacune de ces couches (Pour les couches de murs : $R_{m_i} = d_{m_i} / \lambda_{m_i}$; pour les couches de toits : $R_{t_i} = d_{t_i} / \lambda_{t_i}$).

Une diminution de la conductivité thermique (soit une augmentation de la résistance thermique) permet d'améliorer l'isolation et une augmentation de la capacité thermique augmente l'inertie d'un bâtiment.

Pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'isolation des toits (pour Paris, la résistance thermique du toit est actuellement de $2,78 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$), cinq modélisations ont été effectuées : un extrême inférieur avec une résistance thermique de $0,28 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$; une diminution modérée de 50% avec une résistance thermique de $1,39 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$; une augmentation modérée de 100% avec donc une résistance thermique de $5,28 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$; une augmentation importante de 150% avec donc une résistance thermique de $6,94 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$; et un extrême supérieur avec une résistance thermique de $10,28 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$.

Pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des toits, nous avons fait varier la capacité thermique de la troisième couche du toit (10 cm d'épaisseur et une capacité thermique pour Paris de $0,1 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$). Cinq expériences ont été faites avec les capacités thermiques suivantes : $0,01 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$; $0,05 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$; $1 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$; $2 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$; $5 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$.

Pour les toits de Paris nous avons fixé un albédo moyen de 0,60 et testé la sensibilité du bilan d'énergie au travers des expériences suivantes : un extrême inférieur avec un albédo de 0,05 ; une diminution modérée de -0,15 soit un albédo de 0,45 ; une augmentation modérée de +0,15 soit un albédo de 0,75 ; une augmentation importante de +0,30 soit un albédo de 0,90 ; et un extrême supérieur avec un albédo de 0,95.

Pour les toits de Paris nous avons fixé une émissivité moyenne de 0,1 (toiture en zinc). La sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité a été testée avec les valeurs suivantes : un extrême inférieur de 0,05 ; une augmentation modérée avec 0,3 ; une augmentation importante avec 0,7 ; et un extrême supérieur de 1.

En plus de ces trois types d'expériences pour les toits, nous avons également testé la sensibilité à la nature des toits avec des toits en tuile et des toitures-terrasses.

Pour l'isolation des murs, les valeurs retenues pour Paris tiennent compte, comme nous l'avons expliqué, de la présence des fenêtres, ce qui, ajouté à la faible isolation du bâti parisien, justifie la faible résistance thermique des murs ($0,37 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$). Pour intégrer une isolation aux murs, nous avons ajouté une quatrième couche d'isolant à l'intérieur, de 10 cm d'épaisseur et de faible capacité thermique ($0,1.10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$) et de conductivité thermique différente selon les modélisations. Voici les différentes situations modélisées : une augmentation modérée de la résistance thermique du mur ($2,04 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$) ; une augmentation importante ($3,70 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$) ; et un extrême supérieur ($5,37 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$).

Pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des murs, nous avons fait varier la capacité thermique de la deuxième couche des murs (20 cm d'épaisseur et une capacité thermique pour Paris de $2.10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$). Cinq expériences ont été faites avec les capacités thermiques suivantes : $0,01.10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$; $1.10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$; $3.10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$; $4.10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$; $5.10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$.

Pour les murs de Paris nous avons fixé un albédo moyen de 0,40 et testé la sensibilité du bilan d'énergie au travers des expériences suivantes : un extrême inférieur avec un albédo de 0,05 ; une diminution modérée de -0,15 soit un albédo de 0,25 ; une augmentation modérée de +0,15 soit un albédo de 0,55 ; une augmentation importante de +0,30 soit un albédo de 0,70 ; et un extrême supérieur avec un albédo de 0,95.

Pour les murs de Paris nous avons également fixé une émissivité moyenne de 0,9. La sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité a été testée avec les valeurs suivantes : un extrême inférieur de 0,05 ; une diminution importante avec 0,3 ; une diminution modérée avec 0,6 ; et un extrême supérieur de 1.

Du fait des hypothèses de calculs de TEB pour les routes (le flux de chaleur par conduction est nul au bas de la dernière couche de matériau représentée, cf. annexe 9) la question de la conductivité thermique est peu intéressante. De plus, le sol sec joue à lui-seul un rôle important d'isolant hors ce matériau n'est a priori pas celui sur lequel nous avons le plus d'influence. Nous pouvons en revanche nous intéresser à l'influence de l'inertie thermique.

Ainsi, pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des murs, nous avons fait varier la capacité thermique de la troisième couche (37 cm d'épaisseur et une capacité thermique pour Paris de $2 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$). Cinq expériences ont été faites avec les capacités thermiques suivantes : $0,1 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$; $1 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$; $3 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$; $4 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$; $5 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$.

Les rues de Paris ont un albédo faible de 0,1. Nous avons testé la sensibilité du bilan d'énergie à l'albédo des rues au travers des expériences suivantes : un extrême inférieur avec un albédo de 0,05 ; une augmentation modérée de +0,15 soit un albédo de 0,25 ; une augmentation importante de +0,30 soit un albédo de 0,40 ; et un extrême supérieur avec un albédo de 0,95.

L'émissivité des rues est de 0,94. La sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité a été testée avec les valeurs suivantes : un extrême inférieur de 0,05 ; une diminution importante avec 0,3 ; une diminution modérée avec 0,6 ; et un extrême supérieur de 1.

V.1.4 Activités humaines : les flux de chaleur anthropique

Aujourd'hui, à Paris, sur les deux activités prises en compte par le schéma TEB (trafic routier et industries), seul le trafic routier est générateur de flux de chaleur avec un flux de chaleur sensible de 37 W.m^{-2} et un flux de chaleur latente de 3 W.m^{-2} entre 8h et 18h (ces flux sont à zéro la nuit). L'industrie ne génère aujourd'hui quasiment plus de flux de chaleur d'où une estimation à zéro.

Pour tester la sensibilité du bilan d'énergie au flux de chaleur sensible dû au trafic, nous avons effectué cinq modélisations : un extrême inférieur de 0 W.m^{-2} ; une diminution importante avec 10 W.m^{-2} ; une diminution modérée de 50% avec 20 W.m^{-2} ; une augmentation modérée de 50% avec 55 W.m^{-2} ; et un extrême supérieur de 100 W.m^{-2} .

Pour tester la sensibilité du bilan d'énergie au flux de chaleur latente dû au trafic, nous avons effectué quatre modélisations : un extrême inférieur de 0 W.m^{-2} ; une diminution modérée de 50% avec $1,5 \text{ W.m}^{-2}$; une augmentation modérée de 50% avec 5 W.m^{-2} ; et un extrême supérieur de 15 W.m^{-2} .

Pour tester la sensibilité du bilan d'énergie aux flux de chaleur d'origine industrielle, nous avons, pour les flux de chaleur sensible comme le flux de chaleur latente, effectué deux modélisations : une à 20 W.m^{-2} et l'autre à 40 W.m^{-2} .

V.2 Etude de sensibilité du bilan d'énergie à la variation de multiples paramètres en relation avec les domaines d'action identifiés

L'objectif ici est de proposer plusieurs modélisations en relation avec les leviers d'actions précédemment identifiés : le bâtiment, les espaces publics, et l'organisation urbaine. Nous avons choisi, en ce qui concerne les activités industrielles et le transport, de ne pas proposer de modélisations supplémentaires en plus de celles effectuées pour les tests de sensibilité. Pour les modélisations présentées ici, le cas témoin reste toujours Paris.

V.2.1 Bâtiment

Au sein du domaine du bâtiment, nous avons identifié trois grands leviers d'action, tous décrits par une multiplicité de critères : la forme du bâtiment, sa composition et structure, et son exploitation.

TEB ayant une description relativement simplifiée de la structure urbaine⁸⁸, les tests de sensibilité précédemment effectués ont permis de répondre en grande partie à la question de la forme du bâtiment. Concernant l'exploitation du bâtiment, TEB ne permet pas de tenir compte d'activités ou de comportements particuliers. L'échelle de la modélisation n'est pas ailleurs pas forcément adaptée à l'intégration de tels paramètres. Les rejets de la climatisation peuvent être modélisés par le biais des flux de chaleur liés au trafic ou à l'industrie. Nous avons choisi de ne pas étudier cet aspect.

En ce qui concerne la composition et la structure du bâtiment et son exploitation, plusieurs situations méritent d'être modélisées.

L'amélioration des performances énergétiques des bâtiments est aujourd'hui un enjeu majeur et s'articule notamment avec les diminutions des rejets en gaz à effet de serre (GES) et la lutte contre le changement climatique.

Les réglementations thermiques ont permis d'améliorer l'efficacité thermique des bâtiments et celle de 2005 préconise un coefficient de transmission de surface de référence⁸⁹ de $1,8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pour les fenêtres, de $0,36 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pour les parois opaques, et de

⁸⁸ TEB s'appuie sur le concept du canyon urbain. Le toit et la route sont des surfaces planes horizontales et les murs des surfaces verticales de même hauteur. La hauteur et la profondeur des bâtiments ainsi que la largeur des rues ne varient pas au sein de la maille modélisée. Toutes les orientations de rue sont possibles, et elles existent avec la même probabilité.

⁸⁹ Le coefficient de transmission de surface de référence est une valeur qui détermine le niveau de performance à viser pour avoir une cohérence entre le bâti et les équipements. $U=1/R_T$ où R_T est la somme des résistances thermiques des couches plus la résistance thermique d'échange superficiel (R_i et R_e) qui vaut $0,17 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$ pour un mur et un toit

0,27 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ pour les toitures terrasses (soit une résistance thermique respectivement de 0,56 $\text{K}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$, de 2,78 $\text{K}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ et de 3,70 $\text{K}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$, résistance thermique d'échange superficiel (R_i et R_e) incluse). Par exemple avec 35% de fenêtres sur un mur (hypothèse choisie pour décrire Paris), la réglementation thermique de 2005 (RT 2005) préconise ainsi un coefficient de transmission surface (U) de 0,864 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, soit une résistance thermique de 1,16 $\text{K}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$.

Nous allons également nous appuyer sur les standards Minergie (figure 75).

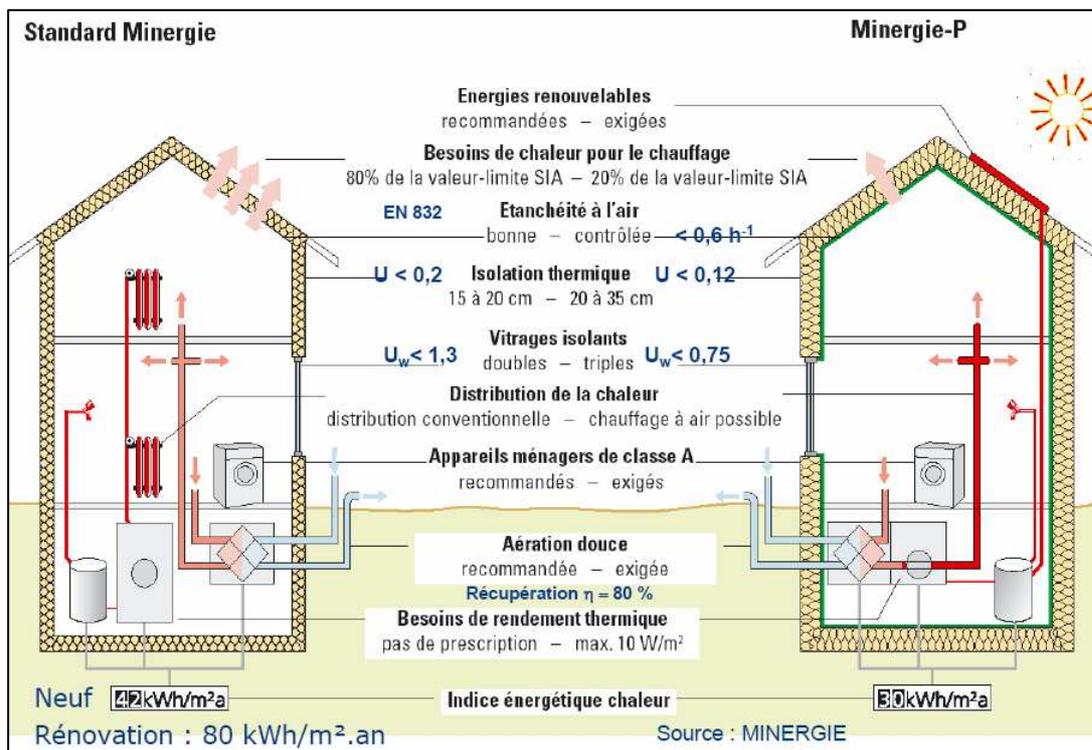


Figure 75 : Les standards Minergie et Minergie-P (MINERGIE).

A ces questions d'isolation thermique s'ajoutent également le choix de l'albédo des matériaux de surface (toit et murs) dont l'influence sur l'îlot de chaleur urbain comme sur le confort intérieur du bâtiment est non négligeable. Si pour les murs, l'utilisation d'une peinture blanche est relativement aisée et permet d'atteindre des albédos entre 0,7 et 0,9 (l'émissivité reste aux alentours de 0,9), pour les toits la question est plus « difficile » dans le sens où la modification de l'albédo dépend parfois d'un nouveau choix de matériau de couverture et non d'une nouvelle couleur de peinture. Le zinc, qui est le matériau choisi pour notre représentation de Paris, a déjà un albédo élevé (albédo de 0,68). Une base de données a été créée dans le cadre du projet Heat Island Project mené par Hashem Akbari 'Lawrence Berkeley National Laboratory' (<http://eetd.lbl.gov/CoolRoofs/>). Nous avons choisi deux

revêtements blancs d'albédo 0,75 et 0,85, et de même émissivité : 0,91 ; le revêtement blanc est ce qui permet d'avoir globalement les albédos les plus élevés en comparaison avec les membranes ou les toits en métal.

Nous avons choisi de regarder les conséquences en termes de bilan d'énergie de différentes améliorations thermiques des bâtiments à partir de la description de Paris (dont, , pour notre description, la résistance thermique du toit est de $2,78 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$ et la résistance thermique des murs de $0,37 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$). Nous proposons donc de regarder les six cas suivants :

- Des bâtiments conformes à la RT 2005 ($R_{th}(\text{toit}) = 3,92 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$; $R_{th}(\text{mur}) = 1,21 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$)
- Des bâtiments conformes au standard Minergie ($R_{th}(\text{toit}) = 5,05 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$; $R_{th}(\text{mur}) = 1,90 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$) ;
- Des bâtiments conformes au standard Minergie-P ($R_{th}(\text{toit}) = 8,41 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$; $R_{th}(\text{mur}) = 3,15 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$) ;
- Des bâtiments de couleur claire ou avec des matériaux réfléchissants (albédo des toits et des murs de 0,75) ;
- Des bâtiments de couleur très claire ou avec des matériaux très réfléchissants (albédo des toits et des murs de 0,85) ;
- Des bâtiments conformes au standard Minergie-P, de couleur très claire ou avec des matériaux très réfléchissants ($R_{th}(\text{toit}) = 8,41 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$; $R_{th}(\text{mur}) = 3,15 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$; et albédo des toits et des murs de 0,85).

Pour le calcul de la résistance thermique des murs pour ces différentes situations, nous avons conservé le taux moyen de vitrage de Paris qui est estimé à 35% de la surface de murs⁹⁰ et proposé une couche d'isolant permettant de tenir compte de l'isolation plus faible des fenêtres.

⁹⁰ Dans la réglementation thermique de 2005, la surface vitrée de référence est limitée à $1/6$ ($\approx 17\%$) de la surface habitable, surface qui comprend en plus des murs, les pignons et les toits. Notre choix de conserver 35% de taux de vitrage est donc justifiable, les pignons et les toits ayant une surface à peu près équivalente à celle des murs.

V.2.2 Espaces publics

Cinq leviers d'action ont été identifiés concernant les espaces publics : la forme de la rue, la composition du sol de la voirie, la géométrie des rues, les arbres d'alignement et la nature des espaces végétalisés. L'orientation et le tracé des rues ne sont pas pris en compte au sein de TEB. Parmi les modèles de méso-échelle présentés précédemment, hormis le modèle de Martilli (FVM) qui tient compte de l'orientation des rues, ces limites sont communes aux autres modèles. Ainsi les tests de sensibilité proposés permettront de comprendre en partie l'influence de ces différents leviers.

Si la végétalisation des espaces urbains est un travail déjà effectué par les grandes agglomérations pour des raisons autres que climatiques, la question de la voirie reste encore faiblement abordée. Il existe pourtant des matériaux tels que le béton désactivé ou encore l'asphalte clair permettant d'avoir un albédo plus élevé. La contrainte du nettoyage⁹¹ est cependant forte.

V.2.3 Organisation urbaine

Le domaine de l'organisation urbaine possède trois leviers d'action composés de multiples critères : les densités, l'agencement des espaces publics au sein de la ville, et la forme et le profil de l'espace urbain. Comme c'est le cas pour les autres modèles de méso-échelle, SURFEX utilisé en mode forcé ne permet pas de connaître l'influence de l'agencement des espaces publics au sein de la ville, ni même le rôle précis de la forme et du profil de l'espace urbain. Nous nous limitons donc pour ces deux leviers aux tests de sensibilités effectués précédemment.

Aujourd'hui, la densification des zones urbaines est un objectif affiché (exemple : schéma directeur de la région Ile-de-France). Un des arguments est que cela permet d'éviter des surconsommations énergétiques dues notamment à la question des transports. Pourtant, pour rester attractives, les villes doivent également proposer des espaces verts, de la végétation, rester aérés. Nous avons donc là deux objectifs en opposition.

⁹¹ Dans le PLU de la Ville de Paris, on peut lire : « Des matériaux de type asphalte noir ou dalles en pierre naturelle (granit) ne nécessitent pas de nettoyage exceptionnel. Par contre, des matériaux de type béton désactivé (sauf si celui-ci est de teinte sombre, car dans ce cas il possède une bonne tenue aux souillures organiques et ce contrairement à un asphalte clair, même silicé), ou de type stabilisé (qui induit des problèmes de désherbage et de traitement des déjections canines), sont à éviter en règle générale sur de grandes étendues, a fortiori si la colorimétrie choisie est claire. Si pour des contraintes architecturales ou urbanistiques majeures un matériau clair devait être retenu, il est préférable que ce dernier soit grenailé ou bien présente un effet moucheté ou chiné permettant ainsi de limiter l'effet « aspect dégradé » trop rapidement. En outre, des matériaux non génériques risquent d'engendrer de nombreux problèmes d'entretien et de réparabilité. »

Pour réussir à conserver une densité humaine équivalente tout en proposant de plus nombreux espaces végétalisés, une des solutions peut être d'augmenter les coefficients d'occupations des sols ainsi que le prospect des rues.

Aujourd'hui Paris, avec une largeur de rue d'environ 15 m et une hauteur de bâtiment d'environ 30 m, a un prospect (H/W) de 2. La fraction minérale occupée par les bâtiments est de 0,5 et la part d'espaces végétalisés est de 17% (80% de ville et 3% de voies d'eau).

Nous proposons la modélisation des cas suivants :

- 25% d'espaces végétalisés, soit 72% d'espace minéral (environ 6 300 ha) avec une fraction minérale occupée par les bâtiments de 0,5 et une hauteur moyenne de bâtiment de 35m.
- 30% d'espaces végétalisés, soit 67% d'espace minéral (environ 5 800 ha) avec une fraction minérale occupée par les bâtiments de 0,5 et une hauteur moyenne de bâtiment de 38m.

Pour tenir compte également de l'influence des services techniques de la ville sur la voirie, nous proposons une troisième modélisation avec une voirie plus claire :

- 30% d'espaces végétalisés, soit 67% d'espace minéral (5 800 ha) avec une fraction minérale occupée par les bâtiments de 0,5 et une hauteur moyenne de 38m, et une voirie d'albédo à 0,5.

VI Résultats des simulations

Les modélisations mises en œuvre sont, comme nous venons de le voir, de deux natures. Des tests de sensibilité à différents critères de description de la surface urbaine et de son cadre bâti ont tout d'abord été effectués et des situations plus complexes en relation avec les quatre domaines d'actions identifiés précédemment ont par la suite été modélisées. Avant l'analyse des résultats des simulations, nous présentons le cadre de ces simulations, c'est-à-dire la situation climatique choisie pour les effectuer, les conditions initiales associées, ainsi que la forme des résultats.

VI.1 Cadre des simulations

VI.1.1 Situations climatiques choisies

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 à 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 (octas⁹²).

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

VI.1.1.a Une journée estivale

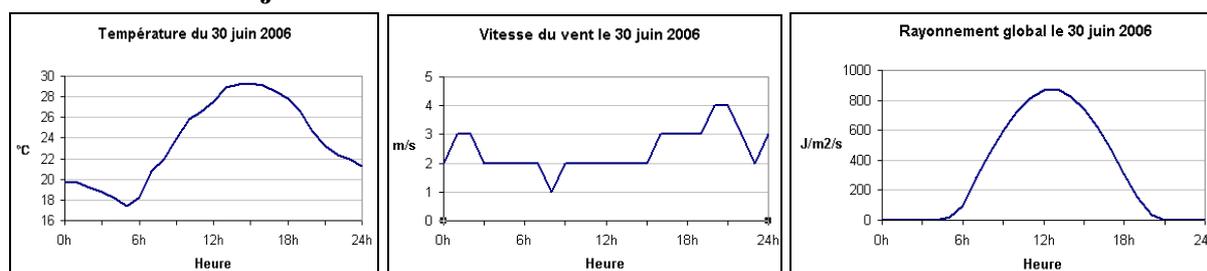


Figure 76 : Température (°C), vent (m/s) et rayonnement solaire ($J/m^2/s$) à la station Montsouris (Paris) le 30 juin 2006.

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 ci-dessous (figure 76).

⁹² Un octa représente 1/8^{ème} de la voûte céleste. Ainsi 8 octas équivaut à un ciel entièrement couvert.

VI.1.1.b 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 ci-dessous (figure 77).

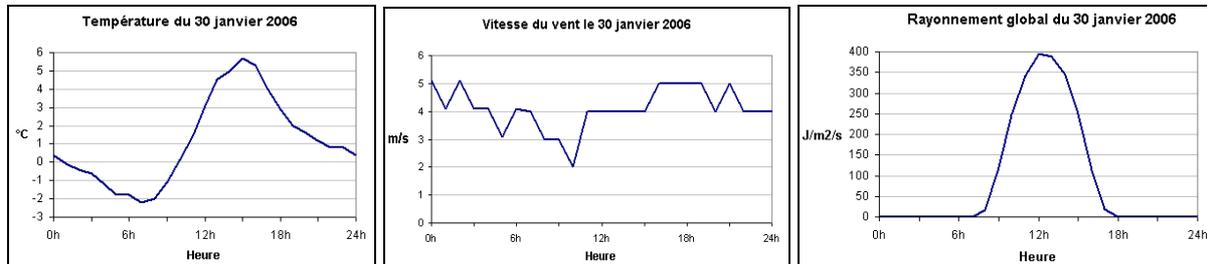


Figure 77 : Température (°C), vent (m/s) et rayonnement solaire (J/m²/s) à la station Montsouris (Paris) le 30 janvier 2006.

VI.1.2 Conditions initiales

Les conditions initiales concernent pour TEB les températures suivantes :

- des surfaces des murs, des routes et des toits,
- à l'intérieur du bâtiment,
- sous la route,
- à l'intérieur du sol végétalisé (couches de la surface, des racines et profonde),
- de la surface de l'eau.

Nos modélisations débutent de nuit, à minuit, c'est-à-dire qu'aucune surface n'est soumise au rayonnement solaire et donc à un réchauffement important. Le tableau 18 présente nos choix pour ces températures initiales.

Nous avons fixé à 18°C la température minimale à l'intérieur des bâtiments ainsi qu'à 18°C également la température correspondant au sous-sol (c'est-à-dire à plus de 2m10 de profondeur). Ce dernier chiffre est peut-être surestimé (en hiver notamment) mais une étude plus approfondie sur la situation de Paris aurait été nécessaire pour déterminer une valeur, ce qui n'était pas l'objet de notre étude. Il en est de même pour la température sous la route (supposée être celle à l'altitude 0m). Des simulations ont été effectuées pour tester l'importance des températures initiales. Après sept jours de simulations les différences

deviennent négligeables. Dans le cas, par exemple, de deux situations hivernales ayant des températures initiales les unes calculées comme expliqué au sein du tableau 18 et les autres avec 3°C de plus, les différences sont inférieures à 2 W.m⁻² ou inférieure à 3% des valeurs modélisées en ce qui concerne le bilan d'énergie.

Pour chacune de nos simulations, une semaine est donc simulée avant la journée qui nous concerne permettant ainsi de stabiliser le modèle.

Tableau 18 : Initialisation des températures pour les modélisations (Ta₁ est la température de l'air du premier pas de temps du forçage utilisé)

| Températures à initialiser | Initialisation |
|---|---|
| Températures de surface des murs, des routes et des toits | Ta ₁ |
| Température à l'intérieur du bâtiment | Ta ₁ ou 18°C si Ta ₁ < 18°C |
| Température sous la route | Moyenne de Ta ₁ et 18°C |
| Température pour le sol « naturel » | |
| Couche de surface (10cm) | Ta ₁ |
| Couche racinaire (2m) | Moyenne de Ta ₁ et 18°C |
| Couche profonde (3m) | 18°C (291,15 K) |
| Température de la surface de l'eau | Ta ₁ |

VI.1.3 Forme des résultats

A la différence de l'étude de Hamdi et Schayes (2008), qui ont utilisé le modèle FVM de Martilli (2001) et dont l'approche est similaire à la nôtre, nous n'avons pas effectué nos modélisations en couplage avec un modèle atmosphérique de méso-échelle mais avec un forçage atmosphérique. En plus de temps de calculs relativement plus courts, ce fonctionnement nous a permis d'effectuer nous-mêmes les modélisations (en cas de couplage, les calculs sont beaucoup plus longs et effectués par les services de Météo-France ou du CNRM). L'utilisation d'un forçage atmosphérique ne permet en revanche pas d'utiliser pour notre étude les résultats en température, celles-ci étant fortement liées au forçage (cf. annexe 9), l'étude des bilans énergétiques est cependant possible et instructive. En effet, ce type d'analyse, si elle ne permet pas une évaluation des températures permet, bien souvent, de mieux comprendre les mécanismes de formation de l'îlot de chaleur urbain et les mesures appropriées à mettre en œuvre pour en modifier l'intensité. Rizwan *et al.* (2008) le constate également : « *L'intensité de l'îlot de chaleur urbain est un bon indicateur pour évaluer l'importance de l'urbanisation d'une zone. Cependant, il éclaire peu sur la chaleur générée par les différentes sources de chaleur. Le bilan d'énergie de la surface, qui donne une idée de la chaleur générée et contenue au sein de la zone, peut aider à comprendre la chaleur générée par différentes sources* ».

Quelques études ont opté pour l'analyse des bilans d'énergie pour comparer différentes situations. Par exemple, Sasaki *et al.* (2008) se sont attachés dans leur étude à clarifier les caractéristiques du bilan énergétique de trois zones urbaines. Ils ont réalisé des modélisations des mesoclimats de trois villes japonaises situées sur la côte : Tokyo, Sendai et Haramachi. L'influence des caractéristiques régionales sur le climat urbain a été examinée en s'appuyant sur des modélisations et en considérant le bilan énergétique de la partie centrale de chaque ville. Sasaki *et al.* (2008) ont ainsi montré que d'une zone à l'autre, les facteurs (brise de mer, chaleur générée par les surfaces urbaines, chaleur d'origine anthropique) contribuant de façon conséquente à l'augmentation ou la diminution de la température étaient différents.

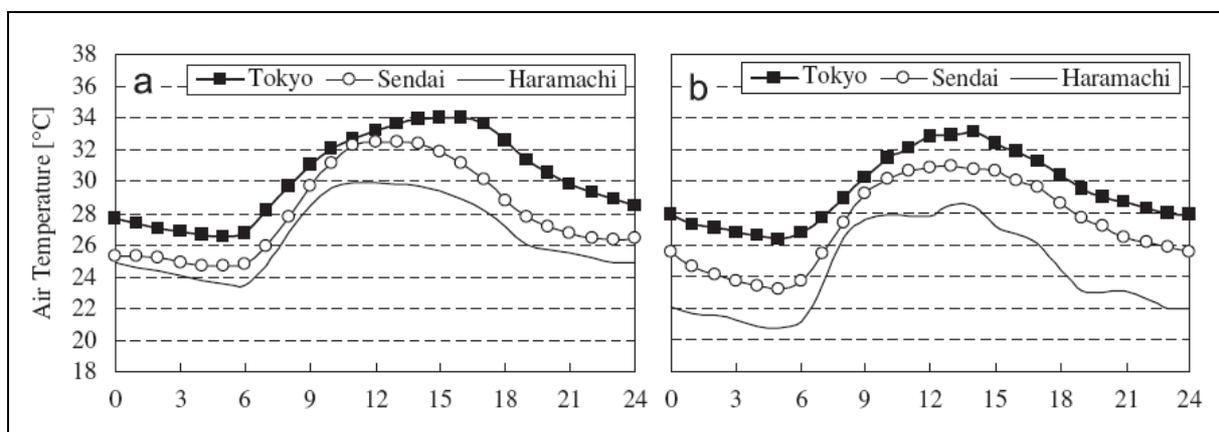


Figure 78 : Variations journalière de la température de l'air dans chaque ville (°C) (comparaison des résultats simulés avec les mesures) : (a) températures simulées et (b) températures mesurées (Sasaki *et al.*, 2008).

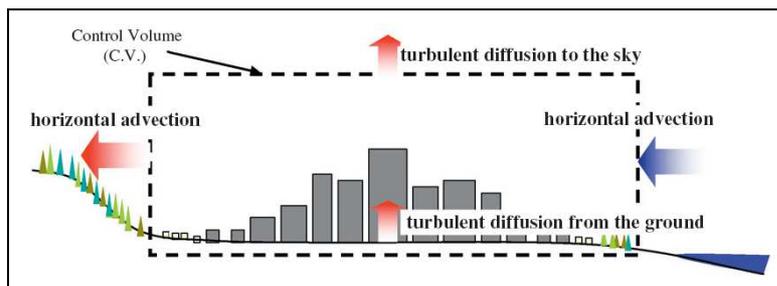


Figure 79 : Mécanisme du bilan d'énergie au sein du milieu urbain (Sasaki *et al.* (2008), d'après Murakami *et al.* (2003))

Sasaki *et al.* (2008) ont comparé les variations de température de l'air à 10 m pour une journée d'août entre les modélisations et les mesures (figure 78). Les mesures montrent que la température de l'air est maximale à 10h du matin à Haramachi, à 12h à Sendai et à 14h à Tokyo. Cette tendance est relativement bien reproduite par la modélisation. Sasaki *et al.* (2008) comparent également le bilan d'énergie moyen de chaque ville pour un volume de

contrôle (C.V.) (figures 79 et 80). Les flux de chaleur sensible issus du sol des parties centrales de Tokyo et de Sendai étaient plus importants que celui d'Haramachi. Les rejets de chaleur anthropique au sein du C.V. étaient plus importants dans Tokyo par rapport aux deux autres villes.

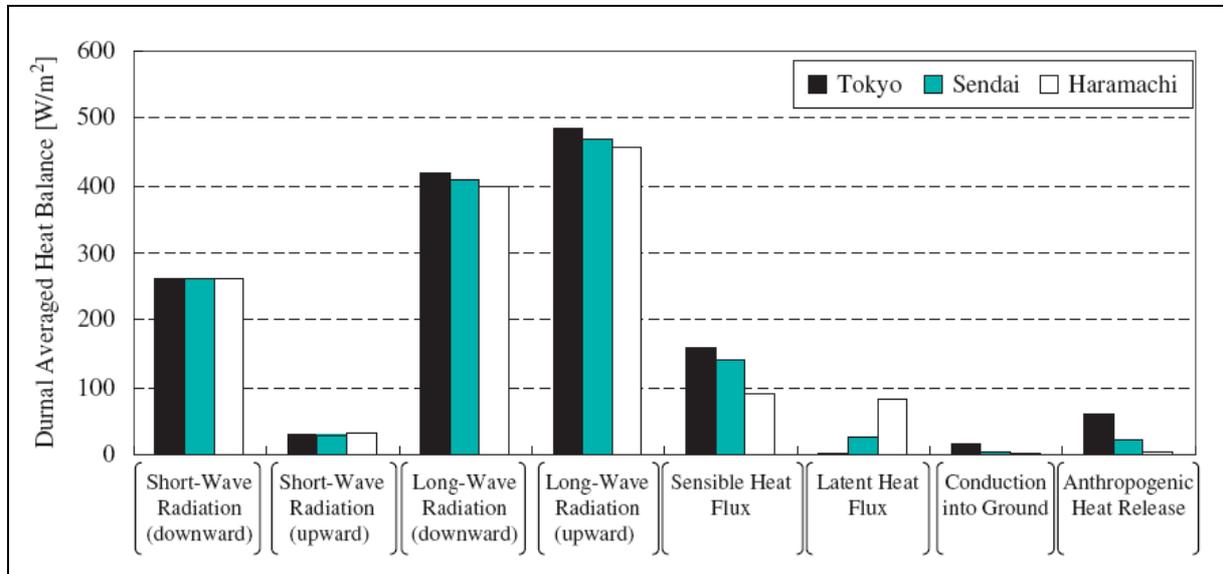


Figure 80 : Comparaison du bilan d'énergie au sol des trois villes (W/m^2) (Sasaki *et al.*, 2008).

Sasaki *et al.* (2008) ont également regardé les variations journalières du bilan de chaleur sensible (flux entrant-flux sortant) (figure 81) dans le C.V., cette chaleur étant échangée par advection, diffusion turbulente et rejet d'origine anthropique. Dans cette figure, les valeurs représentées par la courbe '*advection*' et la courbe '*turbulent diffusion*' indiquent le flux total de chaleur qui est échangé au travers des surfaces du C.V. par advection et diffusion turbulente respectivement. Les valeurs de la courbe '*anthropogenic heat release*' correspondent pour leur part au flux de chaleur sensible total généré par les sources de chaleur anthropique, c'est-à-dire les systèmes d'air conditionné, les automobiles, etc. et rejeté au sein du C.V. Les signes positif ou négatif indiquent si les flux de chaleur sont entrants ou sortants du C.V. Les valeurs négatives du bilan de chaleur sensible par advection apparaissent durant la journée pour ces trois villes montrant ainsi que la brise de mer venant de l'océan pacifique et l'influence de la brise de mer sur la température de l'air dans la partie centrale des villes étaient toutes deux significatives. Le bilan de chaleur sensible par diffusion turbulente a des valeurs positives dans les trois villes étudiées. Ces valeurs positives sont dues à la chaleur rejetée par le sol et les surfaces des bâtiments. Les valeurs positives et négatives du bilan de chaleur total indiquent que la température moyenne de l'air au-dessus du C.V. augmente ou

décroit respectivement (figures 78 et 81). Ainsi, les principaux facteurs qui gouvernent de façon importante l'augmentation et la diminution de la température de l'air sont mis en évidence par le biais de l'analyse du bilan d'énergie urbain.

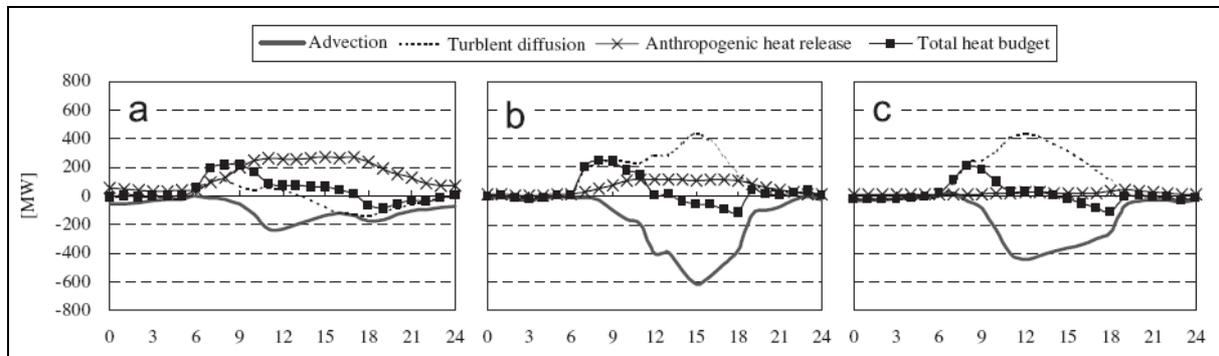


Figure 81 : Variations journalières du bilan de chaleur sensible du C.V. par advection, diffusion turbulente et rejet de chaleur anthropique, et bilan de chaleur total (inclus la chaleur entrante pour le C.V.) : (a) centre de Tokyo, (b) centre de Sendai et (c) centre de Haramachi.

Les résultats présentés ici s'appuient ainsi sur l'équation du bilan d'énergie modélisé par le modèle SURFEX qui comprend donc un module pour les milieux urbains uniquement minéraux (TEB), un module pour les espaces végétalisés (ISBA) et des modules pour les plans d'eau et la mer (pour Paris, le module pour la mer n'est bien sur pas utilisé).

Le flux de chaleur sensible (Q_H) et la variation de la quantité de chaleur stockée (ΔQ_S) sont les deux termes du bilan d'énergie les plus en lien avec l'augmentation de la température du milieu urbain et des matériaux. Ces deux flux sont influencés par le rayonnement net (Q^*) qui représente, entre autres, les gains solaires du milieu, et les flux de chaleur anthropique rejeté au sein du milieu.

Notre analyse s'appuie ainsi sur l'étude des courbes des différents flux et, plus particulièrement, des minima et des maxima, ainsi que sur l'étude des moyennes.

L'étude des moyennes des termes du bilan d'énergie nous permet de connaître le comportement énergétique moyen du milieu. Les minima, les maxima et, d'une manière générale, les courbes des différents flux durant la journée modélisée nous renseignent sur le comportement journalier des flux, sur les différences qu'il peut y avoir par exemple entre le jour et la nuit. Pour chaque flux, la moyenne ne permet pas de connaître l'amplitude des variations d'où l'importance de connaître également ces maxima et minima.

Avant de débuter notre présentation des résultats, quelques éléments restent à préciser.

Tout d'abord, d'une manière générale, la majorité des modélisations ne montre pas, les unes par rapport aux autres, de modifications du flux de chaleur latente. Sauf variations sensibles, nous ne présenterons donc pas les résultats concernant ce flux de chaleur latente.

Secondement, la présence de chauffage en hiver se perçoit principalement sur la moyenne de la variation de la quantité de chaleur stockée, toujours négative, qui signifie que le cadre bâti rejette plus de chaleur vers l'air extérieur qu'il n'en reçoit.

L'ensemble des résultats des simulations effectuées sont disponibles en annexe 13. Pour la présentation des résultats, nous reprenons l'ordre de présentation du chapitre précédent, tout en sachant que seuls les graphes des modélisations montrant de réelles modifications ont été insérés ici.

VI.2 Variation simple des paramètres de SURFEX

Nos premières modélisations constituent une étude de sensibilité du bilan d'énergie à la variation simple des paramètres de SURFEX, et notamment du schéma de surface TEB. Les paramètres modifiés concernent à la fois la couverture du sol, la structure urbaine et le tissu constructif, les paramètres radiatifs et thermiques des matériaux urbains, et les activités humaines (activités industrielles et transport).

VI.2.1 Couverture du sol

VI.2.1.a Fractions de villes et de végétation

Comparons pour les espaces végétalisés les deux situations extrêmes modélisées (0% et 50% d'espaces végétalisés). Entre les deux, on observe pour la journée du 30 juin 2006 (figure 82) une augmentation des maxima d'environ 48 W.m^{-2} (soit environ 10%) pour le rayonnement net, d'environ 92 W.m^{-2} (soit environ 13%) pour le flux de chaleur sensible, et une diminution d'environ 75 W.m^{-2} (soit environ 25%) du flux de chaleur stockée. La figure permet de comparer les moyennes des différents flux du bilan d'énergie pour 'Paris' et trois des situations modélisées.

Les variations des moyennes pour la journée du 30 janvier 2006 sont, comme nous pouvons le constater sur la figure 83, légèrement plus conséquentes que pour la journée estivale du 30 juin 2006. Les différences des maxima entre les deux situations extrêmes modélisées (0% et 50% d'espaces végétalisés) sont en revanche plus faibles en absolue, avec une augmentation d'environ 8 W.m^{-2} (soit environ 4%) pour le rayonnement net, une diminution d'environ 47

$W.m^{-2}$ (soit environ 27%) pour le flux de chaleur sensible, et une augmentation d'environ 17 $W.m^{-2}$ (soit environ 36%) du flux de chaleur stockée.

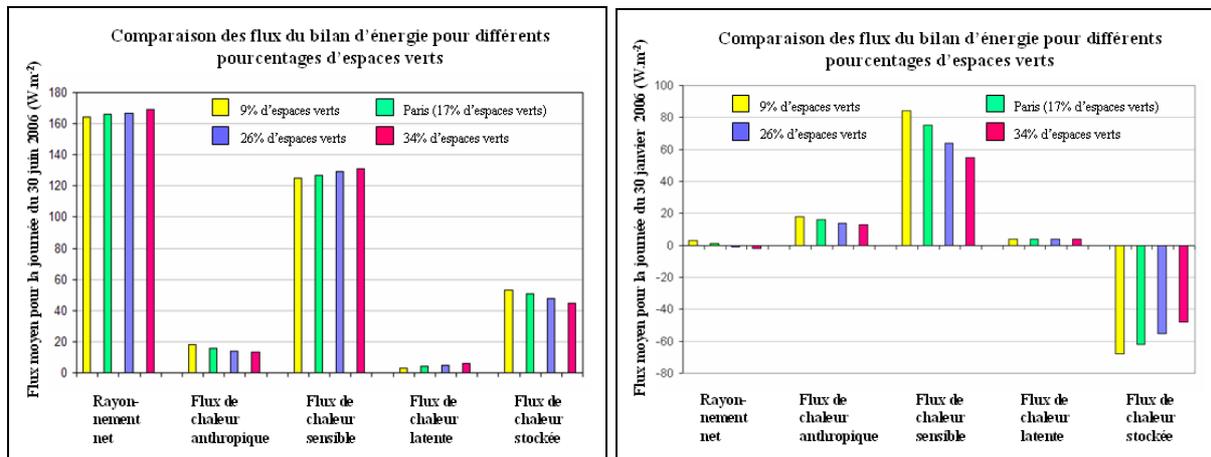


Figure 82 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour différents pourcentages d'espaces végétalisés le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006.

Les résultats de ces différentes modélisations s'expliquent en partie par les conditions initiales choisies pour notre sol. Nous avons en effet considéré un sol en stress hydrique dans les deux situations, ce qui ne permet pas aux plantes d'évaporer et de jouer leur rôle de régulateur thermique. Cela se constate notamment par les très faibles modifications du flux de chaleur latente. Ces résultats confirment que des espaces végétalisés non arrosés peuvent ainsi avoir l'effet inverse de celui espéré, à savoir un rafraîchissement.

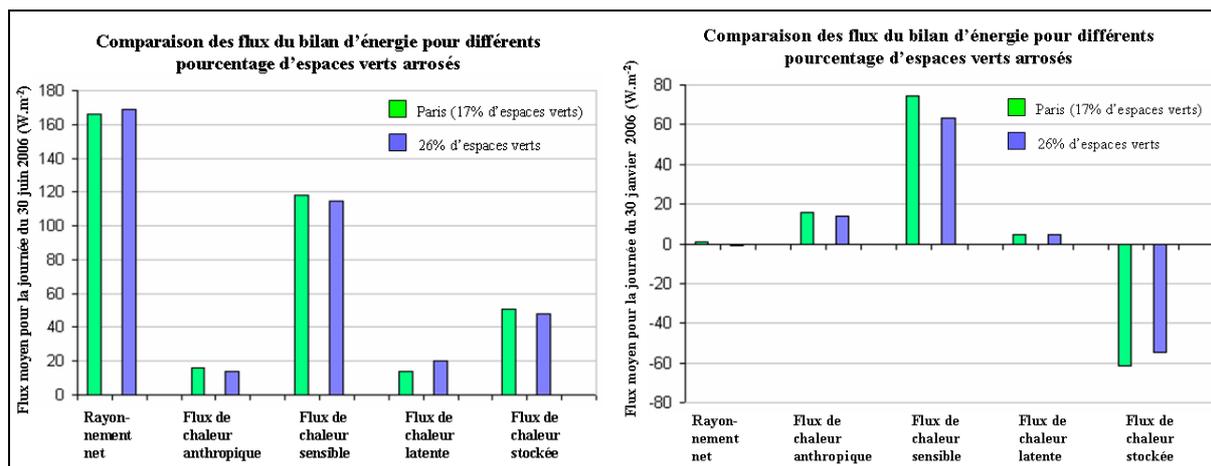


Figure 83 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour différents pourcentages d'espaces végétalisés arrosés pour la journée du 30 juin 2006.

Quatre autres modélisations avec, en conditions initiales, des espaces végétalisés arrosés de temps en temps, c'est-à-dire avec un sol ayant des réserves d'eau, ont été effectuées pour Paris

et la situation avec 26% d'espaces végétalisés, en janvier et juin 2006 (figure 83). Ont également été lancées quatre autres modélisations correspondant à des situations de sols avec de grandes réserves d'eau, ce qui peut correspondre à un parc arrosé tous les jours ou à des situations typiques de fin d'automne, d'hiver et début de printemps, même sans arrosage (figure 84). On observe alors bien une diminution du flux de chaleur sensible et une augmentation du flux de chaleur latente.

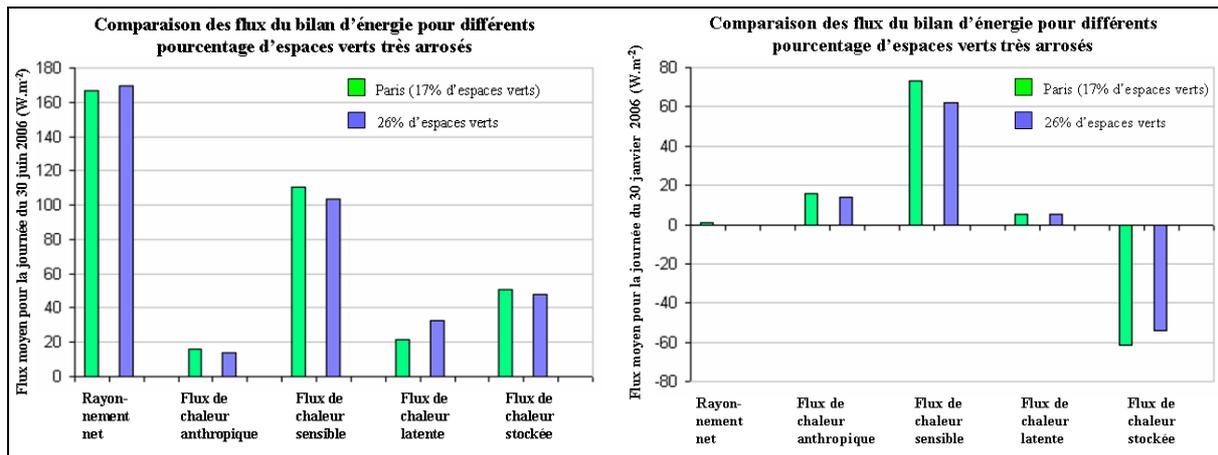


Figure 84 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour différents pourcentages d'espaces végétalisés très arrosés pour la journée du 30 juin 2006.

VI.2.1.b Fractions de villes et d'eau

Pour la situation estivale, entre 0% de surface d'eau et 20% de surface d'eau, nous observons au niveau des maxima une augmentation d'environ $50 W \cdot m^{-2}$ (soit environ 10%) du rayonnement net, une diminution d'environ $44 W \cdot m^{-2}$ (soit environ 15%) du flux de chaleur sensible et une augmentation de $96 W \cdot m^{-2}$ (soit environ 14%) du flux de chaleur stockée. La figure 85 permet de comparer les moyennes des différents flux du bilan d'énergie pour 'Paris' et trois des situations modélisées. L'eau, du fait de son très faible albédo absorbe plus de rayonnement solaire (notamment vers midi) ce qui se traduit par une diminution du rayonnement net et une augmentation du flux de chaleur stockée.

Les variations des moyennes pour la journée du 30 janvier 2006 sont, comme nous pouvons le constater sur la figure 85, légèrement plus faibles que pour la journée estivale du 30 juin 2006. Les différences entre les maxima des différents flux du bilan d'énergie pour 'Paris' et les cinq situations modélisées restent également faibles et inférieures à $31 W \cdot m^{-2}$.

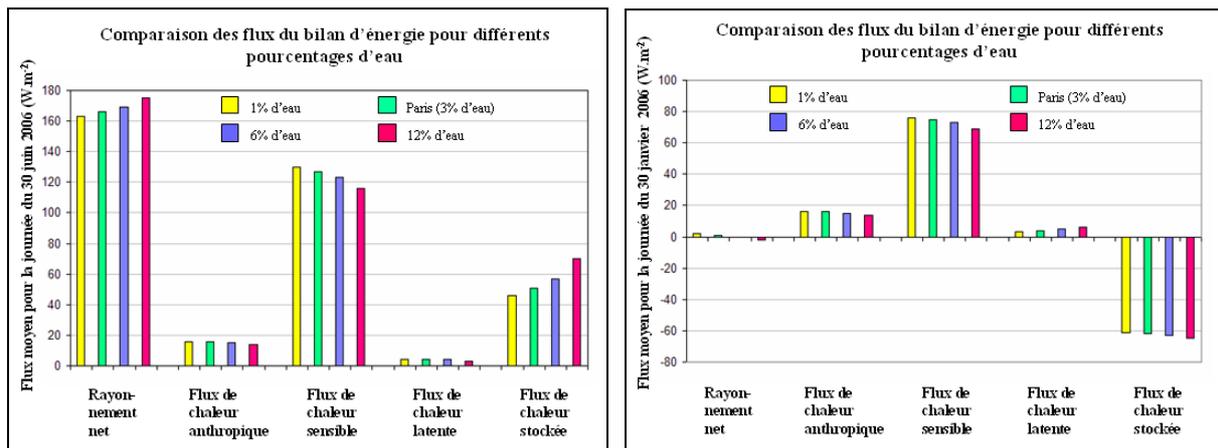


Figure 85 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différents pourcentages d'eau le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006.

VI.2.2 Structure urbaine et tissu constructif

VI.2.2.a Largeur moyenne des rues

Pour la journée du 30 juin 2006, en ce qui concerne la largeur des rues, les deux situations extrêmes modélisées (largeur de 10m et largeur de 60m) sont relativement différentes en termes de maxima. Entre les deux situations, on observe pour les maxima une augmentation d'environ 81 W.m^{-2} (soit environ 16%) pour le rayonnement net, et d'environ 76 W.m^{-2} (soit environ 28%) pour le flux de chaleur sensible. La différence entre les flux de chaleur stockée est pour sa part très faible puisque, pour les maxima, elle est de seulement environ 6 W.m^{-2} (en faveur de la largeur de 60m). La figure 86 permet de comparer les moyennes des différents flux du bilan d'énergie pour 'Paris' et trois des situations modélisées. Globalement, nous pouvons en conclure que, dans le cas présent, une augmentation de la largeur des rues entraînent une augmentation de la chaleur au sein du milieu urbain, ce qui peut s'expliquer par le fait que les murs et la voirie, en asphalte, sont soumis à un rayonnement solaire plus important ou/et par le fait que le canyon génère des densités de flux de chaleur plus importants que les toits des bâtiments.

Les variations des moyennes pour la journée du 30 janvier 2006 sont, comme nous pouvons le constater sur la figure 86, légèrement plus conséquentes que pour la journée estivale du 30 juin 2006. Les différences des maxima entre les deux situations extrêmes modélisées (largeur de rues de 10m et de 60m) sont en revanche plus faibles en absolue, avec une augmentation d'environ 25 W.m^{-2} (soit environ 7%) pour le rayonnement net, une diminution d'environ 36 W.m^{-2} (soit environ 21%) pour le flux de chaleur sensible, et une augmentation d'environ 49 W.m^{-2} (soit environ 78%) du flux de chaleur stockée.

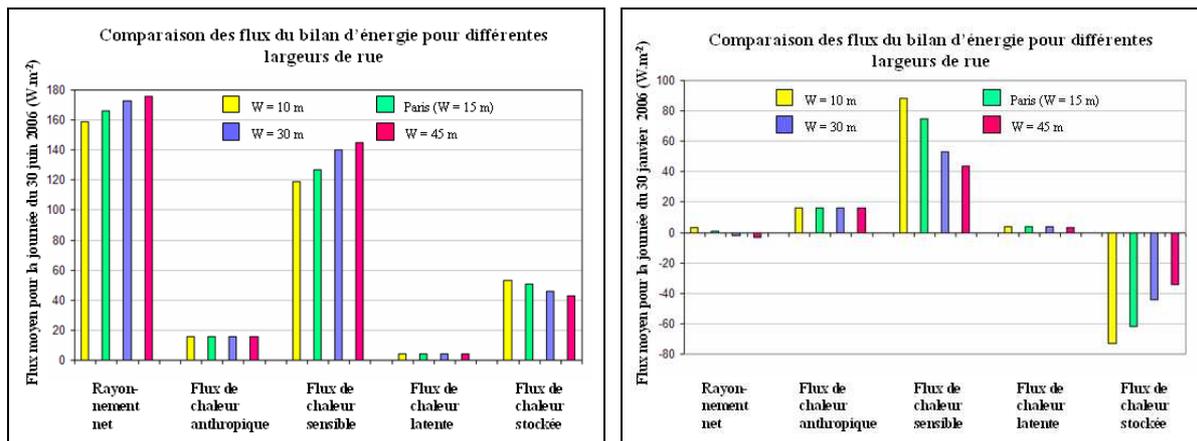


Figure 86 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différentes largeurs de rues le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006.

Cette évolution hivernale selon les différentes largeurs de rue (faible variation du rayonnement net et fortes variations des flux de chaleur sensible et stockée) nous apprend qu'en hiver ce sont principalement les bâtiments qui gèrent et influencent les flux de chaleur sensible ou stockée. En effet, la variation de la largeur des rues entraîne une variation de la proportion de bâtiments et de voirie et une variation des pertes de chaleurs des bâtiments. Avec l'augmentation de la largeur des rues, la part de bâtiments diminue et le flux de chaleur sensible et la variation négative de la quantité de chaleur stockée diminuent de ce fait.

VI.2.2.b Hauteur des bâtiments

Pour les hauteurs, durant la journée estivale, la situation avec une hauteur moyenne des bâtiments de 100 m, en plus de modifier minima et maxima des différents flux, modifie également le comportement de ces différents flux durant la journée et plus particulièrement celui du flux de chaleur sensible. En effet, ce dernier est en diminution lors des premières heures suite au lever du soleil, ce qui s'explique principalement par le fait que le soleil n'a pu encore réchauffer que le haut des murs des immeubles des rues et que la température de l'air en se réchauffant se rapproche de celle des murs diminuant ainsi l'échange de chaleur. Si l'on compare les maxima des deux bilans d'énergie pour une hauteur de bâtiments de 5 m et de 100 m, on obtient de l'un à l'autre une augmentation d'environ 42 W.m^{-2} (soit environ 12%) pour le rayonnement net, une diminution d'environ 169 W.m^{-2} (soit environ 50 %) pour le flux de chaleur sensible, et une augmentation d'environ 205 W.m^{-2} (soit environ 205%) du flux de chaleur stockée. La figure 87 permet de comparer les moyennes des différents flux du bilan d'énergie pour 'Paris' et trois des situations modélisées. Plus les hauteurs du canyon

s'agrandissent, plus le flux de chaleur sensible diminue et plus le flux de chaleur stockée augmente. Le rayonnement net varie pour sa part faiblement.

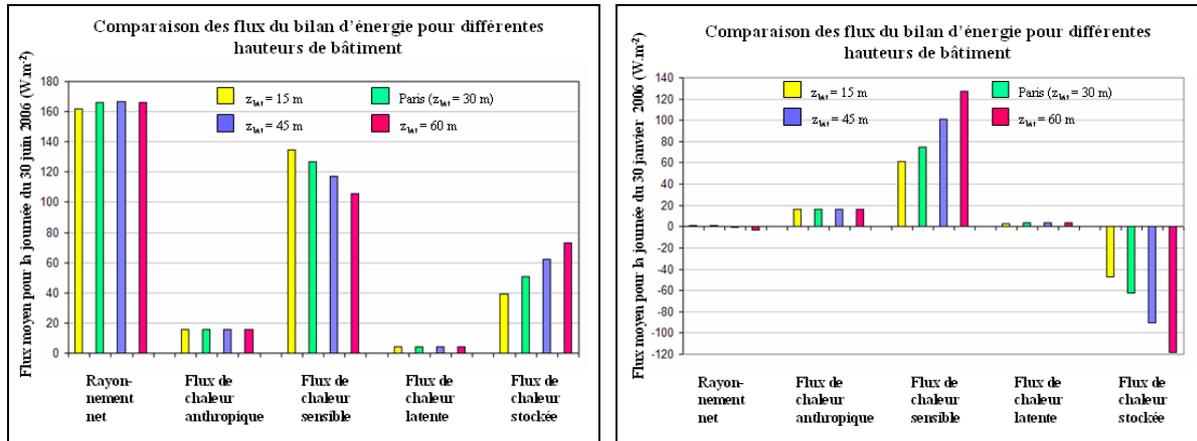


Figure 87 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différentes hauteurs de bâtiments le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006.

Les variations des moyennes pour la journée du 30 janvier 2006 sont, comme nous pouvons le constater sur la figure 87, légèrement plus conséquentes que pour la journée estivale du 30 juin 2006. Les différences des maxima entre les deux situations extrêmes modélisées (hauteur de 5m et de 100m) sont inférieures à 25 W.m^{-2} pour le rayonnement net et le flux de chaleur stockée mais atteint 162 W.m^{-2} pour le flux de chaleur sensible, ce qui donne une augmentation d'environ 122% entre 5m et 100m de hauteur.

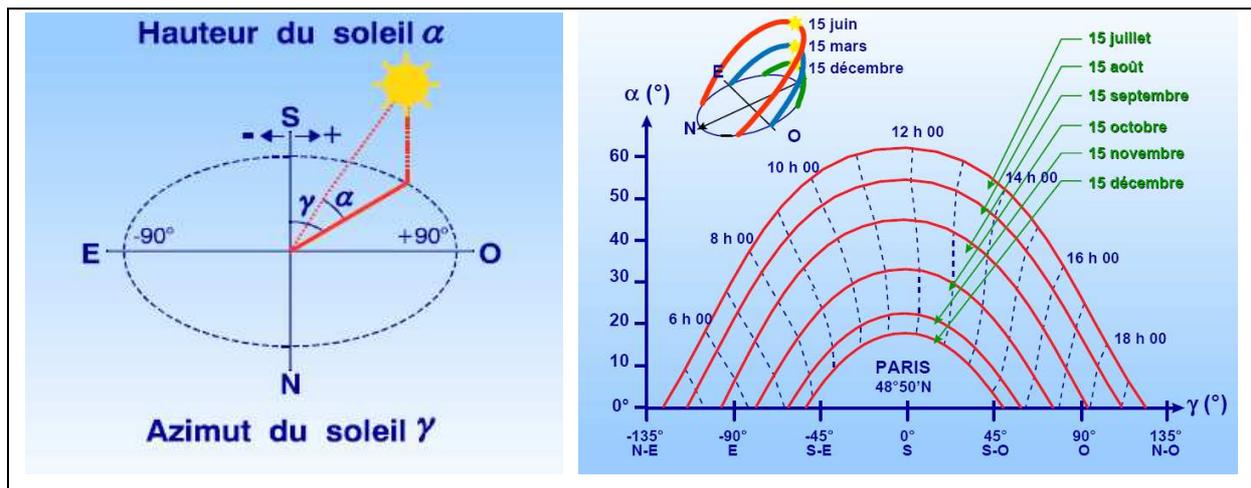


Figure 88 : Coordonnées solaires et courbes solaires en projection cylindrique (Paris). (Liebard et De Herde, 2006).

Les modélisations lors de la journée hivernale sont plus influencées par la part de surfaces de murs et de toits susceptibles de restituer de la chaleur due au chauffage des bâtiments qu'aux

modifications du piégeage radiatif. Il est vrai que le rayonnement solaire est plus faible et que sa hauteur angulaire moins importante en hiver qu'en été. Le bas des rues est donc moins susceptible d'être atteint par les rayons du soleil (figure 88).

Le soleil suit une course dont chaque point est déterminé, en un lieu, par sa hauteur angulaire et son azimut. Cette hauteur est maximale au solstice d'été et minimale au solstice d'hiver.

VI.2.2.c Profondeur des bâtiments

Les modifications de la profondeur des bâtiments ne changent pas en soi le prospect du canyon (H/W) mais seulement le pourcentage dévolu à la surface de toits par rapport aux surfaces de murs et de routes. Les variations du bilan d'énergie sont donc dues au fait que toit et « intérieur » du canyon se comportent différemment et ont leur proportion qui varie d'une situation à l'autre.

Ainsi, pour la journée du 30 juin 2006, entre une profondeur de bâtiment de 10 m et une profondeur de 60 m, on a pour les maxima une diminution d'environ 115 W.m^{-2} (soit environ 19%) pour le rayonnement net, une augmentation d'environ 43 W.m^{-2} (soit environ 15%) pour le flux de chaleur sensible, et une diminution d'environ 160 W.m^{-2} (soit environ 48%) du flux de chaleur stockée. La figure 89 permet de comparer les moyennes des différents flux du bilan d'énergie pour 'Paris' et trois des situations modélisées. Nous pouvons constater que l'augmentation de la profondeur des toits a surtout pour conséquence une diminution du rayonnement net (l'albédo des toits est plus élevé que celui du canyon), qui se retrouve principalement au niveau du flux de chaleur stockée, qui diminue également.

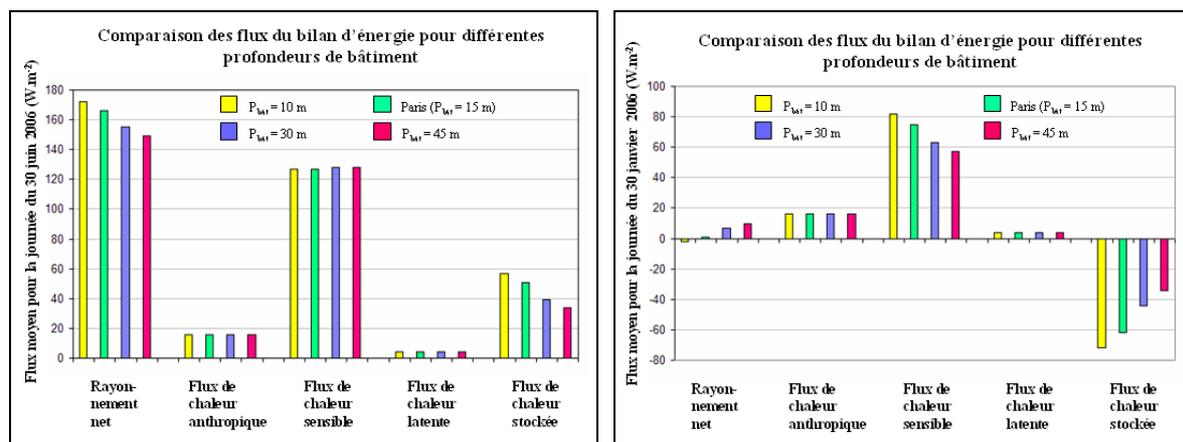


Figure 89 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différentes profondeurs de bâtiments le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006.

Les variations des moyennes pour la journée du 30 janvier 2006 sont, comme nous pouvons le constater sur la figure 89, légèrement plus conséquentes que pour la journée estivale du 30 juin 2006. En ce qui concerne les maxima, entre une profondeur de bâtiment de 10 m et une profondeur de 60 m, nous observons une diminution d'environ 33 W.m^{-2} (soit environ 16%) pour le rayonnement net, une diminution d'environ 6 W.m^{-2} (soit environ 4%) pour le flux de chaleur sensible, et une diminution d'environ 37 W.m^{-2} (soit environ 51%) du flux de chaleur stockée.

Comme précédemment, le comportement hivernal est surtout influencé par le comportement thermique des surfaces et leurs proportions respectives. L'augmentation dans le cas présent de la proportion de surface de toits par rapport aux autres surfaces se perçoit par une perte de chaleur moindre (diminution du flux de chaleur sensible et un flux de chaleur stockée plus proche de zéro), d'une part car les toits sont mieux isolés que les murs, mais également parce que la surface d'échange entre le bâtiment et l'air extérieur diminue (la compacité du bâtiment augmente).

VI.2.3 Paramètres radiatifs et thermiques des matériaux urbains

VI.2.3.a Isolation des toits

Lors de la modélisation des effets des modifications de l'isolation des toits durant la journée du 30 juin 2006, seule la situation extrême modélisant des toits ne présentant aucune isolation entraîne des variations notables par rapport à 'Paris'. En effet, si le rayonnement net varie de moins de 2 W.m^{-2} entre les deux situations, l'absence d'isolation entraîne une diminution du maximum de flux de chaleur sensible d'environ 32 W.m^{-2} , et une augmentation du maximum de flux de chaleur stockée d'environ 33 W.m^{-2} , ce qui a sans doute une incidence sur l'ambiance intérieure du bâtiment. En excluant cette situation extrême, les modifications de l'isolation des toits ont entraîné des écarts entre les maxima des différentes situations modélisées de moins de 2 W.m^{-2} pour le rayonnement net, de moins de 6 W.m^{-2} pour le flux de chaleur sensible et le flux de chaleur stockée. La variation des moyennes et des minima entre les différentes situations est plus faible que pour les maxima.

Lors de la modélisation des modifications de l'isolation des toits durant la journée du 30 janvier 2006, c'est également la même chose que lors de la situation estivale : seule la situation extrême modélisant des toits ne possédant aucune isolation entraîne des variations notables par rapport à 'Paris'. L'absence d'isolation entraîne une augmentation du maximum de flux de chaleur sensible d'environ 15 W.m^{-2} , et une diminution du maximum de flux de

chaleur stockée d'environ 10 W.m^{-2} . En excluant cette situation extrême, les modifications de l'isolation des toits ont entraîné des écarts entre les maxima, les minima et les moyennes des différentes situations modélisées de moins de 1 W.m^{-2} pour le rayonnement net, de moins de 5 W.m^{-2} pour le flux de chaleur sensible et le flux de chaleur stockée. D'une manière générale, les simulations montrent quand même une diminution des pertes de chaleur du cadre bâti avec l'amélioration de l'isolation du toit (diminution du flux de chaleur sensible moyen, et légère diminution en valeur absolue de la valeur négative moyenne de la variation de la quantité de chaleur stockée).

Nous noterons également que l'évolution entre les situations estivales et les situations hivernales sont inverses. En effet, l'amélioration de l'isolation entraîne, même succinctement, une augmentation du flux de chaleur sensible et une diminution de la variation (positive) de la quantité de chaleur stockée en été, et une diminution du flux de chaleur sensible et une diminution de la variation (négative) de la quantité de chaleur stockée en hiver. Cela montre que l'isolation intervient en été en évitant un stockage de chaleur qui peut augmenter la température intérieure du bâtiment, et en hiver en évitant de trop grosses pertes de chaleur.

VI.2.3.b Inertie des toits

Lors de la modélisation des effets des modifications de l'inertie des toits durant la journée du 30 juin 2006, les différences entre les différentes situations sont inférieures à 6 W.m^{-2} pour les maxima, les minima et les moyennes de l'ensemble des flux du bilan d'énergie. Même si elle est très faible, la tendance avec l'augmentation de l'inertie est, durant la situation estivale, une diminution du flux de chaleur sensible et à une augmentation de la variation (positive) de la quantité de chaleur stockée.

Lors de la modélisation des effets des modifications de l'inertie des toits durant la journée du 30 janvier 2006, les différences entre les différentes situations sont inférieures à 3 W.m^{-2} pour les maxima, les minima et les moyennes de l'ensemble des flux du bilan d'énergie. La tendance avec l'augmentation de l'inertie est identique à celle de la situation estivale, c'est à dire une diminution du flux de chaleur sensible et à une diminution de la variation (négative) de la quantité de chaleur stockée (l'inertie limite a priori la perte de chaleur).

VI.2.3.c Albédo des toits

Pour la journée du 30 juin 2006, en ce qui concerne l'albédo des toits, les deux situations extrêmes modélisées (albédo de 0,05 et de 1) sont très différentes en termes de maxima. Entre les deux situations, nous observons ainsi pour les maxima une augmentation d'environ 301

$W.m^{-2}$ (soit environ 42%) pour le rayonnement net, et d'environ $298 W.m^{-2}$ (soit environ 63%) pour le flux de chaleur sensible. La différence entre les maxima des flux de chaleur stockée est pour sa part nulle. La figure 90 permet de comparer les moyennes des différents flux du bilan d'énergie pour 'Paris' et trois des situations modélisées. Nous pouvons clairement observer un réchauffement moindre du milieu avec une augmentation de l'albédo (diminution du rayonnement net et du flux de chaleur sensible).

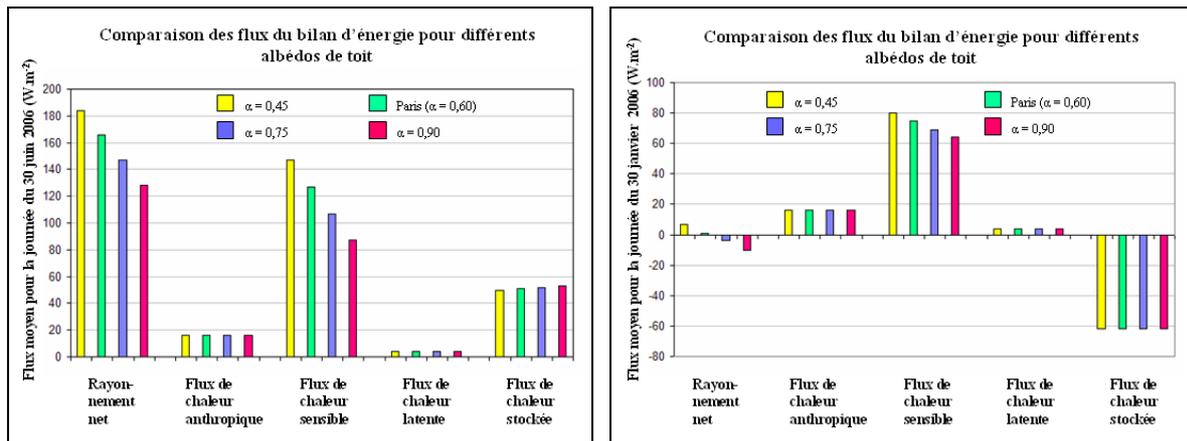


Figure 90 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différents albédos de toit le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006.

Les variations des moyennes des flux durant la journée du 30 janvier 2006 (figure 90) sont plus faibles en valeurs absolues. En ce qui concerne la différence des maxima, nous observons entre les deux extrêmes (albédo de 0,05 et de 1) une diminution de $139 W.m^{-2}$ (soit environ 49%) pour le rayonnement net, et d'environ $127 W.m^{-2}$ (soit environ 54%) pour le flux de chaleur sensible. La variation du maximum du flux de chaleur stockée est d'environ $3W.m^{-2}$.

Par comparaison avec la situation estivale, nous pouvons donc constater qu'en valeur absolue l'incidence est plus faible. Dans les deux cas, hiver et été, le rayonnement net diminue (plus de rayonnement solaire réfléchi vers l'atmosphère) ce qui signifie que la ville perd en gain énergétique avec l'augmentation de l'albédo.

VI.2.3.d Émissivité des toits

En ce qui concerne l'émissivité des toits, les différences entre les deux situations extrêmes durant la journée estivale (émissivité de 0,05 et émissivité de 1) sont moins conséquentes que pour la modification de l'albédo. Nous observons ainsi, entre la situation à très faible émissivité et la situation à forte émissivité, une diminution du maximum d'environ $62 W.m^{-2}$ (soit environ 10%) du rayonnement net, une diminution d'environ $65 W.m^{-2}$ (soit environ

20%) du flux de chaleur sensible. Les autres flux restent très proches. La figure 91 permet de comparer les moyennes des différents flux du bilan d'énergie pour 'Paris' et trois des situations modélisées. L'augmentation de l'émissivité des toits entraînent logiquement une diminution du rayonnement net (augmentation du rayonnement de grande longueur d'onde émis par le sol) qui se traduit par une diminution du flux de chaleur sensible.

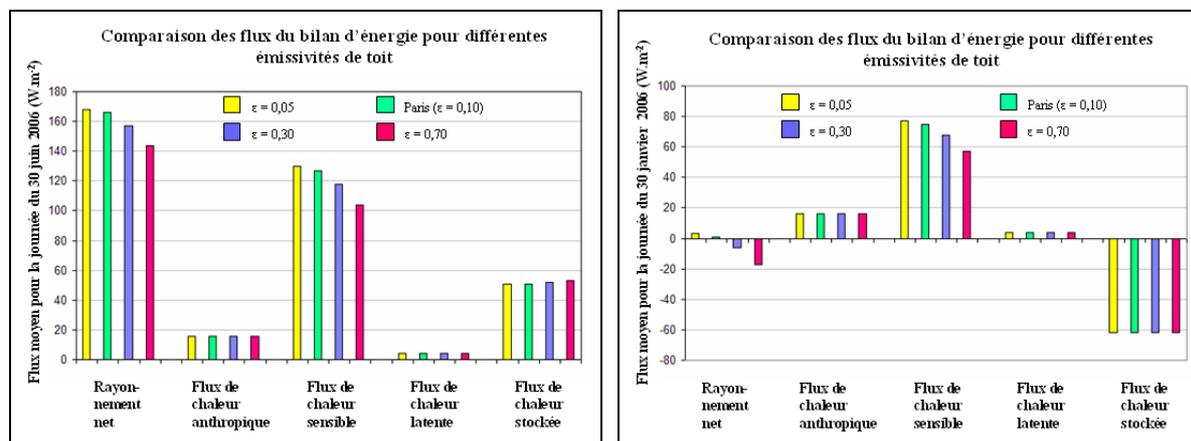


Figure 91 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différentes émissivités de toit le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006.

Les variations des moyennes durant la journée hivernale sont légèrement plus faibles que pour la journée estivale. En ce qui concerne la différence des maxima, nous observons entre les deux extrêmes (émissivité de 0,05 et de 1) une diminution de 38 W.m^{-2} (soit environ 19%) pour le rayonnement net, et d'environ 44 W.m^{-2} (soit environ 28%) pour le flux de chaleur sensible. La variation du maximum de flux de chaleur stockée est d'environ 1 W.m^{-2} .

De même que pour la journée estivale, l'augmentation de l'émissivité des toits entraîne une diminution du rayonnement net (augmentation du rayonnement de grande longueur d'onde mis par le sol) qui se traduit par une diminution du flux de chaleur sensible.

VI.2.3.e Type de toits

La comparaison entre 'Paris' avec ses toits en zinc et les situations avec 100% de toits en tuiles et 100% de toitures-terrasses montrent également des bilans d'énergie relativement proche. Durant la journée du 30 juin 2006, les modifications les plus importantes ont lieu avec les toits en tuile pour lesquels on observe par rapport à 'Paris' et pour les maxima une augmentation d'environ 72 W.m^{-2} (soit environ 14%) du rayonnement net, une augmentation d'environ 42 W.m^{-2} (soit environ 15%) du flux de chaleur sensible, et une augmentation d'environ 38 W.m^{-2} (soit environ 14%) de la variation de la quantité de chaleur stockée. La

figure 92 permet de comparer les moyennes des différents flux du bilan d'énergie pour 'Paris', et les deux situations avec toits en tuile et toitures-terrasses.

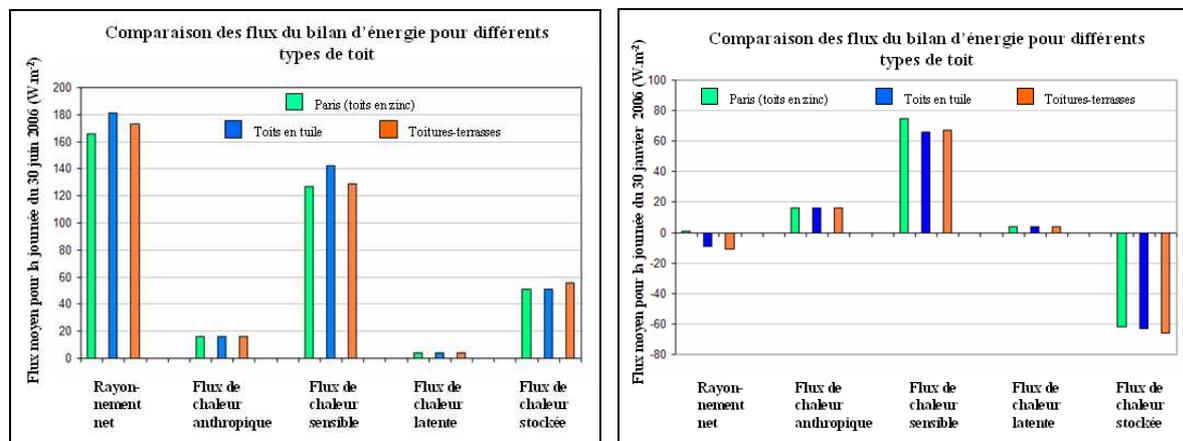


Figure 92 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et ses toits en zinc et les modélisations avec différents types de toit (tuiles ou terrasses) le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006.

Les modifications sont également peu élevées lors de la journée du 30 janvier 2006 et c'est également entre 'Paris' et le cas avec les toits en tuile que les plus grandes différences sont observées. Ces différences entre 'Paris' et les toits en tuile sont pour les maxima de 33 W.m^{-2} (soit environ 17%) pour le rayonnement net, de -8 W.m^{-2} (soit environ -5%) pour le flux de chaleur sensible et de 36 W.m^{-2} (soit environ 48%) pour le flux de chaleur stockée.

VI.2.3.f Isolation des murs

Pour les modélisations durant la journée du 30 juin 2006, la modification de l'isolation des murs n'entraînent pas de grandes variations. Les différences entre les différentes situations sont inférieures à 6 W.m^{-2} pour les maxima, les minima et les moyennes de l'ensemble des flux du bilan d'énergie.

La situation est différente pour les modélisations durant la journée du 30 janvier 2006 (figure 93). L'isolation des murs entraîne une diminution des pertes de chaleur qui se retrouve par une diminution du flux de chaleur sensible et une diminution de la valeur absolue du flux de chaleur stockée. Les différences entre Paris et le cas extrême modélisé ($R_{th} = 5,37 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$), peu différent par ailleurs du cas représenté au sein de la figure 93 avec $R_{th} = 3,70 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$, montrent entre les deux cas une augmentation très faible du maximum de rayonnement net (3 W.m^{-2}), une diminution du maximum de flux de chaleur sensible de 54 W.m^{-2} (soit environ 34%) et une augmentation du maximum de flux de chaleur stockée de 54 W.m^{-2} (soit environ 72%).

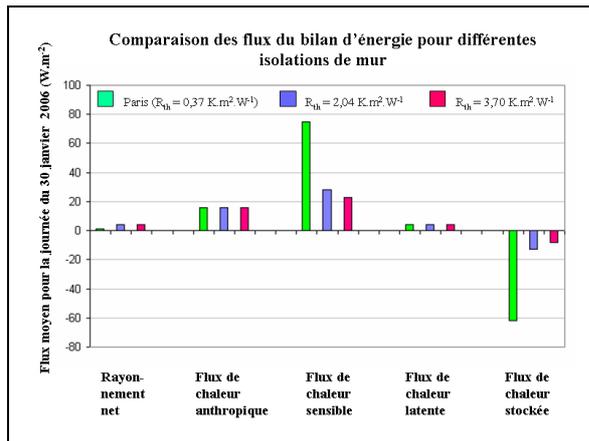


Figure 93 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différentes isolations des murs le 30 janvier 2006.

VI.2.3.g Inertie des murs

En ce qui concerne les effets des modifications de l'inertie des murs durant la journée du 30 juin 2006, seule la situation extrême modélisant des murs ne possédant aucune inertie entraîne des variations notables par rapport à 'Paris'. En effet, si le rayonnement net varie de moins de 6 W.m^{-2} entre les deux situations, l'absence d'inertie entraîne une augmentation du maximum de flux de chaleur sensible d'environ 64 W.m^{-2} , et une diminution du maximum du flux de chaleur stockée d'environ 63 W.m^{-2} . En excluant cette situation extrême, les modifications de l'inertie des murs ont entraîné des écarts entre les maxima, les minima et les moyennes des différentes situations modélisées de moins de 2 W.m^{-2} pour le rayonnement net, de moins de 26 W.m^{-2} pour le flux de chaleur sensible et le flux de chaleur stockée.

Lors de la modélisation des effets des modifications de l'inertie des murs durant la journée du 30 janvier 2006, la situation modélisant l'absence d'inertie entraîne une variation à l'inverse de ce qui est observé avec les autres modélisations, c'est notamment une diminution du maxima du flux de chaleur stockée et une augmentation de son minima. Les différentes simulations concernant l'inertie effectuées pour les toits, ne montrent pas la même particularité de ce cas extrême, nous supposons donc que le comportement observé ici est lié à la combinaison d'une isolation très faible et d'une absence d'inertie. Excepté ce cas extrême, les différentes simulations montrent des différences entre les maxima, les minima et les moyennes des différents flux du bilan d'énergie inférieures à 8 W.m^{-2} .

VI.2.3.h Albédo des murs

Pour la modélisation, durant la journée du 30 janvier 2006, des modifications de l'albédo des murs, hormis le maximum du rayonnement net qui varie entre 150 et 213 W.m^{-2}

(respectivement pour un albédo de 0,95 et de 0,05), et le maximum du flux de chaleur sensible qui varie entre 132 et 169 W.m^{-2} , les variations entre minima, maxima et moyennes sont toutes inférieures à 16 W.m^{-2} .

Les variations des moyennes sont plus importantes en valeurs absolues durant la journée estivale (figure 94), ce qui s'explique notamment par le fait que le rayonnement solaire est beaucoup plus important que lors de la journée hivernale du 30 janvier, et le soleil plus haut dans le ciel. La différence se traduit aussi au niveau des maxima. D'un albédo de 0,05 à un albédo de 0,95, le rayonnement net diminue de 106 W.m^{-2} (soit environ 19%), le flux de chaleur sensible de 67 W.m^{-2} (soit environ 22%) et le flux de chaleur stockée de 41 W.m^{-2} (soit environ 15%).

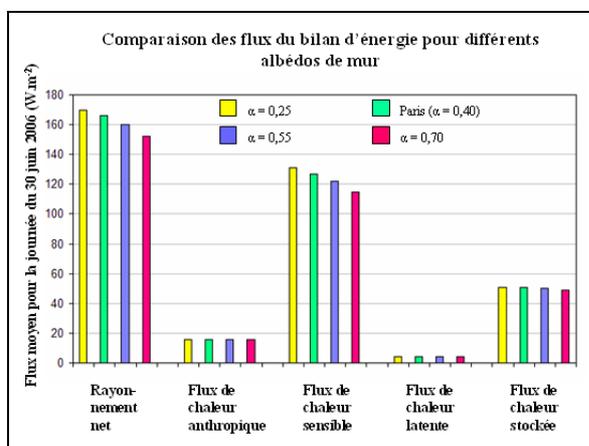


Figure 94 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différents albédos de murs le 30 juin 2006.

VI.2.3.i Émissivité des murs

En ce qui concerne l'émissivité des murs, les différences entre les deux situations extrêmes (émissivité de 0,05 et émissivité de 1) sont relativement faibles durant la journée du 30 juin 2006. Nous observons ainsi, au niveau des maxima, entre la situation à très faible émissivité et la situation à forte émissivité, une diminution d'environ 107 W.m^{-2} (soit environ 20%) du rayonnement net, une diminution d'environ 67 W.m^{-2} (soit environ 22%) du flux de chaleur sensible et une diminution d'environ 41 W.m^{-2} (soit environ 15%) du flux de chaleur stockée. La figure 95 permet de comparer les moyennes des différents flux du bilan d'énergie pour 'Paris' et trois autres situations.

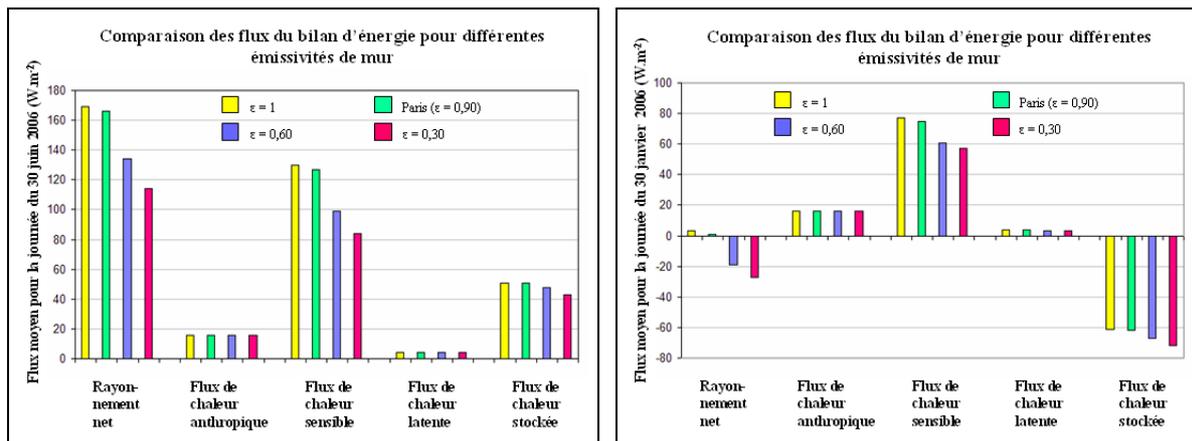


Figure 95 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différentes émissivités de mur le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006.

Durant la journée du 30 janvier 2006, les différences des moyennes sont plus faibles, en absolue (figure 95). Nous ne tiendrons pas compte dans nos résultats de la modélisation avec une émissivité de 0,05 durant cette journée d'hiver car cette dernière produit une évolution du bilan énergétique qui n'est pas en concordance avec Paris et les trois autres cas étudiés. Ainsi entre le cas extrême avec une émissivité de 1 et la situation avec une émissivité de 0,3, une diminution du maximum de rayonnement net de 31 W.m^{-2} (soit environ 18%), une diminution du maximum de flux de chaleur sensible de 19 W.m^{-2} (soit environ 12%) et une diminution du maximum de flux de chaleur stockée de 13 W.m^{-2} (soit environ 17%).

La diminution de l'émissivité des murs entraînent ainsi, en hiver comme en été, une diminution du rayonnement net (on a une augmentation du rayonnement infrarouge ascendant) et, par conséquence, principalement une diminution du flux de chaleur sensible (le flux de chaleur stockée moyen est moins sensible).

VI.2.3.j Inertie des routes

La modélisation des effets des modifications de l'inertie des routes durant la journée du 30 juin 2006 montre une variation notable notamment pour les maxima pour le cas extrême avec une très faible inertie. La différence maximale par rapport à 'Paris' est d'environ 44 W.m^{-2} pour les maxima de flux de chaleur sensible. En excluant cet extrême, les différences restent inférieures à 5 W.m^{-2} pour les minima et inférieurs à 10 W.m^{-2} pour les moyennes. Seules les maxima des flux de chaleur sensible et stockée atteignent des différences pouvant aller jusqu'à environ 30 W.m^{-2} .

Pour les modélisations durant la journée du 30 janvier 2006, seule la situation extrême avec une très faible inertie donne également des différences supérieures à 5 W.m^{-2} entre les minima, maxima et moyennes des différents flux, avec un maximum de flux de chaleur sensible supérieur à celui de 'Paris' d'environ 11 W.m^{-2} , et un maximum de flux de chaleur stockée inférieur d'environ 14 W.m^{-2} .

VI.2.3.k albédo des routes

Encore une fois, pour la modélisation des modifications de l'albédo des routes durant la journée du 30 juin 2006, la situation extrême (avec ici un albédo de 0,95) entraîne des modifications notables avec, en comparaison avec 'Paris', une diminution d'environ 84 W.m^{-2} du maximum de rayonnement net, une diminution d'environ 52 W.m^{-2} du maximum de flux de chaleur sensible et une diminution d'environ 33 W.m^{-2} du maximum de flux de chaleur stockée. Une très faible diminution de l'albédo des routes ou des augmentations plus modérées entraînent des écarts avec 'Paris' de moins de 15 W.m^{-2} pour l'ensemble des flux du bilan d'énergie.

Pour la modélisation durant la journée du 30 janvier 2006 des modifications de l'albédo des routes, les variations entre minima, maxima et moyennes sont toutes inférieures à 17 W.m^{-2} , extrême supérieur compris.

Cette faible influence de l'albédo des routes peut s'expliquer en partie par l'étroitesse des rues de Paris et donc par le fait que le soleil atteint peu la voirie (hauteur moyenne des bâtiments de 30 m et largeur moyenne des rues de 15 m). Cela n'est donc pas forcément représentatif des quartiers où les rues sont plus larges et les prospects plus faibles.

VI.2.3.l Emissivité des routes

La variation de l'émissivité des routes entraîne des écarts entre les minima, les maxima et les moyennes des flux du bilan d'énergie des différentes situations de moins de 10 W.m^{-2} , pour la situation estivale comme hivernale.

Cette faible influence s'explique également par les mêmes raisons que pour l'albédo des rues. Les surfaces sont peu soumises au rayonnement solaire et donc leur température augmente peu, ne permettant pas de distinguer l'influence d'une augmentation de l'émissivité.

VI.2.4 Activités humaines : les flux d'origine anthropique

VI.2.4.a Flux de chaleur sensible et latente dû au trafic

Les flux de chaleur sensible dus au trafic se perçoivent de façon directe sur le flux de chaleur anthropique et le flux de chaleur sensible, et ce de façon identique en été et en hiver (figures). Pour comprendre ici les différences entre chaque situation, n'oublions pas que ce flux de chaleur sensible dus au trafic est nul la nuit (plus précisément entre 18h et 6h) et qu'il ne s'applique que sur les surfaces urbaines minérales (celles modélisées par TEB).

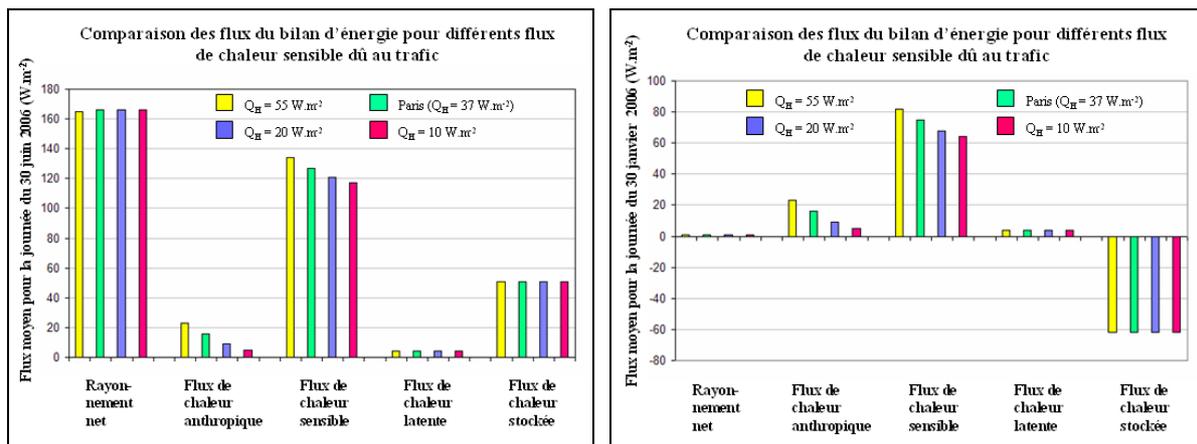


Figure 96 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différents flux de chaleur sensible dû au trafic le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006.

Pour les modélisations durant les journées du 30 janvier et du 30 juin 2006, la modification du flux de chaleur latente lié au trafic se perçoit uniquement sur les flux de chaleur latente et, bien sûr, sur les flux de chaleur d'origine anthropique du bilan d'énergie. La variation du flux de chaleur latente, comme du flux de chaleur anthropique sont à la mesure de l'augmentation proposée pour le flux de chaleur latente lié au trafic, c'est-à-dire, en l'occurrence ici, importante en relatif puisque qu'entre les deux situations extrêmes l'augmentation du maximum de flux de chaleur latente est de presque 250%, cependant l'écart entre les deux situations restent de seulement environ $12 W.m^{-2}$.

VI.2.4.c Flux de chaleur sensible et latente d'origine industrielle

Les flux de chaleur sensible et latente d'origine industrielle se perçoivent de façon directe sur le flux de chaleur anthropique et le flux de chaleur sensible, et ce de façon identique en été et en hiver.

Tout comme pour les flux dus au trafic, ces flux de chaleur sensible et latente d'origine industrielle ne sont appliqués que sur les surfaces urbaines minérales.

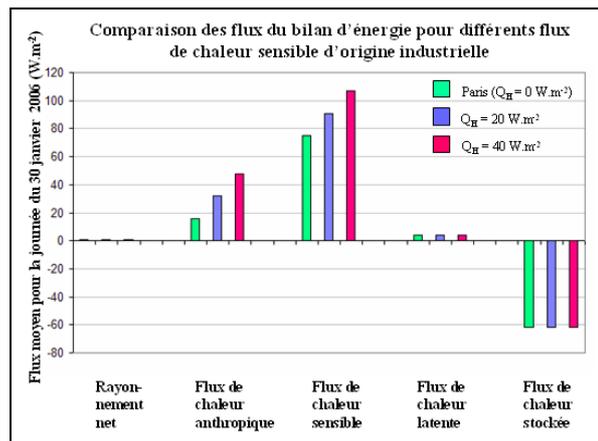
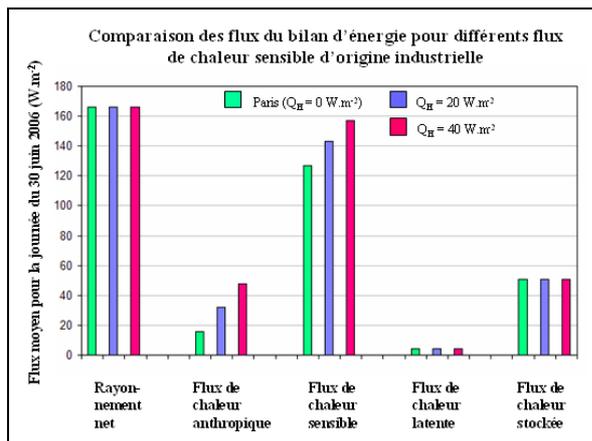


Figure 97 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différents flux de chaleur sensible d'origine industrielle le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006.

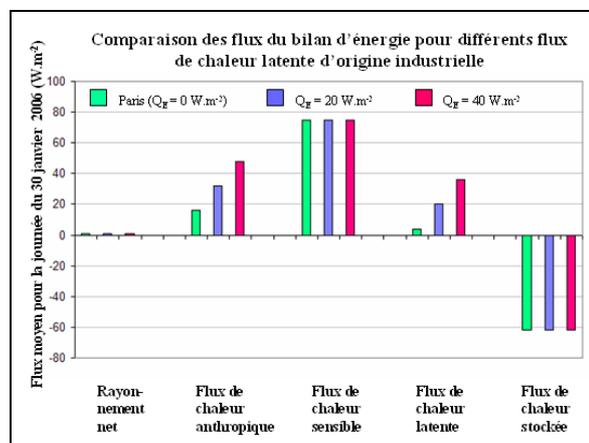
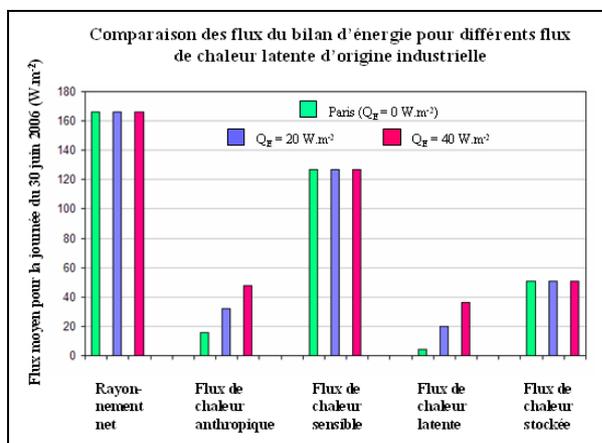


Figure 98 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et des modélisations avec différents flux de chaleur latente d'origine industrielle le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006.

VI.3 Variation de multiples paramètres de SURFEX

Les paramètres modifiés concernent le bâtiment, l'espace public et l'organisation urbaine.

VI.3.1 Bâtiment

VI.3.1.a Réglementation thermique 2005

Pour la modélisation durant la journée du 30 juin 2006, la situation avec des bâtiments respectant la réglementation thermique de 2005 entraîne des écarts de moins de $5 W.m^{-2}$ entre les maxima, les minima et les moyennes des différents flux.

Pour la modélisation durant la journée du 30 janvier 2006, les différences sont également inférieures à $5 W.m^{-2}$ entre les minima et les moyennes des différents flux. Pour les maxima, la situation respectant la réglementation thermique 2005 entraîne une augmentation d'environ $13 W.m^{-2}$ du rayonnement net, et d'environ $12 W.m^{-2}$ du flux de chaleur sensible

VI.3.1.b Bâtiment conforme aux standards Minergie ou Minergie P

Tout comme pour l'isolation des murs et les bâtiments de type RT 2005, la modification de l'isolation des bâtiments pour les modélisations durant la journée du 30 juin 2006, n'entraînent pas de grandes variations. Les améliorations de l'isolation des bâtiments modélisées dans les situations de type standard Minergie et Minergie P, n'entraînent que des variations inférieures à 12 W.m^{-2} par rapport à 'Paris'.

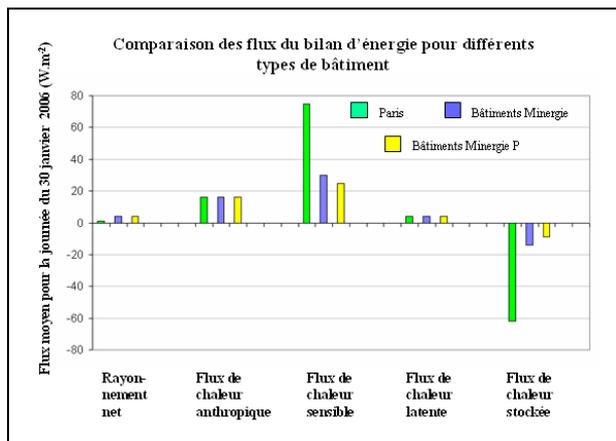


Figure 99 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et les modélisations 'Bâtiments Minergie' et 'Bâtiments Minergie Plus' le 30 janvier 2006.

Les variations des moyennes pour la journée du 30 janvier 2006 sont en revanche plutôt conséquentes, comme nous pouvons le voir sur la figure 99. Les différences des maxima entre les deux situations extrêmes modélisées sont également importantes, avec, entre Paris et Minergie P, une diminution d'environ 52 W.m^{-2} (soit environ 33%) pour le flux de chaleur sensible, et une augmentation d'environ 52 W.m^{-2} (soit environ 69%) du flux de chaleur stockée. Ces modélisations confirment le fait qu'en hiver les bâtiments bien isolés ont moins de pertes de chaleur (moyenne du flux de chaleur stockée négative et se rapprochant d'une valeur nulle – la valeur absolue diminue –, et diminution de la moyenne de flux de chaleur sensible).

VI.3.1.c Bâtiments de couleurs claires et très claires

Les résultats de ces modélisations (figure 100) s'expliquent en les mettant en relation avec la variation de l'albédo des toits, un des paramètres les plus influents, et de l'albédo des murs, en ce qui concerne l'été, et de l'isolation des bâtiments, en ce qui concerne l'hiver.

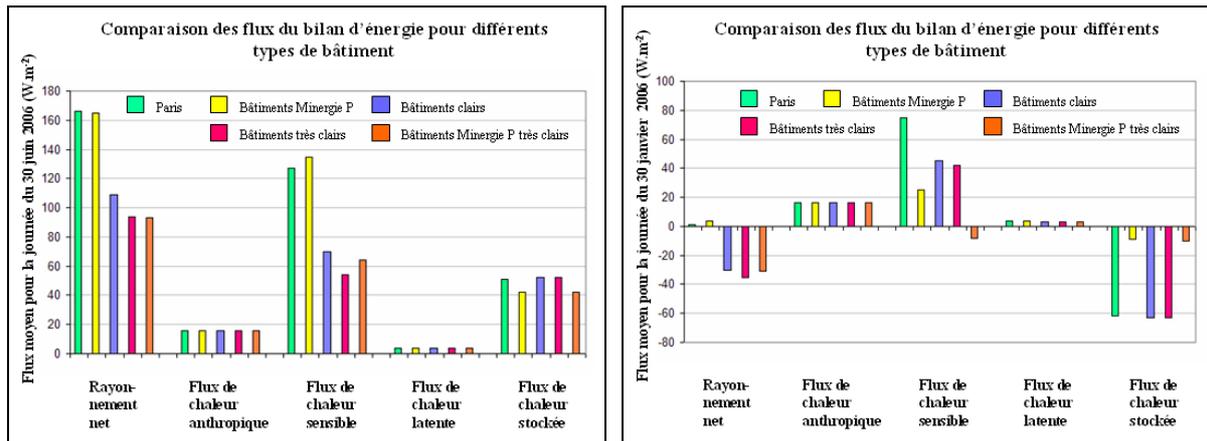


Figure 100 : Comparaison des flux du bilan d'énergie pour Paris et les modélisations avec différents types de bâtiments (Minergie, Minergie Plus, Bâtiments très clairs et Bâtiments Minergie Plus très clairs) le 30 juin 2006 et le 30 janvier 2006.

VI.3.2 Organisation urbaine

La modification de l'organisation urbaine entraîne peu de variation des flux du bilan d'énergie. Ces modifications par rapport à 'Paris' restent, pour tous les maxima, minima et moyennes des flux, inférieures à 16 W.m^{-2} pour la journée du 30 juin 2006 et inférieures à 7 W.m^{-2} pour la journée du 30 janvier 2006. Rappelons que ces modélisations font varier en plus de la forme du bâti la part d'espaces végétalisés, ce qui induit peut être des résultats « faussés » du fait de nos conditions initiales.

VI.4 Conclusion

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 19).

Par 'peu d'influence' ou 'influence faible', nous entendons le fait qu'entre chaque modélisations, hormis les cas très extrêmes (nous conservons uniquement en plus de Paris

trois modélisations), de la même série 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 19, 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 19 : 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 ($10W.m^{-2} \leq < 30W.m^{-2}$) | |
| | Influence forte ($30W.m^{-2} \leq < 50W.m^{-2}$) | |
| | Influence très conséquente ($\geq 50W.m^{-2}$) | |

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 ($2,78 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$ pour les toits et $0,37 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$ 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, nous retiendrons que 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.

VII Synthèse

La réalisation de simulations pour analyser et quantifier les effets de différents facteurs sur le climat urbain a nécessité d'effectuer plusieurs choix.

L'état de l'art, exposé au sein de la première partie, nous a tout d'abord permis d'expliquer l'ensemble des processus à l'origine de la formation du climat urbain et de proposer des domaines d'actions permettant de modifier l'influence de la ville sur son climat. Plus précisément, 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.

Il a ensuite été nécessaire de choisir un modèle numérique répondant au mieux à nos besoins et d'identifier sa portée et ses limites. Dans le cadre de cette thèse, notre choix s'est porté sur TEB, un schéma de surface développé par le CNRM. Ce schéma s'appuie sur la réalisation des bilans d'énergie de trois surfaces : les murs, les toits et les routes. Pour cela, il représente la morphologie urbaine en appliquant le concept de la rue canyon et suppose que le toit et la route sont des surfaces planes horizontales et les murs des surfaces verticales de même hauteur. De plus, toutes les orientations de rue sont prises en compte, avec la même probabilité de présence.

Ce choix de modèle effectué, nous avons sélectionné différentes simulations à mettre en œuvre. Des tests de sensibilité en relation avec les différents paramètres de TEB et à partir d'une description initiale de Paris ont été effectués, ainsi que des tests de sensibilité à différents paramètres en relation avec les domaines d'action (bâtiment, espaces publics, organisation spatiale, activités industrielles et transport). Deux situations climatiques ont été sélectionnées : une journée hivernale fraîche et ensoleillée et une journée estivale chaude et ensoleillée.

Pour l'exploitation des résultats des différentes simulations, nous nous sommes concentrés sur l'analyse du bilan d'énergie du milieu urbain : $Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S$ ($W \cdot m^{-2}$), où 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 19°C), Q_H le flux turbulent de chaleur sensible, Q_E le flux turbulent de chaleur latente et ΔQ_S la quantité de chaleur stockée par la zone urbaine.

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, 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 (Dubai 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. Dans la partie suivante, nous allons proposer quelques éléments d'analyse pour permettre une première réponse à cette question.

Nous ne nous attacherons pas à l'ensemble des leviers d'action évoqués mais nous concentrerons 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 (annexe 2) 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 réfléchissants⁹³, 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. Akbari *et al.*, 2001) ou encore celles concernant le coût de plantation et d'entretien des arbres (Akbari *et al.*, 2001).

⁹³ Le toit réfléchissant ou « *cool roof* » est un système de toit qui possède une réflectance (ou albédo) élevée (abileté 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).

Quatrième partie :
Réflexion sur les moyens à disposition des
collectivités territoriales françaises pour
intégrer dans la conception urbaine des
critères permettant d'influer sur
l'environnement climatique

I Introduction

La première partie de ce document a débuté par un premier chapitre sur la manière dont les scientifiques ont abordé et abordent aujourd'hui la question du climat urbain et de l'îlot de chaleur et la façon dont ils les relient à la ville, à sa conception, son architecture, sa forme ou encore sa géométrie. Elle a ensuite permis d'expliquer les phénomènes physiques à l'origine de la formation du climat urbain et d'introduire une première présentation des facteurs urbains (couche superficielle du sol, activités humaines et structure urbaine) et de leur influence dans la formation du climat urbain.

La troisième partie, à partir d'une proposition plus personnelle de domaines d'action (bâtiment, espace public, organisation spatiale, activités industrielles et transport), est venue compléter ces informations par le biais d'une modélisation du bilan d'énergie de différents milieux urbains, permettant ainsi de tester la sensibilité du climat urbain à différents leviers. 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.

Cette quatrième et dernière partie a pour objectif de présenter une réflexion autour des moyens existants et permettant une intégration dans la conception urbaine de critères, tels que l'albédo et les espaces végétalisés, permettant d'améliorer l'environnement climatique. Cette étape est indispensable pour avoir un premier aperçu sur la capacité de l'aménagement urbain à s'appropriier des faits scientifiques portant sur leur influence sur le climat.

Le changement climatique, pour lequel les villes peuvent se révéler mal adaptées⁹⁴, 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.

⁹⁴ L'adaptation dans le cadre des changements climatiques consiste à « faire évoluer les activités humaines et les écosystèmes afin de limiter les dommages que pourront occasionner les changements climatiques qui n'auront pu être évités et, dans quelques cas, de saisir les opportunités créées par les évolutions favorables de certaines régions ou secteurs d'activité » (ADEME, 2007). Des informations sur les changements climatiques et le rôle des collectivités dans l'adaptation des territoires sont présentées en annexe 2 (perturbations climatiques : sources d'instabilité à gérer par la ville).

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. Comme le signale Givoni (1998), 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 ou, même, d'une ville entière (dans le cas des villes nouvelles par exemple). Il est alors possible d'agir sur le climat urbain au travers de ces politiques et 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.). Pour reprendre les termes de Lorrain (2008), « *les territoires qui se développeront seront ceux qui sauront combiner les innovations de leur base économique et la qualité de leurs infrastructures. Pour y parvenir, les institutions de gouvernement urbain seront essentielles.* ». Cette évolution vers une meilleure prise en compte de l'environnement répond 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. De ce fait, il est difficile de sensibiliser tous les acteurs de la construction de l'importance de tenir compte du climat urbain s'ils ne peuvent percevoir ou mesurer individuellement les conséquences de leurs choix. Par exemple, les labels et les certifications peuvent jouer le rôle de leviers pour encourager la mise en œuvre de bâtiments performants du point de vue de la consommation énergétique, parce que, même s'ils s'intègrent dans un enjeu global qu'est la réduction des gaz à effet de serre, ils répondent également à un besoin individuel de diminution des consommations d'énergie (et donc diminution du coût d'exploitation) et participent à valoriser, en terme d'image, la nouvelle construction. En ce qui concerne le climat urbain, les gains à l'échelle du bâtiment sont encore peu valorisables même s'ils existent comme, par exemple, la diminution des consommations énergétiques pour la climatisation en période estivale (Rosenfeld *et al.*, 1998). Ainsi, les pouvoirs publics sont sans doute les acteurs les plus appropriés pour commencer à intégrer dans la conception urbaine des éléments relatifs au climat urbain. L'objectif de la thèse n'étant pas d'aborder la manière dont chacun des acteurs peut intégrer des éléments de climatologie urbaine dans son domaine, la question de l'acteur commun à l'ensemble des projets d'aménagement urbain s'est posée,

que ces projets soient des interventions ponctuelles (création d'un bâtiment ; réhabilitation, rénovation, entretien d'un bâtiment ; travaux ponctuels sur la voirie), des intervention sur un quartier (création sur un espace non urbanisé ; réhabilitation, rénovation d'un espace déjà urbanisé), des interventions sur l'agglomération (documents d'urbanisme, ZAC, etc.) ou encore des interventions linéaires (modification physique de la voirie ; modification de l'utilisation de la voirie). Si nous excluons l'Etat (dont l'une des ambitions au moment de la loi Solidarité et Renouvellement Urbain comme au moment du Grenelle de l'environnement est, justement, selon Desjardins (2008) de « *développer sa capacité à orienter localement le jeu territorial* ») et l'Union Européenne, un des acteurs communs à l'ensemble de ces projets est la collectivité territoriale, dont l'atout est d'être l'échelon le plus proche des citoyens et des entreprises. Nous nous sommes donc concentrés 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.

Une intervention sur un bâtiment ou un quartier peut sembler accessoire pour changer la forme générale d'une ville, mais, intégrée à l'ensemble des modifications effectuées, elle ne le devient plus. Comme le signalent Poli *et al.* (2007) à propos du profil climatique et du comportement thermique de la ville, un bâtiment seul, ou une surface seule, ne peut pas modifier le profil climatique et le comportement thermique d'une ville. 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 dans le bilan énergétique de la ville. Un bâtiment ou un autre type d'aménagement devrait donc, selon Poli *et al.* (2007), être conçu 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. 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'architecture⁹⁵ en perpétuelle relation avec ce qui fait la ville, son cadre bâti, son environnement, ses habitants, etc.

Cette dernière partie se concentre donc sur les moyens à disposition des collectivités territoriales françaises pour engager une prise en compte du climat urbain dans l'aménagement. Celles-ci ont la possibilité d'être à la fois exemplaires sur leur domaine de compétence mais également d'être organisatrices et « aménageuses » du territoire et

⁹⁵ « Pour soutenir son rôle d'élément fondamental de notre milieu, la qualité première de l'architecture est non pas un caractère d'objet plastique isolé, mais, au contraire, sa capacité à entretenir des relations avec les autres éléments du milieu : institutions humaines, architectures, êtres vivants, terre, air, soleil et eau... » (Liebard et De Herde, 2006).

incitatrices vis-à-vis des autres acteurs de la ville (architectes, urbanistes, habitants, promoteurs, employeurs, etc.).

II Possibilités offertes par l'urbanisme réglementaire et opérationnel pour intégrer des critères permettant d'améliorer l'environnement climatique

Les projets territoriaux et urbains s'ils sont portés par les élus, ont tout intérêt à être également le fruit d'une réflexion prospective et d'une action collective à laquelle participent citoyens, entreprises, associations, etc.⁹⁶ L'ensemble des acteurs peuvent ainsi adhérer au projet de territoire. Ainsi, 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.

Comme le souligne Merlin (2005), l'urbanisme doit allier de nombreuses connaissances et pratiques : *« L'urbanisme, a-t-on dit, est praxis (action) et pratique. Outre une bonne connaissance des faits démographiques, économiques, géographiques, sociaux, etc., il recourt à des mécanismes juridiques et administratifs pour la mise en œuvre opérationnelle des projets. Ceux-ci concernent notamment la politique foncière (acquisitions et viabilisation des sols), la réglementation de l'utilisation des sols, qui s'exprime notamment à travers les plans d'urbanisme, et la création d'organismes opérationnels chargés de mener les grandes opérations d'urbanisme. »*

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

⁹⁶ « Les documents d'urbanisme (SCOT, PLU, etc.) sont l'occasion, pour une collectivité territoriale ou un groupement de communes, de susciter un débat collectif, rassemblant tous les acteurs pour qu'ils expriment leur point de vue et leur vision sur l'avenir du territoire à la fois par l'expression d'un projet de développement durable [...], par une participation de tous les acteurs [...], par une approche globale, l'échelle territoriale la plus pertinente de réflexion des problématiques environnementales [étant alors] la bassin de vie ou le bassin versant » (Ministère De L'équipement et Ministère De l'Ecologie et du Développement Durable, 2007).

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 donc 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 sur le 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 convenablement pour promouvoir un aménagement durable, et, plus particulièrement dans notre cas, soucieux de l'environnement et 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 (le territoire du SCOT doit être continu et sans enclave), 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.).

Nous nous intéresserons pour notre part uniquement aux outils de planification comme le SCOT et le PLU, les DTA étant à l'initiative de l'Etat.

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 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.

On signalera qu'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, ils restent simplement des recommandations et rien n'oblige à les prendre en compte.

Les thèmes du développement durable et du changement climatique ont intégré les politiques publiques ces dernières années et ont également permis le développement de nouveaux outils permettant de structurer les démarches des collectivités sur ces deux thèmes. Nous nous appuyerons donc sur les outils développés à cet effet dans le chapitre suivant, mais avant cela intéressons-nous aux documents d'urbanisme et à la possible prise en compte de l'environnement climatique qu'ils offrent.

II.1 Généralités

Urbanisme et environnement ont pendant longtemps été abordés de façon distincte malgré leur relation évidente. Cet état de fait peut sans doute s'expliquer par les définitions imprécises et multiples données au terme « environnement ». Ainsi, l'environnement est à la fois milieu dans lequel on évolue, milieu naturel, air que l'on respire⁹⁷. Pour Morand-Deville (2006), « *l'environnement, notion « caméléon », se situe entre une acceptation trop étroite : la protection de la nature, et une approche trop globale attirant à elle l'ensemble des problèmes touchant à la qualité de vie, au « bonheur » des êtres [...]. Le droit de l'environnement recouvre le droit de la protection de la nature, celui de la lutte contre les nuisances. Il pénètre, influence, infléchit l'aménagement de l'espace rural et urbain, et celui du patrimoine culturel* ». Le droit de l'environnement recouvre ainsi aujourd'hui beaucoup

⁹⁷ Le conseil international de la langue française donne, dans son dictionnaire de l'environnement (1992), la définition suivante de l'environnement : « *L'environnement est un ensemble perçu comme une entité, dans un espace et un temps donnés, des facteurs physiques, chimiques, biologiques et sociaux susceptibles d'avoir un effet direct ou indirect, immédiat ou à terme, sur l'espèce humaine et ses activités, et sur les espèces animales et végétales.* » Cette définition permet d'aborder, contrairement à celle de l'AFNOR (« milieu dans lequel un organisme fonctionne, incluant l'air, l'eau, la terre, les ressources naturelles, la flore, la faune, les êtres humains et leurs interrelations » - ISO 14001), le caractère très personnel, très subjectif de l'environnement, dans le sens où il dépend de la perception de tout un chacun.

plus que la protection de la nature, même si une des grandes lois l'ayant inspiré demeure celle sur la protection de la nature du 10 juillet 1976⁹⁸.

Au cours des dernières décennies, la dégradation des milieux naturels, la pollution atmosphérique, le changement climatique, directement liés aux activités humaines, ont eu pour conséquence de questionner les modèles socio-économiques des pays industrialisés, qui ont aujourd'hui une dette « écologique » vis-à-vis des pays en développement. Cet état de fait a été à l'origine de l'apparition de la notion de développement durable avec notamment le rapport Brundtland (1987). Les secteurs du bâtiment et des transports étant responsables d'une partie des dégradations et modifications observées et encourues, notamment dans le domaine des rejets de gaz à effet de serre et de la pollution atmosphérique, de nombreuses mesures ont été progressivement mises en œuvre en ce qui concerne les villes, et ce à différentes échelles : mondial (rapport Brundtland, déclaration de Rio), européenne (traité de Maastricht), national (Charte de l'environnement, loi d'Orientation sur l'Aménagement et le Développement Durable des Territoires du 25 juin 1999) ou encore local (agendas 21 locaux).

Comme le signalent Belziti et Souami (2007), *« si les phénomènes sont globaux [destruction de biens non renouvelables comme l'eau, l'air et les espaces naturels], les causes, elles, sont essentiellement locales. C'est donc d'abord au niveau local qu'il faut analyser, comprendre et résoudre les problèmes qui se posent dans le fonctionnement et le développement des sociétés donc des villes. Les documents d'urbanisme apparaissent de ce fait comme un moyen, pour les communes, d'organiser leur développement et non de le subir. La loi Solidarité et Renouvellement Urbain du 13 décembre 2000 puis la loi Urbanisme et Habitat du 2 juillet 2003 et leurs décrets d'application ont apporté le cadre qui manquait aux collectivités territoriales pour exercer un nouvel urbanisme plus soucieux des conséquences à long terme pour l'environnement, la vie économique et sociale des communes »*.

Ainsi, même si les différentes lois peuvent parfois sembler trop générales en matière d'environnement, en tentant de tenir compte de l'ensemble des sous-thèmes de

⁹⁸ La loi n°76-629 du 10 juillet 1976 relative à la protection de la nature, fixe le principe de cette protection et affirme que le maintien des équilibres biologiques est d'intérêt général ; en conséquence les documents d'urbanisme doivent respecter les préoccupations environnementales sous peine d'illégalité. *« La protection des espaces naturels et des paysages, la préservation des espèces animales et végétales, le maintien des équilibres biologiques auxquels ils participent et la protection des ressources naturelles contre toutes les causes de dégradation qui les menacent sont d'intérêt général. Il est du devoir de chacun de veiller à la sauvegarde du patrimoine naturel dans lequel il vit. Les activités publiques ou privées d'aménagement, d'équipement et de production doivent se conformer aux mêmes exigences. La réalisation de ces objectifs doit également assurer l'équilibre harmonieux de la population résidant dans les milieux urbains et ruraux. »* (Article 1 de la loi n°76-629 du 10 juillet 1976)

l'environnement (air, eau, sol, déchets, assainissement, biodiversité, etc.), elles offrent un cadre législatif dans lequel les collectivités territoriales peuvent s'insérer pour mettre en œuvre un cadre réglementaire plus contraignant. La nécessité d'une ville, possédant un cadre de vie agréable et sain, est prise en compte par le droit de l'urbanisme à la fois dans la planification du sol, la réalisation des grandes opérations d'urbanisme et le droit des autorisations de construire.

L'annexe 14 présente une partie du contexte législatif et juridique qui encadre la protection de l'environnement.

Ainsi, 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* »⁹⁹. Pour cela, de nombreux outils sont à leur disposition (figures 101 et 102) 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 101 et 102) dans le paysage de l'aménagement urbain et de l'environnement. 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.

⁹⁹ La partie législative du code de l'urbanisme s'ouvre avec l'article L. 110 par une déclaration de principe selon laquelle « *le territoire français est le patrimoine de la nation. Chaque collectivité publique en est le gestionnaire et le garant dans le cadre de ses compétences. Afin d'aménager le cadre de vie, d'assurer sans discrimination aux populations résidentes et futures des conditions d'habitat, d'emploi, de services et de transports répondant à la diversité de ses besoins et de ses ressources, de gérer le sol de façon économe, d'assurer la protection des milieux naturels et des paysages ainsi que la sécurité et la salubrité publiques et de promouvoir l'équilibre entre les populations résidant dans les zones urbaines et rurales et de rationaliser la demande de déplacements, les collectivités publiques harmonisent, dans le respect réciproque de leur autonomie, leurs prévisions et leurs décisions d'utilisation de l'espace* ».

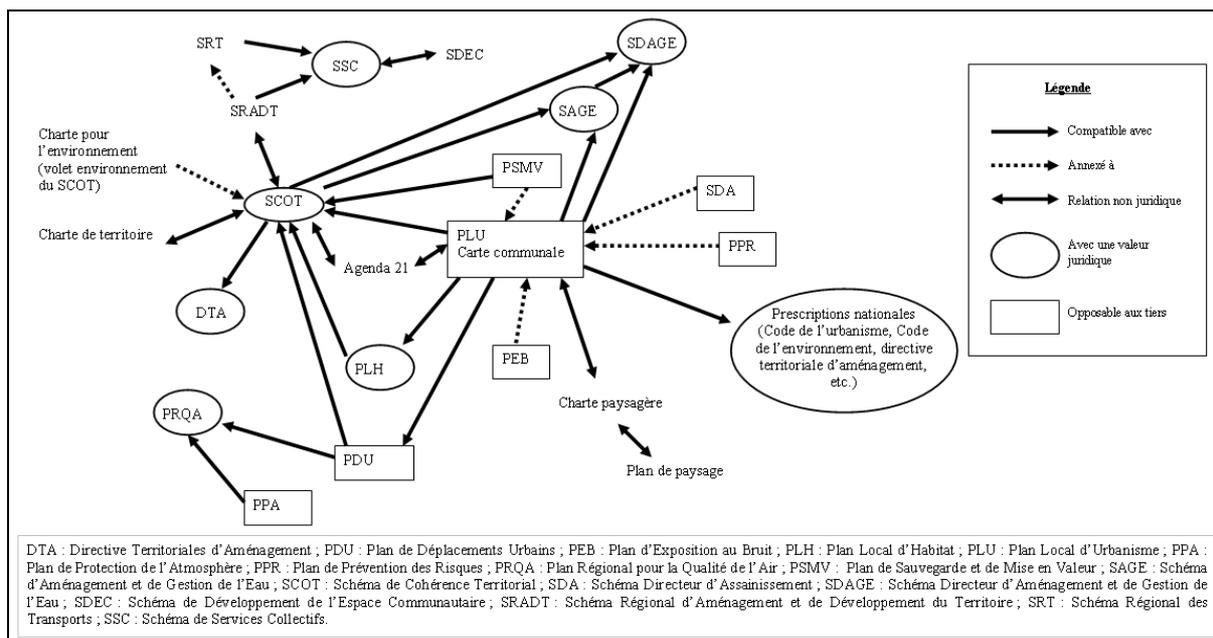


Figure 101 : Les relations entre les documents d'urbanisme réglementaires et incitatifs en lien avec l'aménagement du territoire, l'urbanisme, le foncier, l'habitat, la gestion de la qualité de l'air, des déchets et de l'eau, l'environnement, les paysages, le patrimoine et le développement durable.

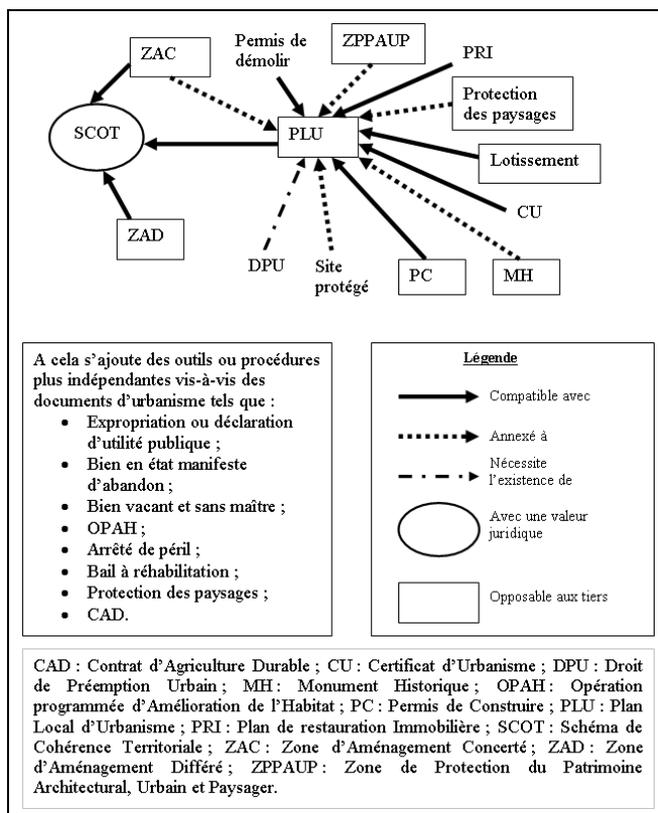


Figure 102 : Les relations entre les outils opérationnels, les procédures à disposition des collectivités et le PLU et le SCOT, deux documents d'urbanisme réglementaires et incitatifs.

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 ruraux¹⁰⁰.

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, pour ce qui nous intéresse dans le cadre de cette thèse, des volontés affichées en termes d'environnement, d'écologie (cf. lexique), 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 une volonté d'une ville en adéquation avec son climat.

Le SCOT, dont l'objectif est ainsi 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 particulièrement¹⁰¹ 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.

¹⁰⁰ Selon l'article L 121-1 du code de l'urbanisme, le SCOT, le PLU et la carte communale doivent répondre aux objectifs communs suivants : 1) « L'équilibre entre le renouvellement urbain, un développement urbain maîtrisé, le développement de l'espace rural, d'une part, et la préservation des espaces affectés aux activités agricoles et forestières et la protection des espaces naturels et des paysages, d'autre part, en respectant les objectifs du développement durable » ; 2) « La diversité des fonctions urbaines et la mixité sociale dans l'habitat urbain et dans l'habitat rural, en prévoyant des capacités de construction et de réhabilitation suffisantes pour la satisfaction, sans discrimination, des besoins présents et futurs en matière d'habitat, d'activités économiques, notamment commerciales, d'activités sportives ou culturelles et d'intérêt général ainsi que d'équipements publics, en tenant compte en particulier de l'équilibre entre emploi et habitat ainsi que des moyens de transport et de la gestion des eaux » ; 3) « Une utilisation économe et équilibrée des espaces naturels, urbains, périurbains et ruraux, la maîtrise des besoins de déplacement et de la circulation automobile, la préservation de la qualité de l'air, de l'eau, du sol et du sous-sol, des écosystèmes, des espaces verts, des milieux, sites et paysages naturels ou urbains, la réduction des nuisances sonores, la sauvegarde des ensembles urbains remarquables et du patrimoine bâti, la prévention des risques naturels prévisibles, des risques technologiques, des pollutions et des nuisances de toute nature ».

¹⁰¹ L'article L. 122-1 du Code de l'urbanisme précise que les SCOT « exposent le diagnostic établi au regard des prévisions économiques et démographiques et des besoins répertoriés en matière de développement économique, d'agriculture, d'aménagement de l'espace, d'environnement, d'équilibre social de l'habitat, de transports, d'équipements et de services [...] et déterminent les grands équilibres entre les espaces urbains et à urbaniser et les espaces naturels et agricoles ou forestiers. Ils apprécient les incidences prévisibles de ces orientations sur l'environnement ».

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-thématique¹⁰² 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.

Étudions plus précisément la composition et les tenants et aboutissants du SCOT et du PLU, et le mode de fonctionnement d'une ZAC ou d'un lotissement, outils 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 » n'est pas résolue. Les paragraphes suivants vont nous permettre de connaître la possibilité d'y inscrire des enjeux relatifs au climat urbain.

II.2 Schéma de Cohérence Territoriale

Le SCOT est l'un des documents de planification urbaine institué par la loi relative à la solidarité et au renouvellement urbain (SRU) et remplace les anciens schémas directeurs. Il vise à doter les agglomérations d'un instrument qui met en cohérence l'ensemble des politiques sectorielles, notamment en matière d'urbanisme, d'habitat, de déplacement et d'équipement commerciaux. Le SCOT est élaboré par un établissement public composé exclusivement de communes et d'établissements publics de coopération intercommunale compétents compris dans le périmètre du schéma.

¹⁰² Selon Ministère de l'équipement et Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (2007), l'élaboration des documents d'urbanismes nécessitent une approche globale afin de : prendre en compte les besoins actuels et futurs, en matière de logements, de développement économique, de services, d'espaces publics, d'infrastructures, etc. ; s'assurer de l'adéquation des orientations d'aménagement et de développement avec le fonctionnement des milieux naturels et ruraux et la biodiversité ; tenir compte de l'ensemble des processus et démarches déjà réalisés, en cours ou en projet sur un territoire, tels que les documents de politique sectorielle (SDC, SDA, PEB, etc.) et plus particulièrement PLH et PDU avec lesquels doit exister un lien de compatibilité, des documents de contractualisation (charte de territoire, charte pour l'environnement, Agenda 21, etc.) ; veiller à la cohérence des orientations d'aménagement retenues avec celles des territoires voisins, y compris les collectivités territoriales des États limitrophes.

Un SCOT comprend trois documents principaux, qui peuvent tous les trois comporter des indications et éléments relatifs au climat urbain ou encore à la vulnérabilité du territoire à des risques climatiques tels que la canicule. Ces trois documents sont :

- un rapport de présentation qui présente un diagnostic du territoire et des besoins de développement et un état initial de l'environnement. Cet état initial peut être l'occasion d'effectuer une carte climatique du territoire qui facilite, comme nous l'avons vu en première partie avec les travaux de Scherer *et al.* (1999), Baumüller *et al.* (2005) et Alcoforado *et al.* (2006), la proposition de recommandations pour une meilleure prise en compte du climat urbain et des effets induits sur ce dernier par les choix d'aménagement.
- le Projet d'aménagement et de développement durable (PADD) qui présente le projet partagé par les collectivités pour l'aménagement et la protection de l'environnement (et donc du climat) de leur territoire. Il s'agit d'un document de présentation « politique » qui exprime les objectifs stratégiques retenus.
- un document d'orientation générale (DOG) qui précise les orientations d'aménagement permettant de mettre en œuvre le projet défini dans le PADD. Ces orientations concernent les grands équilibres entre urbanisation et espaces naturels et agricoles, le logement, notamment social, les implantations commerciales, les déplacements et l'environnement, etc. Elles peuvent ainsi proposer des recommandations relatives au climat urbain déduites, par exemple, d'une cartographie climatique.

L'élaboration d'un SCOT permet aux communes de réaliser en commun certaines études qui seront nécessaires à l'élaboration de leurs Plans Locaux d'Urbanisme (PLU).

Le SCOT impose, en terme de compatibilité, ses orientations aux plans locaux d'urbanisme (PLU), plans de déplacements urbains (PDU), programmes locaux de l'habitat (PLH), plans de sauvegarde et de mise en valeur (PSMV), cartes communales et schémas de développement commercial ainsi qu'aux opérations foncières et opérations d'aménagement. L'intégration d'enjeux climatiques au sein du PADD sera donc nécessairement reprise au sein de ces différents documents. La traduction en actes visibles sur le terrain n'est cependant pas

assurée, le SCOT orientant l'évolution du territoire sans imposer réellement d'actions précises¹⁰³.

Le SCOT permet de fixer plusieurs aspects tels que les orientations de l'aménagement fonction de l'équilibre qu'il convient de conserver entre le développement urbain, les espaces agricoles et naturels, les zones d'activité économique, la préservation des milieux, de la qualité de l'air, etc., ou encore les objectifs en matière d'équilibre de l'habitat, de mixité sociale, de transports en commun ou encore d'équipements commerciaux ou économiques. Il ne détermine pas la destination générale des sols (qui est du domaine du PLU) mais permet de mettre en œuvre une stratégie globale et commune d'aménagement au sein du périmètre du SCOT dans les domaines de la restructuration urbaine, des transports, de l'habitat, etc. Le SCOT définit ainsi l'organisation de l'espace et l'évolution stratégique d'un territoire sur le moyen et le long termes. Il intervient ainsi principalement sur les domaines d'actions de l'organisation spatiale et des transports.

Le SCOT peut donc inscrire au sein de son projet la volonté d'une ville plus en adéquation avec son climat local et/ou tenant compte des modifications qu'elle induit. Il ne peut pour autant donner de mesures précises à mettre en œuvre. Le PLU offre de ce point de vue peut-être plus de possibilités, c'est ce que nous allons analyser.

II.3 Plan Local d'Urbanisme

La loi Solidarité et Renouvellement Urbains (SRU) du 13 décembre 2000 a remplacé les anciens Plans d'Occupation des Sols (POS) par les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU). La principale différence est que le PLU doit comprendre un Projet d'Aménagement et de Développement Durable (PADD) qui présente le projet communal à partir d'un diagnostic.

Le PLU est un document d'urbanisme réglementaire qui concerne à la fois les terrains publics et privés. Il sert de référence obligatoire à l'instruction des diverses demandes d'occupation ou d'utilisation des sols comme les permis de construire, les déclarations de travaux, les permis

¹⁰³ Comme le signalent Belziti et Souami (2007), le SCOT « peut être plus précis dans certains domaines et, par exemple, déterminer les grands projets d'équipement (tels rocade, stations d'épuration) ou de services. Il peut également prévoir l'utilisation prioritaire des zones constructibles existantes avant d'en créer de nouvelles ou subordonner la construction de quartiers nouveaux à la création de transports collectifs ». C'est le cas du Schéma directeur de la région Ile-de-France (SDRIF) pour lequel « l'accent est mis sur la densification des espaces urbains existants et la mutation des friches. La priorité donnée aux aménagements des espaces les mieux desservis est affirmée. Le principe d'intensification urbaine s'appuie notamment sur la densification, la compacité et l'accessibilité, guide l'ensemble de la démarche du SDRIF. »

de démolir. Le PLU est opposable à tous travaux, construction, affouillements, exhaussements ainsi qu'aux lotissements, aux installations classées, etc. Son opposabilité est donc très large.

Les PLU sont, avec les cartes communales, les outils principaux de mise en œuvre, à l'échelle communale, des politiques urbaines. Ils donnent aux communes un cadre de cohérence opérationnelle pour les différentes actions et opérations, publiques ou privées, et doivent permettre d'assurer la diversité des fonctions urbaines. Le développement durable est au cœur de la démarche de planification conduite par le PLU. Il s'agit de mieux penser le développement de la ville afin qu'il consomme moins d'espace, qu'il produise moins de nuisances et qu'il soit plus solidaire. L'enjeu supplémentaire du PLU par rapport au POS est de favoriser la remise sur le marché de friches et terrains inexploités, la réhabilitation de quartiers anciens dégradés, mais aussi d'intégrer le traitement des espaces publics dans les démarches de planification. Comme le faisaient les POS, les PLU continuent à préciser le droit des sols.

Le PLU comprend plusieurs documents (figure 103), qui, comme pour ceux compris au sein du SCOT, peuvent comporter des éléments plus ou moins précis pour prendre en compte la question de l'îlot de chaleur urbain. Ces documents sont :

- Le Rapport de présentation, qui fait état de la situation existante et des perspectives d'évolution de la commune. Ce rapport comprend lui-même une analyse de l'état initial de l'environnement, un diagnostic, les justifications et compatibilité avec les autres documents, et une analyse des effets du projet sur l'environnement avec les mesures prises pour annuler ou limiter ces effets. Il est accompagné éventuellement d'annexes à caractère d'état des lieux, de diagnostic, d'inventaire, de recensement (milieux naturels, sites archéologiques, paysage, patrimoine bâti). Ce document n'a pas de valeur réglementaire et constitue principalement un document d'information à destination du public et un élément d'interprétation du PADD. Au même titre que le rapport du SCOT, celui-ci peut être l'occasion d'effectuer une carte climatique du territoire.
- Le PADD (Projet d'Aménagement et de Développement Durable). Il exprime, au travers des orientations d'urbanisme¹⁰⁴, le projet des élus en matière d'aménagement et

¹⁰⁴ Les orientations d'urbanisme et d'aménagement constituent la partie obligatoire du PADD et concernent six thèmes (DGUHC et CERTU, 2002) : 1/ Le développement économique et démographique (développement et implantation des activités industrielles, commerciales et tertiaires, développement de l'économie liée au

d'urbanisme et constitue le cadre de référence et de cohérence pour les différentes actions d'aménagement que la commune engage. L'objectif est de mieux maîtriser l'urbanisation tout en respectant la qualité architecturale et l'environnement afin de ne pas épuiser les ressources pour les générations futures. Il n'est pas opposable aux tiers lors d'une instruction de permis de construire mais est opposable au règlement et à l'ensemble des autres documents du PLU. Plus concrètement, le règlement du PLU ne doit pas aller à l'encontre des objectifs fixés au sein du PADD, mais il n'est pas obligé pour autant de prévoir des mesures qui permettent de mettre en œuvre les orientations du PADD (Laurent Ducroux, ADEME (2006)).

- Le règlement, qui définit en, au plus, quatorze articles¹⁰⁵ pour chaque zone du PLU les règles applicables au terrain. Il comprend un règlement littéral (accompagné éventuellement d'annexes à caractère prescriptif) et un règlement graphique (documents graphiques) qui permet de localiser le zonage et qui font apparaître les zones constructibles et non constructibles¹⁰⁶. Le règlement et ses documents

tourisme, attractivité urbaine, équilibre commercial centre/périphérie, besoins en urbanisation pour accueillir les populations nouvelles, etc.); 2/ L'aménagement de l'espace (équilibre entre développement urbain maîtrisé et préservation des espaces naturels, agricoles et forestiers, utilisation économe de l'espace, organisation de la diversité des fonctions urbaines dans les différents secteurs, quartiers ou îlots, traitement des espaces publics, prise en compte des usages, préservation et mise en valeur du patrimoine architectural et urbain, etc.); 3/L'environnement (protection des espaces naturels, de la préservation et du développement des espaces agricoles, gestions de l'eau, prévention des risques industriels et naturels, utilisation des ressources dans une perspective de développement durable, traitement des nuisances, préservation des paysages, etc.); 4/ L'équilibre social de l'habitat (mixité sociale dans l'habitat et intégration des différents quartiers au fonctionnement urbain, offre diversifiée en matière de logement, etc.); 5/ Le transport (maîtrise des besoins en déplacements et de la circulation automobile, cohérence urbanisme/déplacements, sécurité des déplacements, etc.); 6/ Les équipements et les services (offre d'équipement et de services dans les différents secteurs ou quartiers pour répondre aux besoins des populations en matière, notamment, d'éducation, de loisir, de santé, d'information, d'emploi et de sécurité, etc.).

¹⁰⁵ Le règlement du PLU peut comprendre 14 articles (R.123-9 du code de l'urbanisme) :

- Article 1 : Type d'occupations ou d'utilisations du sol interdites
- Article 2 : Type d'occupations ou d'utilisations du sol soumises à des conditions particulières
- Article 3 : Accès et voirie
- Article 4 : Desserte par les réseaux (eaux, assainissement, électricité)
- Article 5 : Caractéristique des terrains
- Article 6 : Implantation des constructions par rapport aux voies et emprises publiques
- Article 7 : Implantation des constructions par rapport aux limites séparatives
- Article 8 : Implantation des constructions les unes par rapport aux autres sur une même propriété
- Article 9 : Emprise au sol
- Article 10 : Hauteur maximum des constructions
- Article 11 : Aspect extérieur
- Article 12 : Stationnement
- Article 13 : Espace libre et plantations, espaces boisés classés
- Article 14 : coefficient d'occupation des sols (COS)

Seuls les articles 6 et 7 sont obligatoires. Les autres sont facultatifs.

¹⁰⁶ Quatre catégories de zones peuvent être distinguées : Les zone U (zones urbanisées) qui sont des zones déjà urbanisées ou des secteurs où les équipements publics existants ou en cours de réalisation ont une capacité

graphiques sont directement opposables¹⁰⁷ à toute personne publique ou privée, c'est-à-dire qu'ils s'imposent strictement à la réalisation de tout projet de travaux ou autre opération d'occupation du sol. C'est au sein de ce document que des mesures réglementaires, et donc imposables aux tiers, vont pouvoir être inscrites pour permettre une meilleure prise en compte du climat urbain et des modifications climatiques induites par certains facteurs.

- Les « prescriptions » ou orientations d'aménagement relatives à certains quartiers. Elles constituent un document facultatif qui permet à la commune de préciser les conditions d'aménagement de certains secteurs qui vont connaître un développement ou une restructuration particulière¹⁰⁸. Elles permettent de faire respecter une cohérence d'aménagement sur un secteur donné, dans les grandes lignes, et ont vocation à s'appliquer à une échelle plus large que la parcelle (contrairement au PLU). Comme le précise le Ministère, « *les opérations de construction ou d'aménagement décidées dans ces secteurs devront être compatibles avec les orientations d'aménagement, c'est-à-dire qu'elles doivent les respecter dans l'esprit et non au pied de la lettre.* »
- Les annexes (documents graphiques) indiquent, à titre d'information, les servitudes d'utilité publique (ex : périmètres de 500 m autour des monuments historiques. Cf. lexique), divers éléments relatifs aux réseaux d'eau et d'assainissement, etc.

Les questions environnementales et climatiques peuvent être traitées plus particulièrement au sein des quatre premiers documents (rapport de présentation, PADD, règlement et prescriptions). Cependant, les mesures ou orientations concernant l'environnement inscrites

suffisante pour desservir les constructions à implanter ; les zones AU (zones à urbaniser) qui sont des zones naturelles destinées à une urbanisation nouvelle qui peuvent être urbanisables immédiatement du fait de la présence des équipements nécessaires (assainissement) ou urbanisables que suite à modification ou une révision du PLU ; les zones A (zones agricoles), dans lesquelles ne sont permises que les constructions nécessaires à l'exploitation agricole ; les zones N (zones naturelle ou forestières).

¹⁰⁷ Opposable : « *se dit d'un acte juridique ou d'un jugement dont les tiers doivent tenir compte* » (Petit Larousse, 1991).

¹⁰⁸ « *Les plans locaux d'urbanisme exposent le diagnostic établi au regard des prévisions économiques et démographiques et précisent les besoins répertoriés en matière de développement économique, d'aménagement de l'espace, d'environnement, d'équilibre social de l'habitat, de transports, d'équipements et de services.*

Ils comportent un projet d'aménagement et de développement durable qui définit les orientations générales d'aménagement et d'urbanisme retenues pour l'ensemble de la commune.

Ils peuvent, en outre, comporter des orientations d'aménagement relatives à des quartiers ou à des secteurs à mettre en valeur, réhabiliter, restructurer ou aménager. Ces orientations peuvent, en cohérence avec le projet d'aménagement et de développement durable, prévoir les actions et opérations d'aménagement à mettre en oeuvre, notamment pour mettre en valeur l'environnement, les paysages, les entrées de villes et le patrimoine, lutter contre l'insalubrité, permettre le renouvellement urbain et assurer le développement de la commune. Elles peuvent prendre la forme de schémas d'aménagement et préciser les principales caractéristiques des voies et espaces publics. » (Article L123-1 du code de l'urbanisme)

au sein du PADD ne se retrouveront pas forcément traduites en mesures au sein des autres documents constituant le PLU, sachant que les orientations du PADD ne sont opposables ni aux autorisations, ni aux opérations d'aménagement contrairement au règlement (figure 103). Ce PADD peut cependant être, avec le rapport de présentation, une première porte d'entrée pour expliquer tout l'intérêt de s'intéresser à la question du climat urbain et de l'îlot de chaleur urbain.

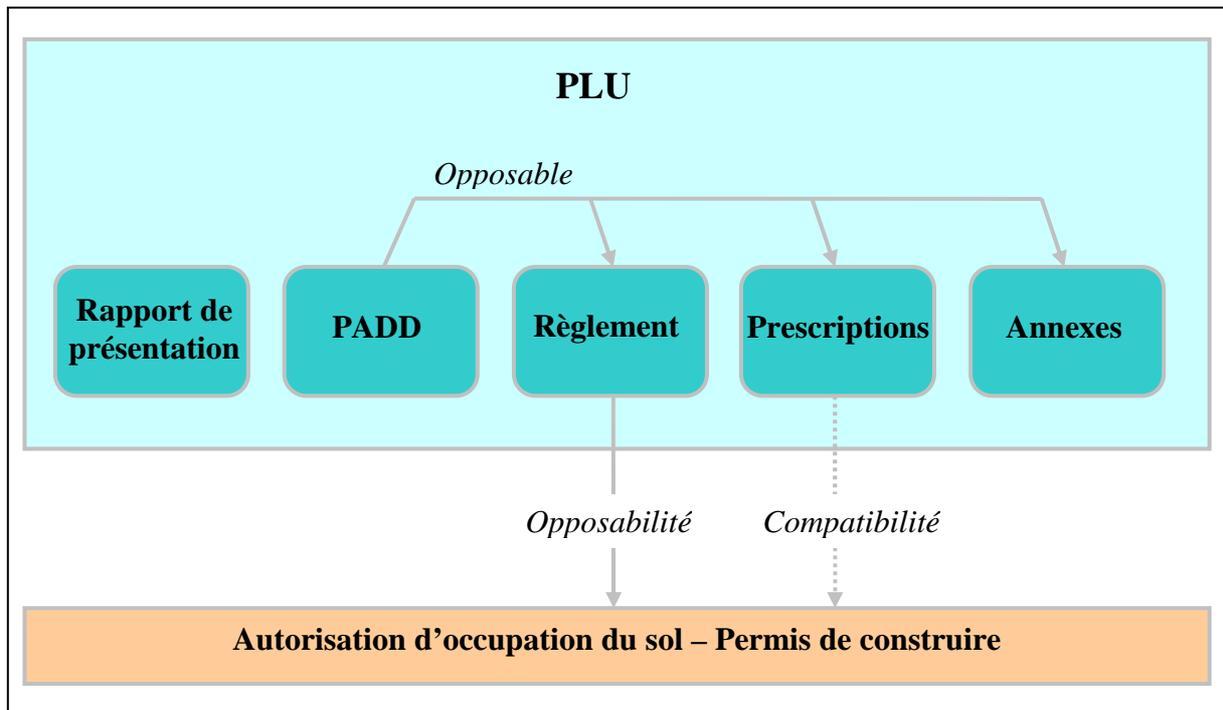


Figure 103 : Les documents du PLU.

La porte d'entrée pour intégrer des enjeux relatifs au climat urbain au sein du PADD du PLU est l'environnement au travers, par exemple, de la prévention des risques naturels (canicule notamment) ou de la protection des espaces naturels (conservation des espaces verts).

Les mesures envisagées dans les différents documents formant le PLU doivent rester dans les limites de l'aménagement, de l'urbanisme et donc du droit de l'urbanisme, et ne pas déborder sur le droit de la construction. Il n'est aujourd'hui pas possible pour une commune d'imposer des règles et des usages concernant l'utilisation de matériaux qui sont du ressort du droit de la construction. Imposer des propriétés physiques aux matériaux de construction n'est donc pas possible actuellement, mais peut-être est-il possible de les privilégier.

Parmi les quatorze articles que peut contenir le règlement du PLU (seuls les articles 6 et 7 sont obligatoires), seuls les articles 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13 et 14 offrent quelques possibilités pour intégrer des leviers d'action permettant d'agir sur le climat urbain.

Les articles 6, 7 et 8 concernent l'implantation des constructions, respectivement, par rapport aux voies et emprises publiques, par rapport aux limites séparatives et par rapport aux autres constructions sur une même propriété. S'agissant de l'implantation des constructions par rapport aux voies et emprises publiques (article 6), deux types de règles peuvent être envisagés pour les différentes zones : une implantation en limite de la voie ou de l'emprise publique (les constructions doivent être implantées en limite de la voie ou de l'emprise publique, l'objectif alors recherché étant de créer un front bâti continu le long de la voie), soit à une implantation en retrait de cette limite (le retrait des constructions peut être conçu de trois façons : soit il est imposé et la construction doit alors respecter une distance de recul déterminée ; soit il est minimum et la construction doit alors s'implanter sur la ligne de recul ou au-delà de cette dernière ; soit il est relatif, en fonction de la hauteur de la construction). Cet article 6 a ainsi une incidence directe sur la forme du cadre bâti par le biais du prospect des rues (rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur de la rue). Cependant, pour éviter un paysage urbain décousu, l'objectif est souvent d'uniformiser les règles d'implantation des constructions. L'article 7 régit l'implantation des constructions par rapport aux limites séparatives et l'un des objectifs est d'éviter qu'une construction porte gravement atteinte aux conditions d'habitabilité du bâtiment voisin (accès à la lumière et au soleil, vues sur la propriété voisine) ou à l'aspect du paysage urbain, et notamment à l'insertion de la construction dans le bâti environnant. L'article 8 édicte des règles de distance avec pour objectifs d'assurer l'éclairage et l'ensoleillement des constructions et permettre le passage des engins de lutte contre l'incendie.

L'article 9 concerne l'emprise au sol. Cet article permet de fixer une emprise constructible maximale. Il ne peut conditionner à lui-seul l'utilisation de la part de terrain non construite et son imperméabilisation. Pour cela, il peut être combiné avec l'article 13 (espace libre et plantations, espaces boisés classés) qui permet de définir un coefficient d'imperméabilisation.

L'article 10 concerne la hauteur maximum des constructions. Les règles font référence aux hauteurs plafond fixées pour chaque parcelle ou encore aux gabarits-enveloppes¹⁰⁹, et sont souvent, en règle générale, fonction de la largeur des voies de circulation.

L'article 11 concerne l'aspect extérieur. Par le biais de cet article, le PLU peut « *déterminer des règles concernant l'aspect extérieur des constructions, leurs dimensions et l'aménagement de leurs abords, afin de contribuer à la qualité architecturale et à l'insertion harmonieuse des constructions dans le milieu environnant* » (article L 123-1 du code de l'urbanisme). Il ne s'agit pas ici de prescrire des matériaux particuliers, mais bien d'aborder l'aspect visuel, esthétique des constructions. Dans le cas des ravalements, il peut par exemple être demandé à ce que la texture des enduits et peintures, de même que leurs teintes, soient adaptées aux matériaux composant la construction et s'accorder avec l'aspect des lieux avoisinants ou encore être interdit de mettre ou remettre en peinture de la pierre de taille, comme c'est le cas au sein du PLU de Paris. L'objectif est de créer une continuité architecturale, morphologique, colorimétrique entre les différentes constructions d'un quartier¹¹⁰. Cependant des « entorses » à la tonalité majoritaire peuvent être proposées comme c'est le cas au sein du PLU de la ville de Paris concernant les toitures ou couronnements : « *La réalisation d'édicules d'accès à des toitures-terrasses permettant la mise en œuvre et l'entretien de leurs plantations, en vue de leur végétalisation lorsque cela est possible, peut être autorisée* »¹¹¹ ou encore concernant les matériaux, les couleurs et les reliefs : « *La pierre calcaire et le plâtre sont dominants à Paris et donnent à la ville sa tonalité générale. Le respect de cette tonalité majoritairement présente ne doit pas cependant interdire l'emploi de matériaux et teintes pouvant s'insérer dans le tissu existant, en particulier dans des secteurs de constructions nouvelles. À cet égard,*

¹⁰⁹ « *Le gabarit-enveloppe est l'ensemble des lignes droites ou courbes qui forme l'enveloppe dans laquelle doit s'inscrire les constructions, non compris les éléments et ouvrages d'aménagement en saillie [...]. Il comprend généralement une verticale et un couronnement.* » (PLU de Paris)

¹¹⁰ La couleur des façades est intimement liée à la palette des matériaux et aux couleurs proposées, de façon plus ou moins explicite, par les villes. Ainsi pour Toulouse, il est possible de se procurer un nuancier (<http://www.culture.gouv.fr/culture/sites-sdaps/sdap31/>) comme pour Roanne (http://www.mairie-roanne.fr/fic_bdd/contenu_pdf_fichier/fichier-1128067088.pdf), alors que pour Paris c'est l'intégration avec les lieux et bâtiments avoisinants qui prime (protocole sur le ravalement, l'entretien et la préservation du bâti parisien du 10 novembre 2000) ; Paris étant, en ce qui concerne les façades une ville claire, c'est donc un nuancier de couleurs douces qui s'impose. Aujourd'hui la couleur des façades est donc liée principalement à une question esthétique et le PLU inclut ainsi des règles d'harmonisation des couleurs des bâtiments. Il en est de même pour la toiture qui doit respecter les particularités régionales comme le signale la fiche technique de l'ANAH sur les combles et couvertures : « *Les pentes de toits et les matériaux de couvertures employés sont traditionnellement liés au climat et aux matériaux disponibles localement. C'est pour cela qu'ils sont généralement caractéristiques de l'architecture régionale.* » Ainsi les toits en zinc caractérisent plutôt Paris, l'ardoise se retrouve sur les maisons bretonnes, la tuile canal dans le midi, etc.

¹¹¹ « *Les édicules techniques (ascenseurs, chaufferies, climatisations, ...) doivent être intégrés aux volumes bâtis. Les éventuelles excroissances ne peuvent être admises que si elles bénéficient d'un traitement de qualité destiné à en limiter l'impact visuel.* » (PLU de Paris)

le recours a des matériaux et des mises en œuvre innovantes en matière d'aspect et de techniques de construction, lies, par exemple, au choix d'une démarche relevant de la Haute Qualité Environnementale des constructions ou de l'utilisation d'énergie renouvelable, est admis. Les matériaux apparents en façade, de même que les dispositifs assurant leur végétalisation, doivent être choisis de telle sorte que leur mise en œuvre permette de leur conserver, de façon permanente, un aspect satisfaisant. Les accessoires (bandeaux, corniches, appuis de fenêtres,...) doivent être conçus et protégés de manière à réduire les incidences de leur vieillissement (salissures suite aux ruissellements). Le choix et la teinte des matériaux peuvent être imposés lorsque la construction se trouve dans une séquence d'architecture homogène. ».

L'article 13 concerne les espaces libres¹¹² et les plantations, et les espaces boisés classés. Comme nous l'avons déjà signalé, cet article permet de définir un coefficient d'imperméabilisation. Il permet également d'imposer un pourcentage d'emprise des espaces végétalisés et de préciser le type de végétation admis. Des dispositions favorisant la création de toitures et terrasses végétalisées peuvent également être inscrites dans cet article. Il est donc un moyen direct d'intégrer un des leviers d'action : les espaces végétalisés, ce qui n'est pas le cas de l'article 11 en ce qui concerne l'augmentation de l'albédo.

L'article 14 concerne le coefficient d'occupation des sols (COS) et par conséquent les règles de densité de construction à appliquer selon le type de zones (zones urbaines ou à urbaniser ou zones à protéger en raison de la qualité de leurs paysages et de leurs écosystèmes). L'article L128-1 du code de l'urbanisme permet de proposer des dépassements du COS : *« Le dépassement du coefficient d'occupation des sols est autorisé, dans la limite de 20 % et dans le respect des autres règles du plan local d'urbanisme, pour les constructions remplissant des critères de performance énergétique ou comportant des équipements de production d'énergie renouvelable. Un décret en Conseil d'Etat détermine les critères de performance et les équipements pris en compte¹¹³. La partie de la construction en dépassement n'est pas assujettie au versement résultant du dépassement du plafond légal de densité. »*

¹¹² « Sauf spécification contraire, cette expression désigne les espaces hors voie libres de construction en élévation, et exclut les surfaces surplombées par des éléments de construction. » (PLU de Paris)

¹¹³ L'arrêté du 3 mai 32007 précise au sein de son premier article que : « pour bénéficier du dépassement du coefficient d'occupation des sols, les constructions de bâtiments soumis aux dispositions de l'article R. 111-20 du code de la construction et de l'habitation doivent respecter les critères correspondant au label « Très haute performance énergétique Energies renouvelables et pompes à chaleur, THPE EnR 2005 » ou au label « Bâtiment basse consommation, BBC 2005 » définis par l'arrêté du 3 mai 2007 susvisé. »

Intégrer des leviers pour agir sur le climat urbain n'est donc pas simple et ne peut se faire, dans le cas des caractéristiques radiatives des matériaux, que de façon indirecte. La limite entre le code de l'urbanisme et le code de la construction en est la principale raison.

Pour la forme urbaine, levier dont l'influence sur le climat urbain et le bilan d'énergie de la ville est complexe (troisième partie), la collectivité, par le biais des articles 6, 7, 8 et 10, a une marge de manœuvre a priori importante. Cependant, le renouvellement du cadre bâti étant très faible (le renouvellement en bâtiment d'une ville est inférieur à 1%), une action conséquente sur ce levier est à court et moyen terme est fortement improbable.

Pour la végétalisation des espaces, l'article 13, principalement, et l'article 9 sont privilégiés et appropriés. Pour le cas des toitures végétalisées, l'article 11 devra en plus est pris en compte.

Les toitures végétalisées peuvent en effet être une solution pour accroître la végétation en ville et plusieurs organismes ou administrations municipales ont mis en place des mesures pour encourager ou imposer l'installation de toits végétalisés¹¹⁴. A l'heure actuelle, seule des démarches incitatives (subventions, conseil, sensibilisation, etc.) peuvent être engagées par les communes françaises.

Pour les paramètres concernant les matériaux de façades telles que la couleur, seul l'aspect esthétique est pris en compte, aujourd'hui, au sein des PLU. Le dépassement du COS pour des constructions remplissant des critères de performance énergétique montre cependant 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 la climatisation, la ventilation, la production d'eau chaude sanitaire et 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 avantager des matériaux de surfaces clairs.

¹¹⁴ « Plusieurs municipalités ont intégré la technologie des toits verts à leurs règlements. Par exemple, à Stuttgart les règlements d'urbanisme obligent tout nouveau bâtiment industriel à aménager un jardin terrasse sur son toit. À Vienne, on retrouve le même genre de règlement mais on prévoit aussi des subventions pour la construction de toits verts pour les nouveaux immeubles au moment de la planification, de l'installation et trois ans après la construction, afin d'en assurer l'entretien à long terme. En Suisse, à certains endroits, chaque nouvel immeuble doit restituer sur le toit un espace vert équivalent à la surface occupée au sol. Enfin, la ville de Tokyo, a récemment passé un règlement visant à verdir les toits de tous les nouveaux bâtiments ayant une superficie de 1 000 m² et plus dans le but de diminuer les îlots de chaleur urbains. » (Laroche et al., 2004)

II.4 Perspectives et limites du SCOT et du PLU

Le SCOT et le PLU peuvent devenir des outils pertinents et influents pour protéger l'environnement et améliorer l'environnement climatique, mais encore faut-il qu'ils soient utilisés comme tels. Cela dépend en grande partie des priorités fixées par la commune et de l'émergence de problèmes sur l'agenda politique.

La limite de ces documents tient également à la difficulté pour l'élu de ne pas inscrire au sein du PLU des règles qui empiètent sur les domaines du droit de l'environnement et du droit de la construction et de l'habitat. Comme le signale Laurent Ducroux, avocat (ADEME, 2006), « *Pour garantir la sécurité juridique [des documents d'urbanisme], il faut également s'assurer de rester bordé, d'un côté, par un objectif d'urbanisme et, de l'autre, par une disposition prévue par la loi. Pourquoi respecter l'objectif ? Parce que sinon, on se trouve dans un conflit de législations (droit de la construction, droit de l'environnement, droit de l'urbanisme). Pourquoi respecter les moyens ? Parce que sinon, on risque de porter atteinte au droit de propriété que seule la loi peut limiter. [...] Par ailleurs, la rédaction de document d'urbanisme réglementaire nécessite d'opérer des arbitrages, entre des logiques purement juridiques et des logiques opérationnelles qui incitent à inclure des dispositions dont on ne cerne pas totalement la validité juridique.* »

Souami (2007) a également noté dans son analyse sur l'intégration des technologies énergétiques dans l'action urbaine la difficulté d'appréhender correctement le territoire : « *L'action urbaine est fondée sur le sol (la surface) et son découpage foncier et administratif. L'illustration la plus prégnante en est le droit de l'urbanisme en France qui demeure principalement un droit d'affectation du sol et d'une partie de ses usages. Ce fondement de l'approche urbanistique trouve difficilement des liens avec la représentation technique et énergétique du territoire. Ceci se manifeste dans l'exercice opérationnel : dans l'état actuel des textes, aucun règlement ne peut être introduit dans un PLU pour obliger à une solution énergétique particulière. L'explication la plus courante donnée à cette situation est l'impossibilité juridique et constitutionnelle de grever une parcelle et une propriété privée d'une telle servitude (GRIDAUH-GIS Socio-Economie de l'Habitat, 2005). C'est la pratique urbanistique qui serait ainsi inadaptée aux enjeux énergétiques.* »

Le Grenelle de l'environnement a souligné la volonté d'un urbanisme plus efficace et plus équitable, et de nouveaux objectifs devraient être intégrés au droit de l'urbanisme. La maîtrise de la demande d'énergie reste cependant au cœur des réflexions même si plusieurs objectifs

du Grenelle¹¹⁵ démontrent un intérêt pour les questions relatives à l'adaptation ou, tout du moins, permettent de les intégrer au travers des éco-quartiers (et du confort d'été) ou encore de la gestion des ressources et de l'espace. L'utilisation du terme 'plan climat énergie' plutôt que plan climat dans leurs propositions montre toute l'attention portée à la lutte contre les rejets de gaz à effet de serre, au détriment, actuellement, d'une réflexion sur l'avenir climatique du territoire.

La réforme envisagée des documents d'urbanisme (renforcer le caractère opposable des SCOT, introduire dans les SCOT des critères de performance énergétique et d'émissions de gaz à effet de serre, etc.) n'empêchera également pas la difficulté à préconiser des éléments constructifs touchant aux matériaux au sein des PLU.

Le rapport de synthèse du groupe 1 du Grenelle sur le thème « lutter contre les changements climatiques et maîtriser l'énergie » souligne la nécessité de clarifier les compétences au niveau local en matière de développement durable et d'énergie, et une clarification de leur articulation et propose « *la création d'un bloc de compétences cohérent dans la lutte contre le changement climatique, au bénéfice des intercommunalités : urbanisme, transports, voirie, énergie. Ces intercommunalités, ayant fixé des objectifs de réduction dans leurs plans climat territoriaux, disposeraient ainsi des leviers nécessaires pour tenir ces objectifs. En particulier, les intercommunalités pourraient introduire des critères de performance énergétique dans les documents d'aménagement du territoire et d'urbanisme pour tous les*

¹¹⁵ Les propositions du Grenelle de l'environnement pour la ville s'articulent autour de trois grands objectifs apparus lors des tables rondes du Grenelle de l'environnement :

1/ Un programme ambitieux de reconquête des centres-villes en déclin ;

2/ Un plan volontariste d'écoquartiers impulsé par les collectivités locales : au moins un éco-quartier avant 2012 (en continuité avec l'existant et intégré dans l'aménagement d'ensemble) dans toutes les communes qui ont des programmes de développement de l'habitat significatif et une quinzaine de grands projets d'innovation énergétique, architecturale et sociale ;

3/ Un nouveau cadre législatif soulignant le rôle majeur des collectivités locales et leur donnant des outils adaptés :

- introduisant l'adaptation au changement climatique et la maîtrise de l'énergie dans les objectifs de l'aménagement du territoire : la maille estimée pertinente est celle des bassins de vie et des communautés d'agglomérations ou des communautés urbaines de plus de 100 à 150 000 habitants,
- incitant à une planification globale de l'urbanisme, intégrant transport, logement, espaces publics, commerce, et généraliser les SCOT (schémas de cohérence territoriale) dans les zones sensibles,
- renforçant le caractère opposable des SCOT,
- introduisant dans les SCOT des critères de performance énergétique et d'émissions de gaz à effet de serre,
- généralisant des plans climat énergie territoriaux rendus obligatoires dans les cinq ans et les articulant avec les documents d'urbanisme,
- permettant de lutter concrètement contre l'étalement urbain,
- et réorientant progressivement la fiscalité locale et les incitations financières et fiscales dans le domaine du logement et de l'urbanisme vers un urbanisme plus durable qui garantisse une gestion plus économe des ressources et de l'espace.

bâtiments (publics et privés) et disposer des moyens de contrôle et de sanction correspondants. [...] Les communes auraient pour leur part un rôle de sensibilisation, d'information et d'exemplarité. La DGUHC indique qu'en l'état actuel du droit, les documents d'urbanisme ne peuvent cependant pas prescrire de normes de construction et qu'il faudrait donc envisager une évolution législative pour le permettre. Cette organisation doit permettre une réflexion plus intégrée de l'organisation de la ville dans ses différentes composantes : urbanisme, transports urbains, production d'énergie décentralisée. »

Ces différentes propositions restent encore principalement centrées sur la problématique des performances énergétiques, qui, en France, reviennent principalement à traiter du comportement thermique des bâtiments en hiver et donc des apports solaires et de l'isolation. La problématique du confort d'été, qui a été peu abordée lors de ces ateliers¹¹⁶, permettrait de mettre en avant nos différents leviers d'action et principalement les matériaux réfléchissants qui influencent certes le climat urbain mais également le confort intérieur du bâtiment.

Concernant le domaine des impacts du changement climatique et de l'adaptation à ces impacts, le rapport de synthèse du groupe 1 du Grenelle sur le thème « lutter contre les changements climatiques et maîtriser l'énergie » préconise la poursuite, le développement et l'organisation de la recherche sur les questions suivantes :

- *« la définition d'événements (ou aléas) de référence, permettant d'aborder le débat sur le risque acceptable,*
- *l'adaptation aux événements extrêmes (amélioration de la prévision, gestion des événements extrêmes, adaptation des grands équipements et installations industrielles...),*
- *la gestion de la rareté et la conciliation de l'offre et de la demande (utilisation de ressources alternatives, promotion de la gestion concertée et des bonnes pratiques, amélioration des prévisions...),*
- *les conséquences sur la santé publique des événements extrêmes,*

¹¹⁶ « Si la problématique du confort d'été a été peu abordée par le groupe de travail, elle ne doit pas être considérée comme secondaire à l'avenir, en particulier vis-à-vis de l'adaptation au changement climatique » (Tables rondes du Grenelle de l'Environnement)

- *les conséquences sur l'agriculture, les milieux naturels (notamment la forêt, qui présente un enjeu particulièrement important du fait de sa capacité à stocker le carbone) et la biodiversité du changement climatique,*
- *les approches économiques et les méthodes de réduction de la vulnérabilité, et d'évaluation des politiques. »*

Cela nous confirme que la question de l'adaptation est aujourd'hui traitée pour les villes principalement au travers des événements extrêmes. Nous noterons d'ailleurs que les termes 'îlot de chaleur urbain' ou 'climat urbain' n'apparaissent à aucun moment au sein du rapport de synthèse du groupe 1 du Grenelle sur le thème « lutter contre les changements climatiques et maîtriser l'énergie ».

Le Grenelle de l'environnement, en plus d'afficher des objectifs très classiques¹¹⁷, ne devrait donc a priori pas nous apporter d'améliorations conséquentes pour permettre l'intégration de critères relatifs au climat urbain au sein de l'aménagement. Il permettra cependant peut-être d'amorcer une réflexion à ce sujet.

Les ZAC avec la possibilité d'y inscrire des prescriptions plus restrictives que le PLU et allant dans le sens d'une conception bioclimatique sont ainsi un outil pertinent pour intégrer de nouveaux critères climatiques au sein de la conception urbaine.

II.5 Urbanisme opérationnel : cas de la Zone d'Aménagement Concerté et du lotissement

La Zone d'Aménagement Concerté (ZAC) est une zone dans laquelle « *une collectivité publique ou un établissement public y ayant vocation, décide d'intervenir pour réaliser ou faire réaliser l'aménagement ou l'équipement des terrains [...] en vue de les céder [...] ultérieurement à des utilisateurs publics ou privés* » (article L. 311-1 du code de l'urbanisme).

L'article R. 311-1 précise également que les ZAC « *ont pour objet l'aménagement et*

¹¹⁷ Selon Desjardins (2007), « *les objectifs du Grenelle de l'environnement pour la ville [« limiter au maximum l'étalement urbain, de réduire la consommation d'espace, l'artificialisation des terres, la destruction des paysages et, en milieu déjà urbanisé, de favoriser une conception complètement renouvelée des quartiers, dans leur fonctionnalité (logement, transport, commerces, loisirs, lieu de travail) »] paraissent aujourd'hui très classique* », et reprennent les objectifs déjà fixés par les lois Solidarité et renouvellement urbains de 2003. Son analyse critique des propositions du Grenelle, fait apparaître que celui-ci « *affine les voies juridiques et techniques nécessaire à une meilleure l'articulation « transport collectif – urbanisation dense » dans la ville agglomérée dont l'extension se fera peut-être par des « éco-quartiers »*. Toutefois, il n'est pas proposé de liens entre les politiques de cette ville agglomérée et celles de la « ville automobile » telle qu'elle continue à se développer dans les territoires périurbains et leurs vaporeuses marches rurales grâce aux massifs investissements dans les réseaux routiers et à une urbanisation éclatée. A quoi sert de réfléchir à rendre plus efficace les gestes de la main gauche, quand la main droite continue à les défaire ? »

l'équipement de terrains bâtis ou non bâtis notamment en vue de la réalisation : De constructions à usage d'habitation, de commerce, d'industrie, de services ; D'installations et d'équipements collectifs publics ou privés. »

La mise en œuvre d'une ZAC comporte plusieurs étapes : La concertation, la création¹¹⁸, le dossier de réalisation, l'achèvement, et la concertation. La personne publique qui a pris l'initiative de la ZAC doit délibérer sur les objectifs poursuivis et sur les modalités d'une concertation associant, pendant toute la durée de l'élaboration du projet, les habitants, les associations locales et autres personnes concernées. La concertation doit se poursuivre jusqu'à la délibération approuvant le dossier de réalisation¹¹⁹.

Depuis la Loi relative à la Solidarité et au Renouvellement Urbains du 13 décembre 2000 (Loi SRU), les règles d'urbanisme des nouvelles ZAC sont incluses dans le plan local d'urbanisme (PLU) afin de mieux intégrer celle-ci dans l'urbanisation environnante. Elles ne sont pas donc plus accompagnées d'un plan d'aménagement de zone (PAZ) spécifique.

Les ZAC permettent à la commune d'introduire un règlement plus contraignant que celui du PLU. C'est par exemple le cas de la ZAC Clichy Batignolles, qui devait initialement accueillir le village olympique des JO de 2012, et pour laquelle *« l'ensemble des aménagements [a été] défini avec des exigences de développement durable exemplaires, l'objectif de « zéro émission » concernant tous les aspects du projet urbain : déplacements, production et consommation d'énergies, recueil des eaux de pluie, traitement des déchets, recherche de la Haute qualité environnementale (HQE) pour les immeubles, etc. »* (Ville de Paris). Une ZAC peut ainsi être l'occasion d'intégrer des enjeux climatiques liés au changement climatique mais également au climat urbain (nous présenterons une ZAC créée au sein de la ville de Couëron dans le chapitre suivant).

Inscrire des éléments allant dans le sens d'une conception bioclimatique est ainsi possible et permet, 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.

¹¹⁸ Un dossier de création est établi par la personne publique à l'initiative de la ZAC et comprend : un rapport de présentation indiquant l'objet et la justification de l'opération, comportant une description de l'état du site et énonçant les raisons pour lesquelles le projet faisant l'objet du dossier de création a été retenu ; une étude d'impact ; un plan de situation ; un plan de délimitation du ou des périmètres composant la zone ; l'indication du mode de réalisation choisi (ZAC en régie, concédée ou conventionnée) ; le régime de la zone au regard de la taxe locale d'équipement ; l'indication du document d'urbanisme applicable à l'intérieur de la zone (PLU ou plan d'aménagement de zone).

¹¹⁹ Le dossier de réalisation comprend le programme des équipements publics et le programme global des constructions à réaliser dans la zone.

Il est cependant nécessaire que les élus ou les personnes en charge de l'écriture du règlement soient alors sensibilisés à ces questions de climat urbain et d'îlot de chaleur au point de transcrire des critères plus contraignants.

Pour les lotissements, les procédures sont souples. Le lotissement est une opération d'urbanisme réglementaire qui permet à un opérateur privé ou public, collectivité locale (le plus souvent une commune), un office HLM, ou tout propriétaire, d'urbaniser une partie de son patrimoine en ayant recours à un promoteur privé (une collectivité peut également réaliser un lotissement, le « promoteur » est alors la puissance publique). C'est ce dernier qui construit les éléments de viabilité : routes et espaces verts, réseaux d'assainissement, d'éclairage public, d'adduction d'eau potable, etc. et qui se rémunère en vendant les parcelles aménagées. Cela évite à la collectivité de financer des investissements importants

La création d'un lotissement peut s'accompagner d'un règlement s'il est prévu d'apporter des compléments aux règles d'urbanisme en vigueur (la reprise pure et simple des dispositions du POS ou du PLU reste envisageable). En tout état de cause, le règlement du lotissement ne peut prévoir de règle moins sévère que celles contenues dans le règlement de POS ou du PLU.

L'opérateur à l'origine du lotissement peut donc établir des règles d'urbanisme plus restrictives et environnementales. Mais est-ce vraiment son objectif ?

II.6 Conclusion

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 critères précis tels que l'îlot de chaleur

urbain. Le rôle non négligeable de la communauté scientifique a par ailleurs été soulevé par Wackermann (2005c) : « *La communauté scientifique mondiale est venue à la rescousse, depuis surtout deux décennies, des responsables politiques, administrateurs et spécialistes de l'aménagement, pour contribuer de manière efficaces à la rénovation de l'action environnementale dans les aires urbaines, ainsi qu'en matière de rapports renouvelés entre les territoires urbains, périurbains, rurbains et ruraux.* » 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, comme nous l'avons constaté 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 au paysage existant, qui est plus ou moins clair. Les marges de manœuvre ne sont ainsi pas conséquentes.

Le Grenelle de l'environnement ne devrait pas apporter de nouvelles solutions sur ce point particulier. La collectivité peut influencer la proportion d'espaces végétalisés ou encore la géométrie des rues. Pour ce dernier aspect cependant, 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.

Le tableau 20 résume les atouts et les limites des SCOT, des PLU et des ZAC concernant la prise en compte de l'environnement climatique et la mise en œuvre de mesures pour influencer sur le climat urbain.

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.

Tableau 20 : 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 influencer sur le climat urbain.

| Domaines d'action | Bâtiment | | Espace public | | Organisation spatiale | |
|-------------------|--|---|--|---|--|--|
| | Forme du bâtiment | Composition du bâtiment | Forme, géométrie et composition des rues | Nature des espaces végétalisés | Densités (densité de construction, densité d'espaces végétalisés, etc.) | Agencement des espaces et forme et profil de l'espace urbain |
| SCOT ↓ | | | | | <input checked="" type="checkbox"/> 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. <input type="checkbox"/> Document non opposable aux tiers. | |
| Opposable ↓ | <input checked="" type="checkbox"/> Possibilité d'intégrer au rapport de présentation et au PADD des éléments sur les enjeux du climat urbain pour la collectivité. <input type="checkbox"/> Documents non opposables aux tiers. | | | | | |
| PLU ↓ | <input checked="" type="checkbox"/> Art. 6, 7, 8 et 10 (opposable aux tiers) du règlement sur l'implantation des constructions et la hauteur maximum des constructions. <input type="checkbox"/> Taux de renouvellement du bâti <1% du bâti. | <input checked="" type="checkbox"/> Art. 11 (opposable aux tiers) sur l'aspect extérieur. Art. 14 : augmentation du COS si critères de performances énergétiques. <input type="checkbox"/> Aucune possibilité d'intégrer des critères thermiques (limite droit d'urbanisme/ droit de la construction) | <input checked="" type="checkbox"/> 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. <input type="checkbox"/> Taux de renouvellement du bâti <1% du bâti. | <input checked="" type="checkbox"/> Gestion par les services de la ville des espaces verts. | <input checked="" type="checkbox"/> Art. 9, 13 et 14 (opposable aux tiers) sur l'emprise au sol, les espaces libres et les plantations, et sur le COS. | <input checked="" type="checkbox"/> Zonage (zones urbanisées, à urbaniser, agricole, naturelles ou forestières). <input type="checkbox"/> Taux de renouvellement du bâti <1% du bâti. |
| ZAC ↓ | <input checked="" type="checkbox"/> Règlement plus contraignant que celui du PLU et permettant d'introduire des exigences sur les caractéristiques thermiques et radiatives du bâtiment. <input type="checkbox"/> Règlement sur un « morceau » de territoire. | | | | | |
| Légende | Echelle spatiale inappropriée. | | | | | |

III Démarches incitatives et informatives à disposition des collectivités pour intégrer des critères permettant d'améliorer l'environnement climatique

Echelon politique et administratif le plus proche des citoyens, les collectivités locales peuvent inciter les citoyens en les informant ou les soutenant à mettre 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.

III.1 Une ville exemplaire dans son domaine de compétence

La ville, ou plus précisément la collectivité territoriale, a à la fois la position d'aménageur de son territoire et celle de responsable (maîtres d'ouvrage, gestionnaire, etc.) en tout ou partie des infrastructures et réseaux mis en place. Une commune possède ainsi de multiples compétences¹²⁰ pour gérer son territoire que nous pouvons catégoriser en compétences « traditionnelles » (état civil, enseignement, voirie communale, protection de l'ordre public, etc.)¹²¹ et compétences acquises suite à la décentralisation¹²².

¹²⁰ Les compétences des communes se sont notamment élargies suite aux différentes lois de décentralisation des années 1980 (lois des 7 janvier 1983 et 22 juillet 1983, loi du 12 juillet 1999, dite loi Chevènement).

¹²¹ Les compétences « traditionnelles » de la commune concernent : les fonctions d'état civil (enregistrement des mariages, naissances et décès, etc.) ; les fonctions électorales (organisation des élections, révision des listes électorales, etc.) ; l'action sociale (gestion des garderies, des crèches, et des foyers de personnes âgées) ; l'enseignement (depuis la loi Ferry de 1881, l'école primaire est communale, et la commune gère la construction, l'entretien et l'équipement des établissements) ; l'entretien de la voirie communale ; l'aménagement (logement social, zones d'activités, assainissement, protection des sites, etc.) ; la protection de l'ordre public grâce aux pouvoirs de police du maire.

¹²² Les compétences acquises suite à la décentralisation (loi du 13 août 2004 relative aux libertés et responsabilités locales) sont principalement les suivantes :

- L'urbanisme : c'est pour l'essentiel une compétence des communes. Celles-ci élaborent et approuvent les PLU, ce qui permet au maire de délivrer entre autres des permis de construire.
- L'enseignement : la commune a la charge des écoles publiques. Elle en est propriétaire et en assure la construction, la reconstruction, l'extension, les grosses réparations, l'équipement et le fonctionnement.
- L'action économique : Les communes et leurs groupements, tout comme les départements, peuvent participer au financement des aides directes aux entreprises, dans le cadre d'une convention passée avec la région et leur attribuer des aides indirectes. Par ailleurs, les communes et les EPCI peuvent instituer un office de tourisme.
- Les ports de plaisance et les aérodromes : les communes sont compétentes pour la création, l'aménagement et l'exploitation des ports de plaisance et des aérodromes.
- Le logement : les communes au sein d'un EPCI participent à la définition d'un programme local de l'habitat qui fixe, pour six ans au moins, les objectifs et les principes d'une politique destinée à répondre aux besoins en logements et à favoriser le renouvellement urbain et la mixité sociale à l'intérieur d'une commune mais aussi entre les communes de l'EPCI. La commune a aussi des compétences en matière de logements sociaux et étudiants.

Ses compétences en matière d'entretien de la voirie communale, d'aménagement, d'urbanisme, de logement, etc. peuvent permettre une prise en compte du climat urbain au travers des documents d'urbanisme, comme nous l'avons vu, mais également au travers du patrimoine géré par la commune : les infrastructures routières comme le parc immobilier.

En ce qui concerne la voirie, on notera que les couleurs et matériaux choisis ont souvent pour objectifs de donner une plus grande lisibilité des aménagements et une différenciation visuelle de la fonctionnalité des voiries : trottoirs, parkings, pistes cyclables, couloirs de circulation, bandes d'arrêt d'urgence, etc. La couleur claire est appréciée pour l'instant principalement pour certains emplois particuliers comme les revêtements de chaussée de tunnel ou de passage souterrain - il conduit à des économies d'éclairage et améliore la visibilité, donc la sécurité -, ou en couche de roulement d'ouvrage d'art, il permet de diminuer la température atteinte par le revêtement exposé au soleil et ainsi de limiter les contraintes thermiques sur le tablier de l'ouvrage. L'avantage de la voirie, au sein d'une ville, par rapport aux murs ou aux toits, est qu'elle est gérée par les services de la ville qui peuvent donc largement influencer sur les critères de choix du revêtement.

III.1.1 Infrastructures et parc immobilier

La sensibilisation des services techniques ou des élu(e)s aux enjeux climatiques est un des moyens pour intégrer de nouvelles démarches plus « climatiques » dans leur pratique.

La Ville de Rennes a ainsi organisé en 2007 une journée de formation sous forme de conférence/débat sur le thème « Rennes +6°C : Adaptation des territoires au réchauffement climatique ». Cette formation s'adressait essentiellement aux cadres de la Direction de l'Architecture et de l'Urbanisme (opérations d'aménagement et droit des sols), de la Direction des Bâtiments Communaux (conduite d'opération), de la Direction des Jardins (maîtrise d'ouvrage) ainsi que de la Direction Générale des Services Techniques, ainsi qu'à ceux des

-
- La santé : les communes peuvent, par exemple, tout comme les autres collectivités territoriales, dans le cadre d'une convention conclue avec l'État exercer des activités en matière de vaccination, de lutte contre la tuberculose, la lèpre, le sida et les infections sexuellement transmissibles.
 - L'action sociale : la commune a une action complémentaire de celle du département avec les centres communaux d'action sociale (CCAS), qui notamment analysent les besoins sociaux de la population et interviennent dans les demandes d'aides sociales (aide médicale...).
 - La culture : la commune joue un rôle à travers les bibliothèques de prêts, les musées, les conservatoires municipaux. Les communes ou leurs groupements sont chargés de l'organisation et du financement de l'enseignement artistique initial (musique, danse, art dramatique), les établissements qui en ont la responsabilité étant intégrés dans un schéma départemental. Les communes ou leurs groupements peuvent aussi, s'ils en font la demande et comme pour toute collectivité territoriale ou groupement de collectivités, se voir transférer la propriété de monuments classés ou inscrits, et des objets qu'ils renferment, appartenant à l'État ou au Centre des monuments nationaux et figurant sur une liste établie par décret en Conseil d'État.

études urbaines de Rennes Métropole et de la Direction de la Maîtrise d'Ouvrage. Cette formation fut l'occasion de sensibiliser ces acteurs à l'îlot de chaleur urbain, au changement climatique, et aux possibilités offertes par une modification des manières d'aménager, de concevoir l'espace urbain.

Les services techniques de la ville de Grenoble n'ont pour leur part pas eu besoin de formation pour être sensibilisés à la variation locale du climat. La position en cuvette de Grenoble les a incité à connaître et évaluer l'intensité de l'îlot de chaleur présent sur la ville mais également à identifier les éventuels puits de fraîcheurs présents dans la ville et leur influence thermique. Des campagnes de mesures de températures ont été lancées. L'objectif de la ville de Grenoble est de pouvoir justifier l'intégration de nouveaux éléments au sein de leur guide environnemental (incitatif mais non opposable) et de mettre en œuvre des actions justifiées au sein, dans un premier temps, de l'aménagement de l'espace public par le biais d'un document référentiel interne. Cette action a été favorisée par la présence d'un maire adjoint chargé conjointement de l'environnement et de l'urbanisme sensible à ces problématiques et par la présence d'ingénieurs au sein des services techniques intéressés par le sujet. La ville de Grenoble suit d'ailleurs avec intérêt les travaux menés par l'école nationale supérieure d'architecture de Grenoble sur les chaleurs urbaines (www.grenoble.archi.fr/chaleursurbaines/), travaux qui ont été par exemple présentés lors de leur biennale de l'habitat durable en juin 2008.

La Ville de Paris sensibilise également ses différents services à la problématique du changement climatique de manière générale, c'est-à-dire sans se focaliser sur la question de l'adaptation, par le biais également de journées ou demi-journées de formation. Suite à l'appel à projets 2007 du programme de recherche sur la ville de Paris, la Ville de Paris finance également un projet sur les impacts du changement climatique à l'échelle de l'agglomération parisienne¹²³, projet qui abordera la question de l'îlot de chaleur urbain et permettra une sensibilisation plus conséquente des politiques et des services techniques.

Nous le pressentons au travers de ces premiers exemples, l'intégration de pratiques plus soucieuses du climat n'est pas forcément le fait d'une volonté puissante mais peut être le fait de services techniques ou de politiques sensibilisés et intéressés à ces questions. La figure 104 représente une forme de cercle d'influence vertueux ou politiques et services techniques

¹²³ Il s'agit du projet EPICEA (Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne) auquel participe le CSTB, Météo-France et le CNRM.

peuvent être les points de départ d'une action sur la ville, c'est-à-dire que les uns et les autres peuvent être à l'origine d'une action sur les infrastructures et les réseaux publics et le parc immobilier appartenant à la collectivité, action qui sera perçue alors positivement par les citoyens et qui entrainera une demande de leur part vers les services publics mais également vers le secteur privé. Pour reprendre des termes plus particulièrement liés au commerce, l'objectif est de créer la demande de la part des citoyens (d'espaces publics et privés dont la conception améliore l'environnement climatique) en présentant, proposant une nouvelle offre d'espaces publics améliorant l'environnement climatique.

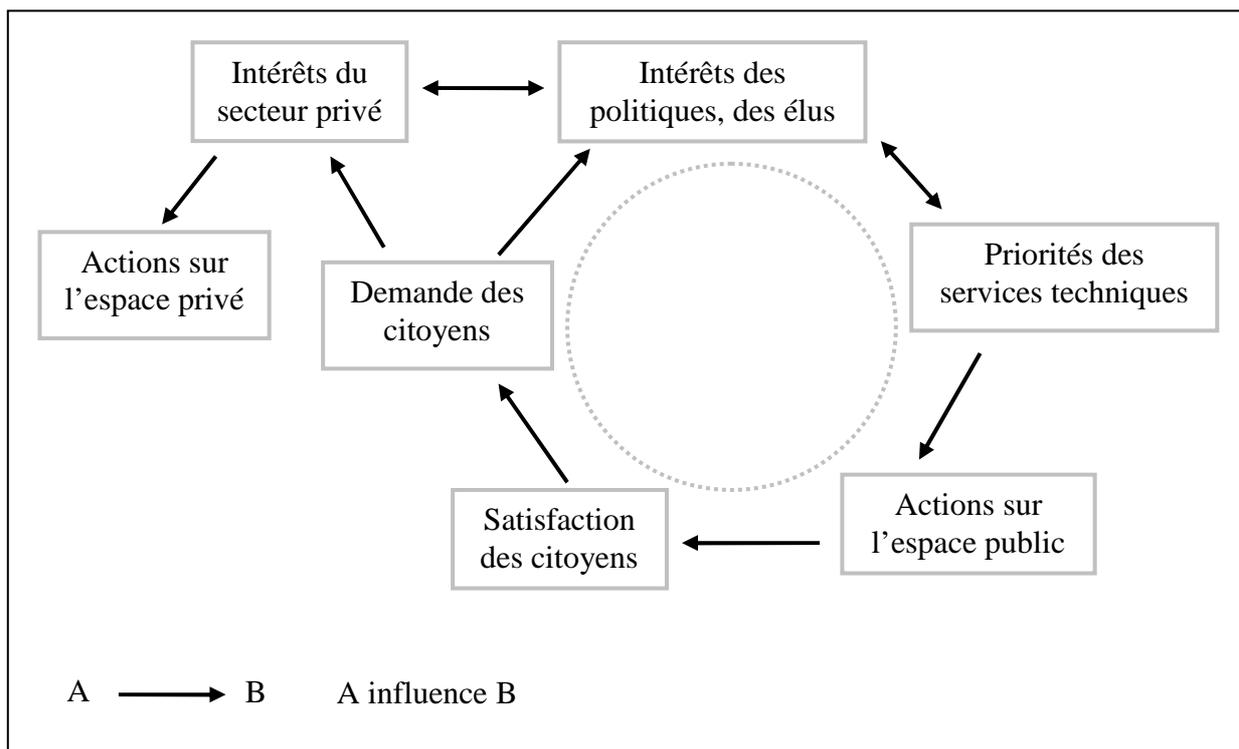


Figure 104 : Influences permettant de favoriser la réflexion autour de problématiques telles que le changement climatique ou le climat urbain.

III.1.2 Les démarches d'accompagnement pour un urbanisme plus conscient de l'environnement : cas de l'approche environnementale de l'urbanisme (AEU)

Pour favoriser la prise en compte de l'environnement et donc peut-être du climat urbain, de l'îlot de chaleur urbain, la collectivité peut se faire accompagner à l'occasion de différentes démarches. Nous avons choisi pour illustrer ces outils l'approche environnementale de l'urbanisme (AEU) développée par l'ADEME

La grille RST₀₂ développée par le Réseau Scientifique et Technique (RST) avait également été choisie pour illustrer ces outils, seulement sa démarche axée sur le développement durable et englobant ainsi des dimensions à la fois sociales, économiques et environnementales, ne

permet pas une réelle approche des enjeux du climat urbain. L'outil est en effet trop large et imprécis et nécessiterait des modifications conséquentes pour intégrer des critères pertinents en termes de prise en compte du climat urbain. Actuellement seul le critère 'anticiper les effets du changement climatique' pourrait éventuellement introduire indirectement le thème de l'îlot de chaleur urbain. La grille RST₀₂ est présentée au sein de l'annexe 15.

L'approche environnementale de l'urbanisme (AEU) est un outil d'aide à la décision dont l'objectif est de favoriser et faciliter la prise en compte de critères environnementaux dans les opérations d'aménagement et les documents d'urbanisme. Cette démarche d'accompagnement des projets d'urbanisme en matière d'environnement et d'énergie est proposée par l'ADEME aux maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre, aux collectivités locales, ou encore aux professionnels d'urbanisme¹²⁴.

« La démarche AEU vise [...] à permettre aux responsables de la planification territoriale, de l'urbanisme et de l'aménagement urbain d'intégrer les contraintes liées à la gestion des questions environnementales en amont des projets et aux différentes échelles de projets (SCOT, PLU, aménagements opérationnels). Elle permet ainsi d'anticiper les problèmes à venir, voire de contribuer à améliorer l'organisation de la gestion environnementale à l'échelle d'un territoire en mobilisant et en associant « au bon moment » une pluralité d'acteurs aux compétences diversifiées. » (ADEME, 2003).

Les objectifs de l'AEU, au nombre de quatre, sont ainsi de : 1. Contribuer au respect des exigences réglementaires en matière d'environnement ; 2. Faciliter l'intégration des politiques environnementales dans le projet ; 3. Concrétiser les principes d'une qualité urbaine plus durable ; 4. Contribuer concrètement à la qualité environnementale des projets urbains.

Pour ce faire, plusieurs sujets, interférant avec l'économie des formes urbaines et la qualité paysagère des projets sont traités :

- Les choix énergétiques,

¹²⁴ L'AEU peut s'appuyer sur les « cahiers de l'aménagement », supports méthodologiques et techniques de l'ADEME. La mise en application d'une AEU permet au maître d'ouvrage de bénéficier d'une aide de l'ADEME au taux de 50% du coût de l'étude plafonné à 20000 euros pour les projets d'aménagement (quartier, îlot, zone d'activités...), et à 50000 euros pour les documents d'urbanisme (SCOT, PLU, PLH...). Des bureaux d'étude formés par l'ADEME à l'AEU peuvent être sollicités pour accompagner la mise en œuvre d'une AEU. *« La méthode est issue de plusieurs années d'expérimentations menées dans les régions. Elle est connue et répandue en France et a déjà 250 analyses l'utilisant ont vu le jour. Des formations sont organisées par l'ADEME pour les bureaux d'études. Un dispositif de capitalisation des résultats de l'application de la méthode a été aussi mis en place par l'ADEME. » (Belziti et Souami, 2007).*

- L'environnement climatique¹²⁵,
- La gestion des déplacements,
- La gestion de l'eau,
- La gestion des déchets,
- L'environnement sonore,
- Les sites et les sols pollués,
- La diversité biologique.

On notera à propos de l'environnement climatique que l'AEU n'aborde pas uniquement la notion de confort intérieur mais également celle de confort extérieur, ce qui va dans le sens d'une meilleure prise en compte du climat urbain : *« au cours des dernières décennies, la conception des formes urbaines s'était peu à peu affranchie de la connaissance des caractéristiques climatiques locales. Or la référence à l'environnement climatique va dans le sens d'une meilleure maîtrise de l'énergie dans l'habitat : récupération active ou passive des apports solaires, gestion du confort thermique d'hiver et d'été. Elle est aussi un facteur important d'amélioration du cadre de vie ; il s'agit notamment d'offrir une ambiance climatique favorable pour les déplacements piétonniers ou les espaces de vie extérieurs en veillant à l'adéquation entre leurs usages et leurs conditions d'ensoleillement ou de protection aux vents »* (ADEME, 2003).

Si l'AEU peut potentiellement concerner tout type de projets territoriaux et urbains, elle a cependant surtout vocation à accompagner l'élaboration des documents d'urbanismes tels que les SCOT et les PLU, et des opérations d'aménagement de type ZAC, qui sont, nous l'avons vu, susceptibles d'accueillir tous trois des éléments concernant le climat urbain et l'îlot de chaleur urbain.

¹²⁵ *« Au cours des dernières décennies, la conception des formes urbaines s'étaient peu à peu affranchie de la connaissance des caractéristiques climatiques locales. Or la référence à l'environnement climatique va dans le sens d'une meilleure maîtrise de l'énergie dans l'habitat : récupération active ou passive des apports solaires, gestion du confort thermique d'hiver et d'été. Elle est aussi un facteur important d'amélioration du cadre de vie : il s'agit notamment d'offrir une ambiance climatique favorable pour les déplacements piétonniers ou les espaces de vie extérieurs en veillant à l'adéquation entre leurs usages et leurs conditions d'ensoleillement ou de protection aux vents »* (ADEME, 2003).

La conception des projets urbains et opérationnels passe par un certain nombre d'étapes clés (réalisation d'études préalables, finalisation d'un diagnostic, exercices de programmation, définition du projet, réalisation des dossiers, passage à la phase opérationnelle), étapes pour lesquels la réalisation d'une AEU est envisageable, depuis l'amont jusque l'aval (tableau 21).

La ville de Couëron, qui appartient à la Communauté Urbaine de Nantes, a par exemple mis en application cette méthode pour une de ses ZAC. En mettant en place cette AEU concomitamment au projet de ZAC, une intégration des exigences environnementales a été possible dès la définition des principes d'aménagement de la ZAC¹²⁶. L'ensemble des sujets présentés ci-dessus (choix énergétiques, environnement climatiques, gestion des déplacements, etc.) n'ont pas été traités mais seulement six thèmes prioritaires ont été retenus, en fonction des priorités et des exigences actuelles de la commune : *« la maîtrise de l'énergie et la promotion des énergies renouvelables ; l'économie des ressources en eau et la protection de la qualité des eaux ; la limitation de l'imperméabilisation des sols et la gestion alternative des eaux pluviales ; l'aide à la valorisation des déchets par la collecte sélective ; la réduction de la pollution de l'air par l'amélioration des transports en commun et la promotion des modes doux de circulation ; la mise en valeur et la construction du patrimoine paysager et naturel, notamment à travers la création d'espaces verts et un programme de pré-verdissement »*. Les principes de l'AEU faisant partie du projet d'aménagement de la ZAC, ceux-ci sont intégrés au dossier de mise en compatibilité du PLU. Ces principes, pour la ville de Couëron, au nombre de cinq, étaient : *« principes de disposition des bâtiments sur les parcelles et de hauteur des constructions pour favoriser l'éclairage naturel, l'ensoleillement passif des bâtiments ; obligation de planter et préservation des éléments paysagers remarquables (haies, arbres...) ; introduction d'un ratio de calcul du nombre de places de stationnement pour les automobiles et pour les deux roues ; non-aggravation des apports d'eaux pluviales par rapport à l'état existant et perméabilisation des espaces de parkings extérieurs ; création de locaux adaptés à la collecte sélective des déchets à l'intérieur de l'unité foncière »*. Plusieurs mesures ont par la suite été prévues pour répondre aux objectifs

¹²⁶ « Cette démarche a été incluse dans la mission de l'urbaniste en charge de l'analyse urbaine, architecturale et paysagère et dans celle du bureau d'études en charge des études réglementaires. Les thèmes environnementaux ont été pris en compte dans les différents documents d'aménagement : dossier de création, schéma d'aménagement, dossier de mise en compatibilité du PLU, cahiers de recommandations architecturales, urbaines et paysagères, annexés aux cahiers des charges de cession de terrain » http://www.ademe.fr/paysdelaloire/inf/BP_PDF/180.pdf.

de l'AEU telles qu'une coulée verte, la création de noues¹²⁷, une circulation hiérarchisée favorable aux modes doux et aux transports en commun, etc.

Tableau 21 : L'AEU, des modalités d'assistance diverses, adaptables à la nature et au rythme des projets (ADEME, 2003).

| | <i>SCOT</i> | <i>PLU</i> | <i>OPERATIONS D'AMENAGEMENT</i> |
|---|--|---|--|
| Un apport éventuel de compléments | Au diagnostic préalable | Au diagnostic et à l'étude d'environnement | A l'étude d'impact |
| Une assistance à l'exposé de l'état initial de l'environnement et des incidences des choix retenus sur l'environnement | Dans le rapport de présentation | Dans le rapport de présentation | Dans le rapport de présentation, inclus dans le dossier de création |
| Une contribution à la définition d'objectifs | Dans le PADD | Dans le PADD | Sur l'économie générale du projet |
| Une aide à la définition d'orientations | Dans le document d'orientation | Dans le PADD | Pour la programmation et la définition du projet |
| Une contribution à la formulation des prescriptions | Dans le document d'orientation | Dans le règlement | Dans les cahiers des charges de cession ou de concession d'usage des terrains |
| Une possibilité d'optimiser le projet en matière d'environnement | En s'assurant de la cohérence entre la politique de développement urbain et les politiques environnementales | En intégrant des critères environnementaux dans l'élaboration du projet urbain | En permettant d'ajuster le projet au regard des contraintes et des atouts en matière d'environnement |
| Une possibilité de définir un cadre de référence environnemental facilitant la mise en application du projet et son suivi | Pour l'ouverture à l'urbanisation de nouvelles zones et la création de quartiers nouveaux | Pour l'évaluation de la conformité des permis de construire | Pour la promotion de la qualité environnementale des espaces publics et des constructions |
| Une assistance à la conduite du projet | Par une participation aux groupes de travail pluridisciplinaires mis en place | Par une participation à des groupes pluridisciplinaires de travail existants ou à créer | Par l'animation de séances de travail collectif et pluridisciplinaire |
| Une participation au processus de concertation | Animation de réunions de travail réunissant des représentants associatifs ou des collectifs d'habitants Réunions publiques de concertation Contributions aux documents d'information et de communication | | |

Les cahiers des charges de cession de terrain au sein de la ZAC « Ouest centre ville » de Couëron s'accompagneront par la suite de cahiers de recommandations architecturales, urbaines, paysagères et environnementales qui compléteront les règles définies dans le cadre de la mise en compatibilité du POS. Sur le plan environnemental, plusieurs points précis concernant l'intégration du bâti dans son environnement, la gestion alternative des eaux

¹²⁷ Noüe : aménagement paysager, souvent peu profond et planté en surface, permettant de recueillir les eaux de ruissellement, pour leur stockage et leur infiltration.

pluviales et la promotion de la maîtrise de l'énergie et des énergies renouvelables ont été fixés¹²⁸. La réflexion en amont offerte par l'AEU permet ainsi l'intégration de critères précis au sein d'une ZAC et, aujourd'hui, des éléments concernant l'environnement climatique peuvent être abordés.

Ainsi, comme le signale Jean-Pierre Troche du Groupe RE-SOURCES (ADEME, 2006), « *bien que les AEU n'aient pas vocation réglementaire, leur efficacité passe, en partie, par leur traduction juridique dans les différents documents d'urbanisme et, plus particulièrement, dans chaque document constitutif du plan local d'urbanisme (PLU)* ».

Ainsi l'AEU peut permettre, grâce à la réflexion qu'il engage sur différents thèmes, de mieux comprendre les enjeux environnementaux et plus précisément climatiques d'une ville ou d'un de ces quartiers et d'agir en faveur d'une meilleure prise en compte de certains leviers d'actions.

L'ADEME pourrait ainsi potentiellement être, par le biais de cette AEU, un vecteur pour une meilleure sensibilisation à la question de l'îlot de chaleur urbain. Pour que cela soit clairement exprimé au sein de l'AEU, il est nécessaire que le climat urbain devienne un enjeu de plusieurs collectivités françaises permettant ainsi, selon une approche ascendante, une remontée de la préoccupation auprès de l'ADEME qui pourrait alors en tenir compte et expliciter plus clairement la notion d'îlot de chaleur urbain au sein de l'AEU.

III.2 Démarches et documents incitatifs et informatifs

Il existe un certain nombre de documents incitatifs et informatifs permettant de sensibiliser les professionnels et les citoyens à l'environnement, au développement durable, au changement climatique. Nous nous sommes plus particulièrement penchés sur les plans climat territoriaux

¹²⁸ Sur le plan environnemental, les recommandations porteront, pour la ZAC du Couéron, notamment sur :

- l'intégration du bâti dans son environnement : adaptation au terrain naturel et au site environnant ; gestion de la pente, choix de l'orientation ; végétalisation des parcelles par les essences végétales locales, prise en compte des matériaux définis sur le site (utilisation des produits labellisés NF environnement – peintures sans solvants... –, utilisation de charpentes bois...).
- la gestion alternative des eaux pluviales : réduction des surfaces imperméabilisées sur les parcelles et en particulier sur les zones de stationnement et sur les terrasses, par l'utilisation de matériaux de type green-blocks ; rétention de l'eau sur les parcelles (recueil des eaux de pluies pour l'arrosage des jardins et le nettoyage des véhicules) ; plantation pour favoriser l'infiltration et l'évaporation et éviter le compactage des sols.
- La promotion de la maîtrise de l'énergie et des énergies renouvelables : utilisation des apports solaires passifs ; réduction des déperditions énergétiques par des formes urbaines compactes et des enveloppes de bâtiments adaptées (renforcement de l'isolation, limitation des ponts thermiques, vitrages faiblement émissifs, augmentation de l'inertie des bâtiments par des toitures végétalisées) ; optimisation de l'éclairage naturel dans toutes les pièces ; choix d'un éclairage artificiel économe.

et les agendas 21 locaux, tout en sachant que les démarches incitatrices peuvent passer certes par le biais de ces documents mais pas seulement. La communication par le biais de brochures, de dépliants comme le fait, par exemple, le conseil régional de l'environnement de Montréal sur le thème 'Pour ma santé, pour mon milieu de vie, je verdis !', abordant ainsi les bénéfices de la végétation mais également ceux des matériaux réfléchissants, est possible (annexe 16). Nous ne pouvons cependant pas nous avancer sur l'efficacité d'une telle action.

III.2.1 Agenda 21 local

L'agenda 21 local est bien souvent au cœur de la stratégie locale de développement durable. Bien qu'il n'ait aucune valeur juridique, il est l'outil le plus important pour œuvrer dans le sens du développement durable selon Charlot-Valdieu et Outrequin (1999).

L'agenda 21 local « *peut être réalisé à tous niveaux de pouvoir et de responsabilité, qu'ils relèvent de territoires institutionnels (communes, agglomérations, département ou région), ou de territoires ayant en commun une dimension économique (zone franchisée ou industrielle), sociale, culturelle (quartier de centre ville) ou écologique (vallée)* » (Charlot-Valdieu et Outrequin, 1999). Son élaboration est, par ailleurs, aujourd'hui, encouragée par des contrats entre l'Etat, les régions et les collectivités gestionnaires des agglomérations, des pays et des parcs naturels régionaux. Pour une collectivité, l'Agenda 21, impulsé par l' élu, est élaboré et mis en œuvre en concertation avec les acteurs locaux¹²⁹ (collectivités, habitants, associations, entreprises, structures déconcentrés de l'Etat, réseaux de l'éducation et de la recherche, etc.).

Pour faciliter la mise en place des Agendas 21 locaux, le ministère en charge du développement durable a élaboré un cadre de référence¹³⁰ pour les projets territoriaux de

¹²⁹ Cette implication de l'ensemble des acteurs locaux est mise en avant au sein du chapitre 28.3 du programme Action 21, programme adopté par les gouvernements au Sommet de Rio et qui constitue un plan global d'action qui doit être mis en œuvre dans tous les domaines où l'activité humaine affecte l'environnement : « *Il faudrait que toutes les collectivités locales instaurent un dialogue avec les habitants, les organisations locales et les entreprises privées afin d'adopter « un programme Action 21 à l'échelon de la collectivité. La concertation et la recherche d'un consensus permettraient aux collectivités locales de s'instruire au contact des habitants et des associations locales, civiques, communautaires, commerciales et industrielles, et d'obtenir l'information nécessaire à l'élaboration des stratégies les plus appropriées. Grâce au processus de concertation, les ménages prendraient davantage conscience des questions liées au développement durable. Les programmes, les orientations et les dispositions législatives et réglementaires appliqués par les collectivités locales pour réaliser les objectifs d'Action 21 seraient évalués et modifiés en fonction des programmes d'Action 21 adoptés à l'échelon local. Les stratégies pourraient également servir à appuyer des projets de financement local, national, régional et international.* »

¹³⁰ Le cadre de référence du ministère en charge du développement durable, qui a fait l'objet d'une consultation interministérielle et auprès des principales associations d'élus territoriaux et qui a fait l'objet d'une circulaire aux préfets (circulaire en date du 13 juillet 2006), vise cinq finalités essentielles auxquelles doivent contribuer les actions et projets de développement durable : 1) la lutte contre le changement climatique, 2) la préservation de la biodiversité, des milieux et des ressources, 3) la cohésion sociale et la solidarité entre les territoires et les

développement durable, en s'appuyant notamment sur les membres du Comité national « Agenda 21 » présidé par le Délégué interministériel au développement durable et sur les Hauts fonctionnaires du développement durable. Un des objectifs est de donner plus de visibilité aux démarches des collectivités. Cependant, alors que la lutte contre le changement climatique est une finalité affichée des agendas 21, la question de l'adaptation n'apparaît pas au sein de ce cadre de référence récent (2006). L'agenda 21, en articulant différentes finalités, pourrait pourtant permettre d'élaborer une vision écosystémique du territoire et d'intégrer des enjeux climatiques de manière générale.

Ajouter au cadre de référence une nouvelle finalité sur le thème de l'adaptation au changement climatique ou sur l'environnement climatique pourrait être une solution, qui nécessiterait sans doute une nouvelle consultation interministérielle et auprès des principales associations d'élus territoriaux.

L'absence d'une finalité affichée sur le thème de l'adaptation au changement climatique ou sur l'environnement climatique n'empêche cependant pas les collectivités territoriales de traiter ces thèmes au sein de leurs agendas 21 locaux, mais elle ne l'incite pas non plus.

III.2.2 Plan Climat territorial

L'Etat a adopté son Plan Climat en juillet 2004 dans l'objectif de réduire de 54 millions de tonnes équivalent CO₂ les émissions françaises annuelles à l'horizon 2010 (elles étaient en 2004 de 562,6 millions de tonnes équivalent CO₂ (CITEPA)). L'objectif pour 2050 est de diviser par quatre à cinq les émissions. Le Plan Climat s'articule autour des huit orientations fortes suivantes :

- Sensibiliser pour influencer les comportements individuels face au CC,
- Changer le comportement des conducteurs et utilisateur de transports et favoriser le transport propre,
- Promouvoir un bâtiment plus économe en énergie et plus écologique,

générations, 4) l'épanouissement de tous les êtres humains, 5) une dynamique de développement suivant des modes de production et de consommation responsables. Il retient aussi cinq éléments déterminants concernant la démarche à conduire pour de tels projets : stratégie d'amélioration continue, participation, organisation du pilotage, transversalité des approches, et évaluation partagée. Ce cadre de référence a permis d'améliorer la qualité des agendas 21 et d'accroître leur nombre en France. D'après une étude de Charlot-Valdieu *et al.* (2001), en ce qui concerne les questions de développement durable, la France cumulait au début des années 2000 de nombreux handicaps tels que un manque de méthode et d'outils, un manque d'informations et de sensibilisation de la population sur la notion de développement durable, une faible implication des industries locales, le manque de planification et la sectorisation ou l'étanchéité des services municipaux ou territoriaux, etc.

- Développer les énergies renouvelables et améliorer les procédés dans l'industrie, l'énergie et les déchets,
- Améliorer les pratiques agricoles et produire de la bioénergie dans le secteur de l'agriculture,
- Instaurer des bonnes pratiques dans la conception et l'utilisation de la climatisation,
- Mettre en place des Plans Climats territoriaux (région, département, commune, intercommunalité) et des mesures exemplaires au sein des services de l'Etat,
- Promouvoir la recherche, agir au plan international, et préparer l'après 2010.

Nous pouvons noter, encore une fois, l'absence de référence, parmi ces orientations, à l'adaptation au changement climatique, à la prise compte du contexte climatique en mutation.

Intéressons-nous plus particulièrement à la septième orientation du Plan Climat, à savoir la mise en place des plans climats territoriaux. Cette dernière s'explique par le rôle prépondérant des collectivités territoriales en matière de lutte contre le changement climatique notamment en tant que donneurs d'ordres publics pour de nombreux secteurs. En effet, les collectivités peuvent agir, du fait de leurs compétences nous l'avons vu, sur les bâtiments et les équipements communaux, les achats publics, les déplacements de leurs salariés, la part des énergies renouvelables dans l'approvisionnement énergétique de la commune ou du territoire, l'organisation urbaine et de l'aménagement de l'espace, etc. Elles sont également le meilleur interlocuteur pour encourager les initiatives locales, en informant et mobilisant les différents acteurs pour les faire adhérer aux plans d'actions qui peuvent être établis. Les collectivités ont aussi, vis-à-vis de la population, une mission d'incitation et d'encouragement des initiatives et des bonnes pratiques à adopter.

L'élaboration d'un plan climat territorial, doit être appréhendée par les collectivités comme une opportunité de développement durable de leur territoire. En effet, le plan climat est un moyen direct ou indirect de garantir le développement économique local et l'emploi en utilisant les ressources locales et en développant de nouvelles activités, de lutter contre la précarité énergétique en permettant à chacun l'accès à des logements à basse consommation, de réduire la vulnérabilité énergétique en multipliant les sources d'énergie, de réduire la vulnérabilité climatique en protégeant les habitants et les activités contre les aléas, de

renforcer l'attractivité du territoire en proposant un environnement et une qualité de vie meilleure, de favoriser le dialogue local en réunissant les acteurs du territoire et les citoyens autour d'un projet de société, etc.

L'intérêt pour le climat urbain, et plus précisément pour l'îlot de chaleur urbain, peut facilement s'intégrer aux questions concernant la vulnérabilité énergétique et climatique et l'attractivité du territoire, encore faut-il que les élus en prennent conscience et décident d'engager une démarche pour mieux mesurer la situation climatique de leur ville aujourd'hui, mais également dans le futur.

Depuis l'adoption du Plan Climat National, plusieurs collectivités se sont engagées dans une démarche de Plan Climat (la ville de Rennes, Grenoble Métropole, le conseil général des Hauts-de-Seine, la Communauté d'Agglomération Mulhouse Sud Alsace, la Ville de Paris, la Ville de Nantes, la région Aquitaine, etc.). Le Grenelle de l'environnement a par ailleurs proposé de rendre obligatoires, en cinq ans, les plans climat-énergie territoriaux par les communautés d'agglomération et communautés urbaines.

Pour illustrer les possibilités offertes par un Plan climat territorial nous allons analyser celui de la ville de Paris.

Le Plan Climat de la Ville de Paris a été adopté en octobre 2007, après une réflexion de presque un an traduite notamment au sein du livre blanc (sorte de « cahier de doléances »), puis objectivée au sein du Plan Climat, et ayant vu la participation de citoyens, de professionnels, de personnes de l'administration parisienne, etc. (figure 106). Le Plan Climat s'articule autour de plusieurs grands axes concernant l'administration elle-même et le territoire parisien.

Des objectifs ambitieux ont été fixés pour le territoire parisien (habitants, entreprises et administration), objectifs qui doivent permettre 25% de réduction des émissions de gaz à effet de serre du territoire, 25% de réduction énergétique des consommations du territoire, et 25% de consommation énergétique du territoire provenant des énergies renouvelables. Ce Plan ambitieux s'appuie concrètement sur des normes plus sévères concernant les bâtiments¹³¹,

¹³¹ Un maximum de 50 kWh/m²shon/an en énergie primaire (consommations de chauffage, d'eau chaude, d'éclairage, de ventilation et de climatisation) pour les opérations neuves, dépassant ainsi les normes du label français le plus exigeant (bâtiment basse consommation), et un maximum de 80 kWh/m²shon/an en énergie primaire pour les rénovations lourdes, s'inscrivant ainsi dans les recommandations de l'association Effinergie à laquelle elle a adhéré.

tout en sachant que plus de 85% des bâtiments de Paris datent d'avant la première réglementation thermique. Sur son patrimoine propre, la Ville de Paris entend également être exemplaire et propose aussi des améliorations thermiques conséquentes au niveau du parc existant¹³² ainsi qu'une augmentation des performances à l'égard des constructions neuves. La Ville de Paris, exemplaire vis-à-vis de ses propres compétences devra ainsi atteindre : 30% de réduction de ses émissions en 2020 par rapport à 2004, 30% de réduction des consommations énergétiques du parc municipal et de l'éclairage public, et 30% de sa consommation énergétique provenant des énergies renouvelables.

Ces objectifs ambitieux ont été accompagnés par de nombreux engagements de la part de la Ville de Paris pour la réhabilitation des immeubles, pour réduire les consommations et accroître la part des énergies renouvelables, pour mettre en œuvre des opérations d'aménagement neutre en carbone, etc.

Ces grands objectifs, sur lesquels la Ville de Paris a particulièrement communiqué, concerne une nouvelle fois uniquement le thème de la réduction des gaz à effet de serre, de la lutte contre le changement climatique. Le thème de l'adaptation a toutefois fait l'objet d'une réflexion et est abordé au sein du plan climat, thème qui permet, rappelons-le, d'introduire des éléments ou leviers permettant d'agir sur le climat urbain et plus particulièrement sur l'îlot de chaleur urbain.

Durant l'élaboration du livre blanc, la question de l'adaptation au changement climatique n'a pas été particulièrement bien appréhendée par certains participants. La notion même d'adaptation semble peu comprise et est souvent interprétée comme une adaptation à une situation future plutôt que comme une adaptation aux impacts du changement climatique à proprement parler. La raréfaction de l'énergie, la nécessité d'en consommer moins font ainsi partie des préoccupations que les personnes veulent traiter sous le terme 'adaptation' alors qu'elles ne sont pas directement des adaptations à une nouvelle donne climatique.

Dans le livre blanc du Plan Climat de Paris, la question de l'adaptation au changement climatique est traitée au travers de trois grands thèmes ou questions :

¹³² Elle engagera un plan de rénovation de son parc, incluant à la fois la rénovation thermique des bâtiments, le renouvellement des équipements de chauffage ou de ventilation, la réduction des consommations électriques, une gestion performante de l'éclairage public, un accroissement de la part des énergies renouvelables dans la consommation ; en agissant sur tous ces leviers, la Ville prévoit d'atteindre sur son patrimoine une baisse de 39% des émissions (hors transport) d'ici 2020.

- La compréhension du phénomène et de ses impacts, c'est-à-dire l'identification des vulnérabilités du territoire face à une modification du climat. Cette identification s'appuie ici sur une densification des réseaux de mesures météorologiques et des observations phénologiques (cycles de vies des plantes et des animaux), ou encore sur l'amélioration des systèmes d'alerte avec des dispositifs d'information réactifs et adaptés faces à des évènements climatiques extrêmes (canicule, inondation, tempête).
- La problématique du confort d'été et le développement d'une filière économique portant sur celui-ci. Cette amélioration du confort d'été passe par une amélioration du bâtiment, une augmentation de la présence du végétal mais également par une modification des rythmes de vie et surtout d'activité en période de canicule (télétravail par exemple), évolution permise grâce aux nouvelles technologies de l'information.
- Une politique de l'eau tenant compte du changement climatique, c'est-à-dire tenant compte des modifications de pluviométrie.

L'objectif général qui découle du livre blanc est : « *anticiper pour réduire la vulnérabilité au changement climatique* ». Comme les trois thèmes/questions le suggèrent, actuellement, des collectivités comme Paris manquent de connaissances sur les effets du changement climatique, sur ses impacts, ou encore sur le coût (humain, matériel, économique) de ses impacts. La traduction en actions de la problématique de l'adaptation en est alors plus bancal car la connaissance manque pour appuyer les choix politiques.

La traduction de la problématique de l'adaptation au sein du Plan Climat de Paris se fait ainsi autour de cinq actions, pour lesquelles il existe déjà des éléments de connaissance :

- Le Plan Canicule de Paris qui touche à la fois au recensement des personnes âgées et handicapées (registre CHALEX pour chaleur extrême), particulièrement vulnérables en cas de canicule, à des mesures d'aménagement spécifique des conditions de travail, et au recensement des effets du réchauffement climatique dans la flore et la faune locale (Est-ce vraiment sa place ?). Nous noterons que même s'il est fait allusion à quelques mécanismes de la formation de l'îlot de chaleur urbain, ce terme n'est pas employé au sein de ce paragraphe, ni celui plus général du climat urbain,

- L'amélioration du confort d'été de la population par l'adaptation des bâtiments, ce qui passe par une maîtrise du recours à la climatisation et le développement d'une filière professionnelle concernant le confort d'été.
- Un important programme de végétalisation de la capitale dont l'objectif est de lutter contre « *les microclimats engendrés par la densité urbaine* » par le biais de l'évapotranspiration¹³³. Cette végétalisation passe par les espaces végétalisés, et les toitures et les murs végétalisés.
- Le Plan de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI).
- La compensation carbone.

Nous pouvons nous interroger sur la pertinence de classer la compensation carbone comme un élément d'adaptation au changement climatique.

La ville de Paris n'est pas la seule commune à s'être lancée dans un plan climat (figure 105) mais elle fait partie de celles, a priori peu nombreuses, ayant abordé la question de l'adaptation. La Ville de Rennes, qui s'est pourtant engagée dans la sensibilisation des cadres de la ville (cf. paragraphe précédent) aux thématiques de l'adaptation et de l'îlot de chaleur, ne propose pas de chapitre sur l'adaptation au sein de son plan énergie climat¹³⁴. De la même façon, l'agglomération grenobloise pourtant intéressée et sensibilisée à la problématique des îlots de chaleur urbains, n'a pas intégré de volet adaptation au sein de son plan climat¹³⁵.

¹³³ « *L'effet sur le micro climat urbain de la végétalisation d'une partie de ces toits [314 ha de toits terrasses végétalisables] devra être mesuré* ».

¹³⁴ Les principales actions qui constituent le Plan Energie Climat de la ville de Rennes, validé par les services de la ville et approuvé à l'unanimité en Municipalité en septembre 2004, sont les suivantes :

- « *Améliorer les performances énergétiques des logements d'habitation, des bâtiments municipaux et tertiaires, existants et à venir ;*
- *Développer les sources d'approvisionnement en électricité verte ;*
- *Etudier la possibilité de développer de nouveaux réseaux de chaleur ;*
- *Poursuivre l'intégration des modes alternatifs de déplacement dans l'aménagement urbain ;*
- *Développer de nouvelles pratiques de déplacement pour les agents et les scolaires ;*
- *Informier et impliquer les habitants, etc.* » (Ville de Rennes).

¹³⁵ Lancé en mai 2005, le Plan climat de l'agglomération grenobloise associe aujourd'hui la majorité des communes de l'agglomération (25 communes sur 26) et de nombreux acteurs du territoire (des collectivités territoriales, des bailleurs sociaux, des fournisseurs d'énergie des universités, des associations, etc.). L'animation et le suivi du Plan Climat Local ont été confiés à l'Agence Locale de L'Energie (ALE). Les objectifs du Plan Climat Local sont cohérents avec les engagements de la France dans le cadre du protocole de Kyoto de stabilisation des émissions de gaz à effet de serre. Le Plan Climat de l'agglomération grenobloise vise à l'horizon 2010, par rapport au niveau de référence de l'année 1999, à :

- Stabiliser les émissions de gaz à effet de serre sur le territoire de l'agglomération grenobloise ;

La ville de Paris n'est pas la seule à inscrire dans son plan climat des objectifs concernant l'adaptation aux impacts du changement climatique. Celui de la ville de Lyon aborde également le sujet (le Grand Lyon participe au programme AMICA – Adaptation and Mitigation, an Integrated Climate policy Approach), celui de Nantes métropole également (qui est axé sur l'évaluation des « *vulnérabilités du territoire, le développement d'une stratégie d'adaptation sur l'agglomération, et l'information et la sensibilisation des acteurs de l'agglomération* »).

Ces différents exemples montrent cependant la faible part qui est faite aujourd'hui à la question de l'adaptation, et donc, dans notre cas, les moindres possibilités d'inscrire des leviers pour agir sur l'îlot de chaleur urbain notamment.

III.2.3 Regards sur les travaux de la Grande-Bretagne

Sans être particulièrement plus touchée par la problématique du climat urbain et plus particulièrement de l'îlot de chaleur urbain, les britanniques font a priori plus grand cas de cette question au sein de leur document concernant l'adaptation au changement climatique.

Dans le rapport de l'association « *Town and Country Planning Association* » sur l'adaptation au changement climatique par le design (Shaw *et al.*, 2007), la question de l'îlot de chaleur urbain et de sa relation avec la densité urbaine est abordée dès les premiers paragraphes introductifs pour mettre en avant la nécessité de penser adaptation et mitigation de façon conjointe. Les mesures et stratégies proposées par la suite pour gérer des fortes températures tiennent compte de l'échelle du bâtiment mais également de celle de la ville, l'objectif étant alors de contrecarrer l'effet de l'îlot de chaleur urbain. La figure 105 associée à ce paragraphe résume les différentes stratégies qui sont en effet, comme nous pouvons le constater, directement liées aux leviers d'action que nous avons identifiés.

SHAW *et al.* (2007) propose ainsi les mesures suivantes qui ont toutes une influence sur l'intensité de l'îlot de chaleur : contrôle des apports solaires du bâtiment (et donc maîtrise des consommations énergétiques), augmentation du rafraîchissement par le biais de l'évaporation au sein des zones naturelles, matériaux réfléchissants pour les façades et les toits des

-
- Stabiliser les consommations énergétiques (ressources fossiles, électricité) pour économiser les ressources énergétiques non renouvelables (pétrole, gaz, uranium) ;
 - Augmenter la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique totale de l'agglomération pour atteindre 21% (elle n'est aujourd'hui que de 8%).

Dans le cadre d'objectifs plus ambitieux à long terme, la Métro veut contribuer de façon significative à la réduction par un « Facteur 4 » de ses émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 : c'est le « Challenge Carbone ».

bâtiments, matériaux de voirie rafraîchissant (« *cool pavement* »), utilisation du pouvoir rafraîchissant de l'eau, infrastructure verte (« *green infrastructure* »), masse thermique du cadre bâti, isolation des bâtiments et refroidissement mécanique, amélioration de la ventilation par le biais de l'orientation des bâtiments et de la morphologie urbaine.

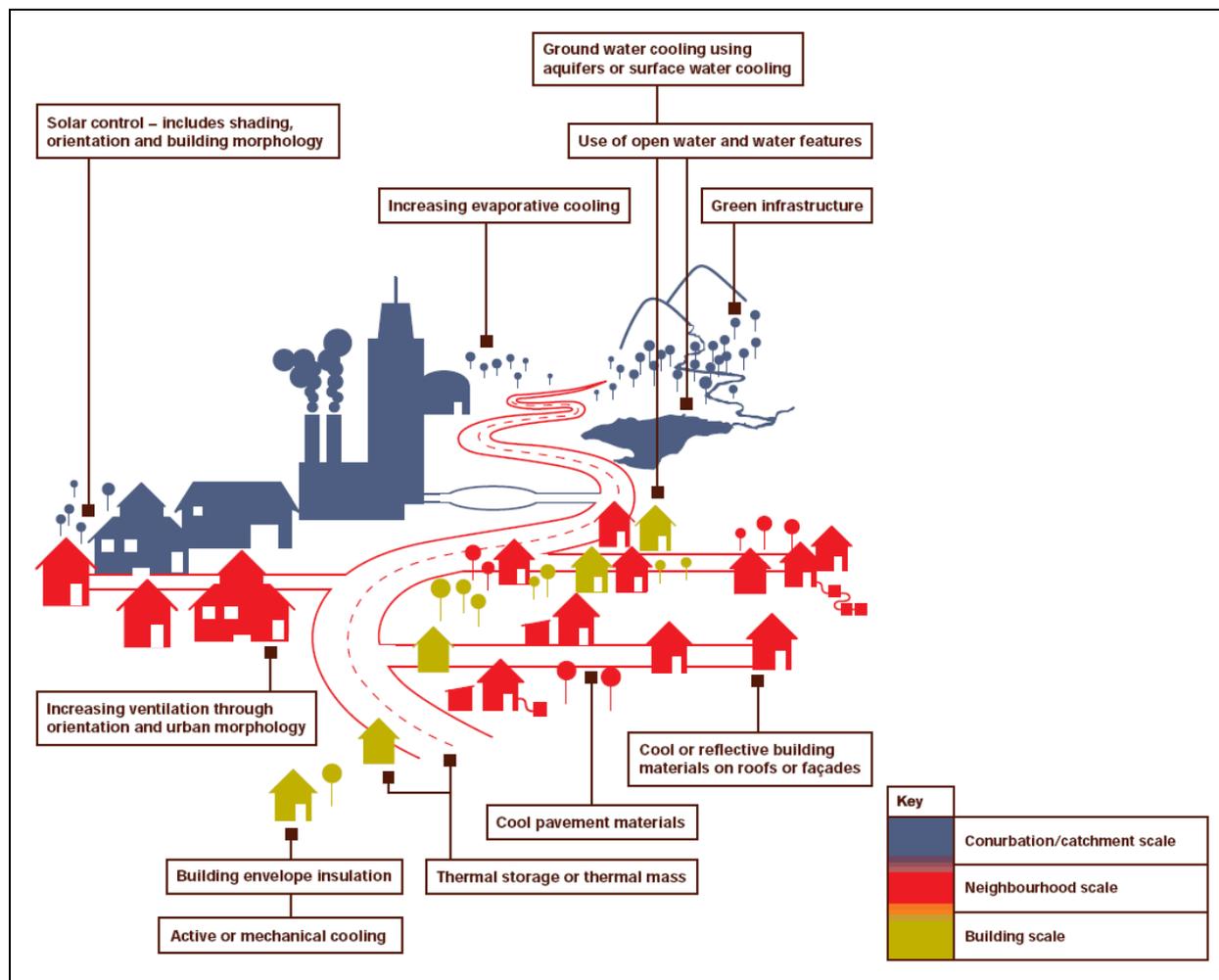


Figure 105 : Ensemble des actions et techniques disponibles pour augmenter la capacité d'adaptation d'une ville aux fortes températures (Shaw *et al.*, 2007).

Dans le rapport plus spécifique à l'adaptation de la ville de Londres (« *Adapting to climate change, lessons for London* ») publié par le *London Climate Change Partnership*¹³⁶ la partie analysant les risques liés à la chaleur intègre également la présence d'un fort îlot de chaleur urbain à Londres pour examiner les diverses solutions envisageables et mises en œuvre dans d'autres villes occidentales.

¹³⁶ Les membres du *London Climate Change Partnership* sont : *Government office for London, Environment Agency, Thames Water Utilities Ltd, Association of British Insurers, acclimatise, Corporation of London, Association of London Government, London Sustainability Exchange, London Development Agency, London Climate Change Agency, London Resilience, Transport for London, Thames Gateway London Partnership, Housing Corporation, Régional Public Health Group – London, UK Climate Impacts Programme.*

III.3 Conclusion

Même si la question du climat urbain et de l'îlot de chaleur reste encore peu abordée par les collectivités locales, ces dernières ne sont pas dépourvues de moyens incitatifs ou informatifs.

Les collectivités locales 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. Pour cette dernière compétence, l'approche environnementale de l'urbanisme, qui aujourd'hui déjà intègre la question de l'environnement climatique, peut permettre un accompagnement favorable à une meilleure prise en compte du climat urbain dans les documents d'urbanisme de type SCOT, PLU ou ZAC. Pour les premières compétences citées, 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.

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.

Les quelques exemples donnés de plans climat territoriaux ne nous contrediront pas, la plupart d'entre eux 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 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 perçu, il est vrai, de façon négative et synonyme d'échec des moyens de lutte contre le changement climatique (annexe 2).

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. Même le rapport de Perben (2008) sur « Imaginer les métropoles d'avenir » aborde peu la problématique de l'environnement urbain et encore moins la question de l'ambiance climatique, même pour les quartiers dits écologiques !

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°C¹³⁷, 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 pour ne pas dire réduit et l'apport de connaissances de la part des scientifiques devrait permettre de l'améliorer.

En plus 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 ainsi être perçus comme une porte d'entrée plus facile, 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.

¹³⁷ 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.

IV Synthèse

La modification du cadre bâti et non bâti comme élément de l'évolution de la ville est sans doute ce qu'il y a de plus perceptible et de plus visible pour les citoyens. C'est également ce qui nous a le plus particulièrement intéressé ici puisque ces modifications peuvent engendrer des modifications climatiques locales plus ou moins perceptibles.

Le renouvellement des infrastructures est cependant loin de permettre une modification fondamentale de la structure urbaine et il est aujourd'hui nécessaire de travailler sur ce qui fait et fera dans ces prochaines années l'essentiel de la ville : l'existant. En effet, à 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 donc destruction du parc correspondant, serait de l'ordre de 0,1 à 0,2% par an (CARASSUS, 2007). Le cadre bâti se renouvelle donc lentement, voire très lentement et l'on peut s'interroger sur la possible articulation des temps longs de la transformation urbaine avec les temps courts de la vie politique locale (environ 5 ans) et du planning de l'urbanisme (entre 10 et 30 ans). Les politiques urbaines doivent ainsi tenir compte de nombreux objets (organisation des transports et des services, construction et attribution de logements, planification d'équipements culturels et d'enseignements, préservation de sites naturels, protection contre les nuisances, procédures d'utilité publique, etc.) et s'y employer en respectant plus particulièrement les temps courts de la vie politique locale et du planning de l'urbanisme. Elles ont donc souvent quelques difficultés à intégrer de nouvelles contraintes peu valorisante et valorisable auprès des citoyens tels que l'adaptation au changement climatique, une des portes d'entrée possible pour intégrer dans la conception urbaine des critères permettant d'améliorer ou, tout du moins, de tenir compte de l'environnement climatique.

Cette nécessité de maîtriser et gérer les legs du passé pour concevoir la ville a été mise en avant par WACKERMANN (2005a) : *« chaque époque crée « sa » ville et [...] chaque ville est appelée à gérer, mieux encore, à maîtriser le legs architectural et urbanistique, socioculturel et économique, pris en charge dans des conditions souvent très peu optimales. »*.

Les gestionnaires des villes ne sont pas pour autant dépourvus d'outils et peuvent agir en faveur de leur environnement climatique sur leurs domaines de compétence directe (voirie,

bâtiments communaux, espaces verts, etc.), au niveau des documents stratégiques d'orientation (SCOT et PLU) par le biais des procédures d'aménagement (ZAC, lotissement) ou en incitant et informant leurs citoyens et leurs services (Agenda 21, Plans climats territoriaux, Approche environnementale de l'Urbanisme, etc.).

Cependant, à l'heure actuelle, malgré un renforcement ces dernières décennies des compétences des communes et de leurs regroupements en matière d'environnement et d'urbanisme, l'urbanisme réglementaire n'offre pas de réelles perspectives d'intégration des leviers d'action (modification de la part d'espaces végétalisés, modification des propriétés radiatives – notamment l'albédo – des surfaces, modification de la forme urbaine, etc.) si l'on excepte le cas des espaces végétalisés. 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 au paysage existant, qui est, selon la ville, plus ou moins clair. Les marges de manœuvre sont ainsi étroites. Le Grenelle de l'environnement ne devrait pas apporter de nouvelles solutions sur ce point particulier des choix de matériaux et de leurs propriétés physiques. La collectivité peut influencer la proportion d'espaces végétalisés (notamment au travers du coefficient d'occupation du sol) ou encore la géométrie des rues, leur prospect. Pour ce dernier point cependant, le très faible taux de renouvellement du bâti ne permet actuellement pas réellement de mettre en œuvre une action déterminante.

L'intégration de nouveaux principes opposables aux tiers n'est donc pas aisée ou ne permet pas une réelle modification de l'espace urbain.

Les projets d'aménagement et de développement durable des SCOT et des PLU (non opposables aux tiers mais présentant les stratégies des communes avec lesquelles l'ensemble du PLU doit être compatible) peuvent intégrer des enjeux globaux relatifs au climat urbain et à l'îlot de chaleur. Ils permettent ainsi une première sensibilisation des élus, des services techniques de la ville et des citoyens à la question du climat urbain.

Les ZAC, dont l'élaboration est à l'initiative des communes, offrent une plus grande liberté quant aux prescriptions inscrites dans leur règlement et peuvent ainsi recommander des couleurs claires pour les façades exposées au soleil, une toiture végétalisée, etc. Elles peuvent

donc devenir un outil pertinent pour intégrer à la conception urbaine une préoccupation de l'environnement climatique, et devenir un outil de communication pour la ville au même titre que les « éco-quartiers ».

Les collectivités peuvent également s'appuyer sur d'autres outils, que ceux dédiés à la planification urbaine et aux procédures d'aménagement, pour favoriser la mise en œuvre d'une conception urbaine plus en adéquation avec son climat actuel et futur. La collectivité n'est en effet pas uniquement un aménageur de son territoire mais aussi responsable d'une grande partie des infrastructures et des réseaux de la commune, et d'un certain nombre de bâtiments (écoles, bibliothèques, mairies, etc.). En étant exemplaire sur ces différents domaines de compétence et en le montrant, la ville peut favoriser l'émergence d'un nouveau besoin puis d'une nouvelle demande de la part des citoyens, qui, progressivement, s'adressera autant aux acteurs publics que privés de l'aménagement urbain. L'approche environnementale de l'urbanisme, développée par l'ADEME, peut également accompagner les collectivités, qui ont le souci de leur environnement climatique, dans leur démarche pour intégrer ces questions au sein des documents tels que le SCOT, le PLU ou la ZAC.

Même si aujourd'hui peu sont utilisés comme tel, les plans climat territoriaux et les agendas 21 locaux, peuvent être de bons vecteurs de la problématique du climat urbain au travers, notamment pour le premier, de la question de l'adaptation au changement climatique. Si les anglais semblent avoir bien intégré le lien entre ces deux sujets au sein de leur document sur l'adaptation au changement climatique, ce n'est pas encore totalement le cas des collectivités françaises. Certains événements montrent cependant les prémices d'un intérêt de la part des collectivités (Rennes + 6°C, Grenoble + 6°C), intérêt qu'il est nécessaire de pérenniser et d'accroître.

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. Le rôle de la communauté scientifique a par ailleurs été soulevé par Wackermann (2005c) : « *La communauté scientifique mondiale est venue à la rescousse, depuis surtout deux décennies, des responsables politiques, administrateurs et spécialistes de l'aménagement, pour contribuer de manière efficaces à la rénovation de l'action environnementale dans les aires urbaines, ainsi qu'en matière de rapports renouvelés entre les territoires urbains, périurbains, rurbains et ruraux.* » Les responsables des

collectivités sont par ailleurs rendus de plus en plus attentifs aux nécessités et possibilités offertes par les instruments juridiques existant dans le domaine de l'environnement.

Ainsi, les collectivités ne peuvent pas œuvrer totalement librement pour intégrer dans la conception urbaine des critères permettant d'influer sur l'environnement climatique et ce principalement du fait des 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. Malgré tout, à l'heure actuelle, plusieurs outils sont à leur disposition (notamment les ZAC, les agendas 21 locaux et les plans climats territoriaux) et permettent aux collectivités de s'engager. De plus, leurs compétences en matière de gestion et d'entretien de nombreux bâtiments publics et de la voirie communale leur offrent la possibilité d'être 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'améliorer l'environnement climatique.

Conclusion

Traditionnellement, le climat intervient dans la conception du cadre bâti et donc de la ville. Inversement, le milieu urbain influe sur ce climat. Les villes modifient ainsi localement les paramètres climatiques et il est constaté qu'elles induisent une augmentation des températures, une diminution de la vitesse du vent, ou encore une modification de la pluviométrie. Ces modifications ont des conséquences sur la consommation énergétique des bâtiments et l'efficacité de la climatisation naturelle, la pollution atmosphérique, le confort en extérieur, la santé ou encore la faune et la flore. La canicule de 2003 a permis de révéler le problème causé par la présence concomitante d'un îlot de chaleur urbain et d'une vague de chaleur. 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, 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.

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.

Pour le premier point, nous nous sommes appuyés sur l'état de l'art de la formation du climat urbain pour comprendre le rôle joué par différents facteurs. Puis 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 a été développé par Météo-France pour paramétrer les échanges en énergie et en eau entre les surfaces bâties et l'atmosphère.

Pour le second point, nous avons mené une réflexion autour des moyens existants et permettant aux collectivités territoriales françaises d'intégrer dans la conception urbaine des critères identifiés, à l'issue du premier point, comme influant sur le climat urbain.

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 les avons explicités 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.
- 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.

La troisième partie, 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, complète 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, la quatrième et dernière partie a permis de montrer 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 intégrée 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.

Lexique

- Absorption :** L'absorption signifie qu'une certaine quantité d'énergie (ou de matière) issue d'un premier lieu a pénétré dans un second lieu qui se l'est "approprié". Dans le cadre de la physique, "phénomène par lequel une partie de l'énergie de rayonnements électromagnétique ou corpusculaires est dissipée dans un milieu matériel" (Petit Larousse Illustré, 1991).
- Adaptation :** L'adaptation dans le cadre des changements climatiques consiste à « faire évoluer les activités humaines et les écosystèmes afin de limiter les dommages que pourront occasionner les changements climatiques qui n'auront pu être évités et, dans quelques cas, de saisir les opportunités créées par les évolutions favorables de certaines régions ou secteurs d'activité » (ADEME, 2007)
- Advection :** 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.
- Aérosol :** Un aérosol est une particule, solide ou liquide, en suspension dans un milieu gazeux.
- Albédo (ou réflectance) :** L'albédo d'une surface correspond au rapport du rayonnement solaire réfléchi par cette surface sur le rayonnement solaire incident. Il est compris entre 0 et 1. Les surfaces qui ont un faible albédo absorbent une part importante du rayonnement solaire incident et deviennent plus chaude que les surfaces ayant un fort albédo. La plupart des surfaces ayant un faible albédo sont de couleur claire.
- Canopée urbaine :** La canopée urbaine est une sous-couche atmosphérique d'écoulement fortement perturbé. Elle correspond à la couche atmosphérique située entre le sol et le niveau des toits.
- Capacité thermique d'un corps :** La capacité thermique (ou capacité calorifique) d'un matériau est la quantité de chaleur mise en réserve lorsque sa température augmente de 1°C. Elle se calcule en faisant le produit de la masse par la chaleur spécifique du matériau (quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de 1°C). La capacité thermique permet de quantifier la possibilité qu'a un corps d'absorber ou de restituer de l'énergie par échange thermique au cours d'une transformation pendant laquelle sa température varie. Plus elle est grande, plus la quantité de chaleur à apporter à un matériau pour élever sa température est grande.

| | |
|---|--|
| 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. |
| Chaleur sensible : | La chaleur sensible est la quantité de chaleur qui est échangée, sans transition de phase, 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. |
| Climat : | Le climat est l'ensemble des phénomènes météorologiques (température, pression, vents, précipitations) qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère et son évolution en un lieu donné (Petit Larousse Illustré de 1991). |
| Coefficient d'emprise au sol (CES) : | Le CES correspond à la fraction de l'emprise au sol du bâti sur la surface de l'îlot, de la parcelle, ou encore du quartier. |
| Coefficient d'occupation des sols : | Le coefficient d'occupation des sols (COS) détermine la densité de construction admise sur une propriété foncière en fonction de la superficie du terrain. Le COS fixe donc la densité maximale de construction autorisée sur un terrain. En multipliant ce coefficient par la surface du terrain, on obtient la Surface Hors Œuvre Nette (SHON) constructible, c'est-à-dire la surface de plancher constructible. |
| Compacité : | Le facteur de compacité est le rapport de la surface d'enveloppe extérieure au volume total (chauffé) des bâtiments. |
| Conduction : | 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. Les molécules de n'importe quel matériau vibrent et cette vibration devient plus vigoureuse quand la température de la substance augmente. Le flux de chaleur conductif est causé par le transfert d'énergie de des molécules chaudes à forte vibration vers les molécules plus froides. De cette façon, le transfert de l'énergie cinétique de la vibration est converti en chaleur. La conduction thermique au sein des bâtiments correspond au processus de transfert de chaleur à travers des matériaux solides (murs, toits) et ce du côté le plus chaud de l'élément vers celui le plus froid. Son importance dépend de la conductivité du matériau et de l'épaisseur de l'élément considéré. |
| Conductivité thermique : | La conductivité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert de chaleur par conduction. Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous un gradient de température |

- Convection :** En météorologie, la convection constitue le déplacement vertical de l'air et est souvent d'origine thermique ou lié au relief. Plus généralement, la convection est le mouvement d'un fluide, avec transport de chaleur, du fait d'un différentiel de températures. 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 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.
- Dépression :** En météorologie, la dépression est une masse atmosphérique sous basse pression et qui est le siège de mouvements ascendants ; en physique, pression inférieure à celle du milieu environnant.
- Diffusion :** La diffusion est le phénomène par lequel un rayonnement, comme la lumière ou le rayonnement solaire, est dévié dans de multiples directions par une interaction avec d'autres objets. La diffusion peut avoir lieu à la rencontre d'une interface entre deux milieux (dioptré), ou à la traversée d'un milieu (cas de la décomposition de la lumière par un prisme ou effet de l'arc-en-ciel).
- Diffusivité thermique :** La diffusivité représente la vitesse de pénétration et atténuation d'une onde thermique dans un milieu. Physiquement, la diffusivité thermique est la capacité d'un matériau à imposer sa température au milieu extérieur.
- durée d'insolation :** La durée d'insolation désigne la somme des intervalles de temps durant lesquels un objet, un lieu est soumis à une insolation au cours d'une période donnée que l'on choisit, sauf indication contraire, comme égalant un jour entier, soit 24 heures à partir de minuit. Il ne faut pas la confondre avec la durée géographique d'insolation appelée également durée topographique d'insolation qui correspond aux lever et coucher de soleil. (Météo-France)
- Ecologie :** Le terme écologie vient du grec oikos (qui signifie la maison, l'habitat) et logos (qui signifie la science, la connaissance). C'est donc, étymologiquement parlant, la science de la maison, de l'habitat. Cependant, lorsque Haeckel, biologiste allemand partisan de la théorie de l'évolution de Darwin, invente en 1866 le mot écologie, il désigne par ce terme « la science des relations des organismes avec le monde environnant, c'est à dire, dans un sens large, la science des conditions d'existence ». L'usage et les définitions d'un mot évoluant toujours, aujourd'hui une définition souvent admise de l'écologie est la « science qui étudie les relations des êtres vivants entre eux et avec leur milieu. ». C'est celle, par exemple, que l'on trouve dans le petit Larousse illustré de 1991.

- Ecosystème:** Le terme écosystème a été formulé en 1935 par A.G. Tansley, par contraction de l'expression anglaise « ecological system ». En écologie, l'écosystème correspond à l'ensemble formé par une communauté d'êtres vivants (la biocénose) et son environnement physique (le biotope). Un réseau d'interdépendance se crée entre les différents éléments constitutifs de l'écosystème et permet ainsi le développement puis le maintien de la vie. Il existe de nombreuses sortes d'écosystèmes : forestier, montagnoux, aquatiques, marin, regroupés dans la biosphère (ensemble des organismes vivants, végétaux et animaux). L'écosystème, qui désigne avant tout un système naturel, tend à évoluer vers un état stable. Ceci n'exclut pas l'évolution de l'écosystème ou son adaptation au gré des contextes écologiques et physico-chimiques auquel il peut être soumis. Si le système évolue vers un état moins stable, on parle alors de régression écologique.
- Emissivité :** L'émissivité d'une surface est le rapport de l'énergie qu'elle rayonne par celle qu'un corps noir rayonnerait à la même température. C'est donc une mesure de la capacité d'un corps à absorber et à réémettre l'énergie rayonnée. Dans le cas du corps noir, qui absorbe et réémet toute l'énergie, $\varepsilon = 1$. Et pour un corps quelconque, de température uniforme, on aura $\varepsilon < 1$. Un objet d'émissivité faible, en particulier un objet ayant une surface métallique constitue un bon isolant au rayonnement thermique. En effet, de même qu'ils stoppent les rayonnements radiofréquences, les bons conducteurs stoppent le rayonnement infrarouge. Elle dépend de plusieurs facteurs : la température, la direction du rayonnement, et sa longueur d'onde. On suppose parfois, par commodité de calcul, qu'elle ne dépend pas de cette longueur d'onde. C'est l'approximation dite du corps gris.
- Energie cinétique :** L'énergie cinétique est l'énergie que possède un corps du fait de son mouvement. L'énergie cinétique d'un corps est égale au travail nécessaire pour faire passer le dit corps du repos à son mouvement de translation ou de rotation.
- Evaporation :** L'évaporation est le passage progressif de l'état liquide à l'état gazeux, sans ébullition.
- Evapotranspiration :** L'évapotranspiration correspond à l'ensemble des phénomènes d'évaporation de l'eau du sol et des nappes liquides, et de transpiration des végétaux. Elle participe au sein du bilan d'énergie au flux de chaleur latente.
- Facteur de vue du ciel :** 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.

- Force de friction :** La force de friction est la force de résistance au glissement d'un objet au contact de l'autre.
- Force de traînée :** La force de traînée est une force qui s'oppose au mouvement du corps et c'est le travail de cette force qui entraîne une consommation d'énergie.
- Humidité absolue :** L'humidité absolue est définie pour l'air humide (ou d'autres gaz) comme sa teneur en vapeur d'eau. Il s'exprime couramment comme la masse de vapeur d'eau en kg par kg d'air sec (l'air sec correspondant à l'air débarrassé de toute son eau).
- Humidité relative :** L'humidité relative de l'air (ou degré d'hygrométrie) correspond au rapport de la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air, P_{vap} , sur la pression de vapeur saturante ou tension de vapeur à la même température P_{sat} .
- Hydrostatique :** L'hydrostatique est liée à l'équilibre des liquides. Etude des conditions d'équilibre des liquides ou Partie de la mécanique ou de la physique qui traite de l'équilibre des liquides et des pressions qu'ils exercent.
- Îlot de chaleur urbain :** 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.
- Inertie thermique :** L'inertie thermique est la capacité d'un corps à stocker de la chaleur et se caractérise par la capacité thermique. L'inertie contribue en règle générale au confort de l'habitation en atténuant les variations des pointes de températures.
- Insolation :** L'insolation est l'action des rayons du soleil qui frappent un objet. En météorologie, synonyme d'ensoleillement, c'est-à-dire temps pendant lequel un lieu est ensoleillé.
- Locale (échelle) :** L'échelle locale (10^2 à 5×10^4 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, activités, etc.).

| | |
|----------------------------------|---|
| Loi de Stefan-Boltzmann : | En physique, la loi de Stefan-Boltzmann (ou loi de Stefan) établit que la puissance totale rayonnée par unité de surface dans le demi-espace libre du corps noir s'exprime par la formule suivante : $m = \sigma T^4$, où σ est la constante de Stefan-Boltzmann (aussi appelée constante de Stefan). |
| Longueur de rugosité : | Des mouvements turbulents et inhomogènes se créent au sein de ce que l'on nomme la sous-couche rugueuse et dont l'épaisseur est caractérisée par la « longueur de rugosité » z_0 , appelée également rugosité par abus de langage. Cette longueur dépend du type de surface et varie de $5 \cdot 10^{-3}$ m pour la mer à plus de 1m pour les milieux très rugueux comme une forêt ou une zone urbaine. |
| Masse d'air : | La masse d'air est un ensemble de particules d'air ayant une température et une humidité qui leur sont propres au moins pendant un certain intervalle de temps. |
| Micro (échelle) : | La micro-échelle (10^{-2} à 10^3 m) permet de distinguer le microclimat qui existe au niveau d'un bâtiment, d'une rue, d'un arbre, 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. |
| Meso (échelle) : | La méso-échelle (10^4 à 2×10^5 m) correspond à la zone influencée par exemple par la présence d'une agglomération. |
| Morphologie urbaine : | La morphologie urbaine est la répartition spatiale des bâtiments, leur élévation, la forme et l'orientation du réseau de rues. Forme tridimensionnelle d'un groupe de bâtiments ainsi que des espaces qu'ils créent. |
| Noyau de condensation : | 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. |
| Opposable : | Le caractère opposable "se dit d'un acte juridique ou d'un jugement dont les tiers doivent tenir compte" (Petit Larousse, 1991). |
| Pluviométrie : | La pluviométrie est la répartition des pluies dans l'espace et dans les temps. |
| Pression de vapeur : | La pression de vapeur est la pression partielle de la vapeur d'eau d'un corps présent également sous forme liquide ou solide. Lorsque le système est à l'équilibre (les proportions relatives de gaz et liquide ou solide ne varient pas), la pression de vapeur est dite « saturante ». |
| Prospect : | Le prospect est la hauteur des bâtiments sur la largeur de la rue. |

| | |
|---------------------------------------|--|
| Quantité de mouvement : | En physique, la quantité de mouvement est la grandeur physique associée à la vitesse et à la masse d'un objet. |
| Rayonnement : | Le rayonnement est un mode de propagation de l'énergie sous forme d'ondes ou de particules, et ensemble des radiations émises par un corps. |
| Réflectance : | cf. albédo. |
| Résistance thermique : | La résistance thermique permet de quantifier le pouvoir isolant des matériaux pour une épaisseur donnée. Elle s'exprime en $K.m^2.K^{-1}$. Ainsi une paroi est d'autant plus isolante que sa résistance thermique est élevée. $R = e/\lambda = \sum e_i/\lambda_i$ avec R = résistance thermique ($K.m^2.K^{-1}$), e = épaisseur de la paroi (m), λ = conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$). S'il y a plusieurs couches, la résistance de la paroi vaut la somme des résistances de chacune de ces couches. |
| Servitude d'utilité publique : | <p>Les servitudes utilité publique sont des servitudes administratives qui doivent être annexées au plan local d'urbanisme conformément à l'article L126-1 du Code de l'urbanisme français. Ces servitudes se répartissent en quatre catégories :</p> <ul style="list-style-type: none"> • servitudes de protection du patrimoine (monuments historiques et sites) • servitudes relatives à l'utilisation de certaines ressources et équipements • servitudes relatives à la défense nationale • servitudes liées à la salubrité et à la sécurité publique (surfaces submersibles, plans de prévention des risques, protection autour des mines et carrières). <p>Leur liste figure à l'article R. 126-1 du Code de l'urbanisme.</p> |
| Substratum : | Le substratum représente la surface terrestre : sols, végétation, surface en eau, etc. |

Système :

L'approche-système permet de schématiser et simplifier un ensemble complexe (ville, espace naturel, industrie, projet, etc.) et d'aboutir à une forme de modélisation permettant de mieux le comprendre, d'anticiper sa réaction et parfois d'agir sur lui. D'un point de vue structurel, les composants suivants peuvent être distingués au sein d'un système : Les éléments constitutifs (on peut en évaluer le nombre et la nature, même si ce n'est qu'approximativement et ils sont plus ou moins homogènes.) ; une limite (ou frontière) qui sépare la totalité des éléments de son environnement (cette limite est toujours plus ou moins perméable et constitue une interface avec le milieu extérieur) ; des réseaux de relations (les relations peuvent être de toutes sortes et les deux principaux types de relations sont : les transports et les communications) ; des stocks (ou réservoirs, où sont entreposés les matériaux, l'énergie ou l'information constituant les ressources du système qui doivent être transmises ou réceptionnées). Les systèmes peuvent être ouverts ou fermés. Les systèmes ouverts échangent avec leur environnement alors que les systèmes fermés jouissent d'une plus grande autonomie (auto-organisation). Evidemment, la réalité n'est pas si tranchée et aucun système n'est complètement fermé ou ouvert.

Téledétection :

La télédétection désigne, dans son acception la plus large, la mesure ou l'acquisition d'informations sur un objet ou un phénomène, par l'intermédiaire d'un instrument de mesure n'ayant pas de contact avec l'objet étudié. C'est l'utilisation à distance (par exemple, d'un avion, d'un engin spatial, d'un satellite ou encore d'un bateau) de n'importe quel type d'instrument permettant l'acquisition d'informations sur l'environnement. On fait souvent appel à des instruments tels qu'appareils photographiques, lasers, radars, sonars, sismographes ou gravimètres. La télédétection moderne intègre normalement des traitements numériques mais peut tout aussi bien utiliser des méthodes non numériques.

Thermographie :

La thermographie est une technique d'enregistrement graphique des températures de divers points d'un corps par détection du rayonnement infrarouge qu'il émet. Cette technique est utilisée en télédétection.

Toit réfléchissant ou "cool roof" :

Le toit réfléchissant est un système de toit qui possède une réflectance (ou albédo) élevée (habilité 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).

**Urbanisme
opérationnel :**

L'urbanisme opérationnel concerne les opérations d'aménagement (comme les zones d'aménagement concerté ou les lotissements), les outils de financement, ou encore les outils de maîtrise foncière (comme le droit de préemption urbain ou la zone d'aménagement différé).

**Urbanisme
réglementaire :**

L'urbanisme réglementaire détermine, en respectant le droit de l'urbanisme, l'affectation des espaces à travers des plans d'urbanisme et assure le contrôle de ces affectations au travers de différentes procédures d'autorisation (permis de construire notamment). Les principaux documents sont le schéma de cohérence territoriale, le plan local d'urbanisme et la carte communale.

Bibliographie

ABRAHAM, B. FARKH, S. FONTAN, J. MANGILI, S. LEGUILLON, F. LEJEUNE? C. RUOT, B. *Recensement des techniques d'enveloppe dans le bâti d'habitation ancien*. CSTB, novembre 2007, 87 p.

ACKERMAN, B. CHANGNON, S.A. DZURISIN, G. *et al. Summary of METROMEX, volume 2: Causes of Precipitation Anomalies*. Illinois State Water Survey, Urbana, Bulletin 63, 1978.

ADEME. *Approche Environnementale sur l'Urbanisme, Pour une prise en compte de l'environnement dans les opérations d'aménagement, l'AEU en 5 questions*. Dispositif de formation Interrégional Grand Ouest, 1^{ère} journée de sensibilisation, Nantes, 1^{er} juillet 2003 [réf. du 17 juillet 2008], 12 p. Disponible sur : http://www.ademe.fr/paysdelaloire/downloads/AEU_synth5questions.doc

ADEME. *Inscription de critères environnementaux dans les documents d'urbanisme et dans les documents contractuels des opérations d'aménagement*. Synthèse des exposés et débats de la journée d'étude organisée par l'ADEME, Délégation Régionale des Pays de la Loire, Nantes, 15 juin 2006 [réf. du 17 juillet 2008], 21 p. Disponible sur : http://www.ademe.fr/paysdelaloire/downloads/dge/aeu/atelier_juridique_urbanisme_15062006.pdf

ADEME. *Gestion du risque climatique et adaptation aux changements. Ademe et vous – Recherche*, n°1, 25 juillet 2007 [réf. du 10 octobre 2008], 6 p. Disponible sur : <http://www2.ademe.fr>

ADOLPHE, L. CHATELET, A. AIT AMEUR, K. *et al. SAGACités, Système d'Aide à la Gestion des Ambiances urbaines, Rapport final*. MENRT, Action Concertée Incitative Ville, février 2002.

AGENCE NATIONALE POUR L'AMELIORATION DE L'HABITAT. MINISTERE DE L'URBANISME ET DU LOGEMENT. *Habitat ancien : Guide du diagnostic des structures*. Paris : Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat et Ministère de l'Urbanisme et du Logement, 1984, 201 p.

AIDA, Masaru. GOTOH, Kiyoshi. *Urban albedo as a function of the urban structure – a two-dimensional numerical simulation*. *Boundary-Layer Meteorology*, vol.23, n°4, 1982, p.415-424.

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.

AKBARI, H. BRETZ, S. KURN, D.M., HANFORD, J. *Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs*. *Energy and Buildings*, vol.25, 1997, p.117-126.

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.

ALCOFORADO, Maria João. Planning procedures towards high climatic quality cities. Example referring to Lisbon. *Finisterra*, vol. XLI, n°82, 2006, p. 49-64.

ALCOFORADO, Maria João. LOPES, Antonio. ANDRADE, Henrique. VASCONCELOS, João. VIERA, Rute. Climatic guidelines for urban planning in Lisbon. In: Sixth International Conference on Urban Climate, *Göteborg, Suède, 12-16 juin, 2006*.

ALI TOUDERT, Fazia. *Dependence of outdoor thermal comfort on street design in hot and dry climate*. Berichte des Meteorologischen Institutes des Universität Freiburg, Rreiburg, Allemagne, novembre 2005, 224 p.

ALLAIN, Rémy. *Morphologie urbaine – Géographie, aménagement et architecture de la ville*. Paris : Armand Colin, 2004, 254p. (Collection U)

AMAT-ROZE, J.M. Les sociétés humaines et leur environnement face aux risques climatiques. *Médecine et Maladies Infectieuses*, vol.29, 1999, p.277-284.

ARNFIELD, A.J. Street design and urban canyon solar access. *Energy and Buildings*, vol.14, n°2, 1990, p. 117-131.

ARTIS, David A. CARNAHAN, Walter H. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote sensing of environment*, vol.12, 1982, p. 313-329.

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.

ASCHER, François. *Les nouveaux principes de l'urbanisme*. Editions de l'Aube, 2004, 103 p. (collection l'Aube poche essai)

ATELIER PARISIEN D'URBANISME. *L'évolution de la population de Paris. Tome 1: Évolutions 1954-1999*. Paris : Atelier Parisien d'Urbanisme, décembre 2001 [réf. du 10 octobre 2008], 53 p. Disponible sur : <http://www.apur.org/>

ATELIER PARISIEN D'URBANISME. La densité, un bon outil pour connaître Paris ? *Notes de 4 pages* [en ligne]. mars 2002, n°4 [réf. du 10 octobre 2008], 4 p. Disponible sur : <http://www.apur.org/>

ATELIER PARISIEN D'URBANISME. Développer le végétal à Paris, les nouvelles règles du Plan local d'urbanisme de Paris. *Notes de 4 pages* [en ligne]. octobre 2004, n°13, [réf. du 10 octobre 2008], 4p. Disponible sur : <http://www.apur.org/>

ATELIER PARISIEN D'URBANISME. *Consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes*. Paris : Atelier Parisien d'Urbanisme, décembre 2007, 46 p.

ATKINSON, B.W. The effect of an urban area on the precipitation from a moving thunderstorm. *Journal of Applied Meteorology*, vol.10, n°1, 1971, p. 47-55.

AUER, Jr. A.H. Correlation of land use and cover with meteorological anomalies. *Journal of Applied Meteorology*, vol.17, 1978, p. 636-643.

BAKLANOV, A. MESTAYER, P. CLAPPIER, A. ZILITINKEVITCH, S. JOFFRE, S. MAHURA, A. NIELSEN, N.W. On the parameterisation of the urban atmospheric sublayer in meteorological models. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, vol.5, 2005, p. 12119-12176.

BARLES, Sabine. Le métabolisme de Paris et de la région Ile-de-France. In : Mairie de Paris (éd), *Paris sous l'œil des chercheurs*. Paris : Belin, 2007, 206 p.

BAUMÜLLER, J. HOFFMAN, U. REUTER, U. *Climate booklet for urban development. References for zoning and planning*. Baden-Württemberg Innenministerium, 2005 [réf. du 29 mars 2008], 380 p. Disponible sur : <http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/>

BEAUGRAND, Grégory. Un réchauffement inquiétant. *TDC*, n°906, 15 au 31 décembre 2005.

BELZITI, Daniela. SOUAMI, Taoufik. *Rapport de l'activité 6 : Impacts sur les documents d'urbanisme – Projet RIVES, protection du territoire des risques naturels*. CSTB, 2007, 184 p.

BENZERZOUR, Mohamed. *Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur « morpho-climatique »*. Thèse : sciences pour l'Ingénieur, option architecture, Ecole d'Architecture de Nantes, 2004, 325 p.

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

BERRIER, Hervé. Enjeux et modalités du renforcement de la réglementation thermique de la construction en France. In : JOURNEES DE L'EQUIPEMENT(éd.), Table ronde sur la construction, performances énergétiques des bâtiments, *Varsovie, 16 et 17 mars 2000* [réf. du 9 février 2008], 30 p. Disponible sur : <http://www2.urbanisme.equipement.gouv.fr/cdu/texteintegral/journeesequipement/constructio n.rtf>,

BERTRAND, François. LARRUE, Corinne. *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, juillet 2007, 64p.

BESANCENOT, Jean-Pierre. Incidences possibles du réchauffement climatique sur la santé en France métropolitaine et dans les DOM-TOM au XXI^e siècle. In : PREMIER MINISTRE, MINISTERE DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT. *Impacts potentiels du changement climatique en France*, 1999 [réf. du 19 juin 1999]. Disponible sur : <http://www.agora21.org/mies/chan-clim.html>

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

BEST, Martin. BETTS, Richard. The impact of climate change on our cities. *The impact of climate change on our cities* [en ligne]. 2004 [réf. du 10 octobre 2006]. Disponible sur : http://ams.confex.com/ams/84Annual/techprogram/paper_74035.htm

BITAN, A. The methodology of applied climatology in planning and building. *Energy and Buildings*, vol.11, n°1-3, 1988, p. 1-10.

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

BONAN, Gordon. *Ecological climatology – concepts and applications*. Cambridge University Press, 2002, 678 p.

BONELLO, Yves-Henri. *La ville*. 2^e éd. Paris : Presse Universitaire de France, 1998, 125 p. (Que sais-je ?)

BOONE, Aaron. *Modélisation des processus hydrologiques dans le schéma de surface ISBA : Inclusion d'un réservoir hydrologique, du gel et modélisation de la neige*. Thèse : hydrologie et météorologie, Toulouse III (Paul Sabatier), 2000, 236 p.

BORNSTEIN, R.D. Observation of the urban heat island in New-York city. *Journal of Applied Meteorology*, vol.7, 1968, p. 575-582.

BORNSTEIN, Robert. LIN, Qinglu. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. *Atmospheric Environment*, vol. 34, n°3, 2000, p. 507-516.

BOSEL, Hartmut. *Indicators for Sustainable Development: Theory, Method, Applications. A Report to the Balaton Group*. Winnipeg (Canada): International Institute for Sustainable Development, 1999, 125 p.

BOZONNET, Emmanuel. *Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments – Cas de la rue canyon*. Thèse : Génie Civil, La Rochelle, 2005, 175 p.

BRAHAM, Roscoe R. DUNGEY, Maureen J. A study of urban effects on radar first echoes. *Journal of Applied Meteorology*, vol.17, 1978, p. 644-654.

- BRANDT, Karsten. Does an « ideal » urban climate exist? In: Sixth International Conference on Urban Climate, Göteborg, Suède, 12-16 juin 2006.
- BRESSOL, Elyane. *Les enjeux de l'après Kyoto*. Paris : Conseil Economique et Social, 2006, 84 p.
- BREST, Jean-Pierre. *Réflexion sur la maîtrise de la climatisation dans le bâtiment* [en ligne]. 29 juillet 2004, [réf. du 24 mai 2007]. Disponible sur : <http://www.ingenieur-tpe.net/>
- BRETZ, S.E. AKBARI, H. Long-term performance of high albedo roof coatings. *Energy and Buildings*, vol.25, 1997, p. 159-167.
- BRIDGMAN, H. WARNER, R. DODSON, J. *Urban Biophysical Environments*. Oxford: Oxford University Press, 1995, 166 p.
- BRODACH, Ari. GOFFI, Mélanie. La politique de la ville : une trajectoire de développement urbain durable ? *Développement Durable & Territoires* [en ligne]. 17 nov. 2005. [réf. du 10 octobre 2008]. Disponible sur : <http://developpementdurable.revues.org/document1493.html>
- BULLETIN EUROPEEN DU MONITEUR. Le développement urbain durable dans la politique régionale européenne de 2007 à 2013. *Bulletin Européen du Moniteur*, 9 janvier 2006, n°749, p. 13-18.
- BRUSE, Michael. Simulating microscale climate interactions in complex terrain with a high-resolution numerical model: A case study for the Sydney CBD Area (Model Description). In: Proceedings International Conference on Urban Climatology and International Congress of Biometeorology, Sydney, Australia, 8-1. Novembre 1999, 6 p.
- BRUSE, Michael. ENVI-met V3.0, a microscale urban model. *IAUC Newsletter* [en ligne]. juin 2004, n°5, [réf. du 10 octobre 2006], p. 2-4. Disponible sur : <http://www.urban-climate.org/>
- BUECHLEY, Robert W. VAN BRUGGEN, John. TRUPPI, Lawrence E. Heat island = Death island? *Environmental research*, vol. 5, 1972, p. 85-92.
- CANTAT, Olivier. Influence de l'urbanisation sur le climat de l'agglomération parisienne, *physio-géo*, n°16, 1986, p. 25-40.
- CANTAT, Olivier. *Téledétection spatiale et microclimats – Le cas de la région Ile-de-France*. Institut d'aménagement et d'Urbanisme de la Région Ile de France (IAURIF), 1987, 190 p.
- CANTAT, Olivier. L'incidence des gradients thermiques de surface sur les précipitations en Ile-de-France. Les apports de la téledétection spatiale de surface. *Physio-Géo.*, 1989, n°19, p. 15-25.

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

CANTAT, Olivier. L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, 2004, n°191, p.75-102.

CERTU. *Prendre en compte le développement durable dans un projet, guide d'utilisation de la grille RST₀₂*. CERTU, 2006, septembre 2006, 71 p.

CHALINE, Claude. Les étapes d'un interface complexe entre ville et environnement. In : WACKERMANN, Gabriel (éd.), *Ville et environnement*. Paris : Ellipses, 2005, 400 p. (collection Carrefours)

CHANDLER. Absolute and relative humidities in towns. *Bulletin of the American Meteorological Society*, n°48, 1967, p. 394-399.

CHANGNON, Stanley A. HUFF, Floyd A. SEMONIN, Richard G. METROMEX: an investigation of inadvertent weather modification. *Bulletin American Meteorological Society*, vol.52, n°10, octobre 1971, p.958-967.

CHANGNON, S.A. SEMONIN, R.G. HUFF, F.A. A hypothesis for urban rainfall anomalies. *Journal of Applied Meteorology*, vol.15, 1976, p. 544-560.

CHANGNON, Stanley A. HUFF, Floyd A. SCHICKEDANZ, Paul T. VOGEL, John L. *Summary of METROMEX, volume 1: Weather Anomalies and Impacts*. Illinois State Water Survey, Urbana, Bulletin 62, 1977.

CHANGNON, Stanley A. Inadvertent weather modification in urban areas: Lessons for global climate change. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol.73, n°5, 1992, p. 619-627.

CHARLOT-VALDIEU, Catherine. OUTREQUIN, Philippe. La ville et le développement durable. *Cahier du CSTB*, n°3106, février 1999.

CHARLOT-VALDIEU, Catherine. EMELIANOFF, Cyria. OUTREQUIN, Philippe. Le développement durable urbain et l'agenda 21 local : évolution des documents d'urbanisme et de l'approche quartier. *Cahier du CSTB*, n°3331, avril 2001.

CHATELET, A. FERNANDEZ, P. LAVIGNE, P. *Architecture climatique*. Aix-en-Provence : Edisud, 1998, tome 2, 159 p.

CHATZIDIMITRIOU, Angeliki. CHRISOMALLIDOU, Niobe. YANNAS, Simos. Ground surface materials and microclimates in urban open spaces. In: PLEA2006, The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, *Genève, Suisse, 6-8 septembre 2006*.

CHERY, Vincent. Inondations : quels risques pour l'agglomération parisienne ? *Les annales des Mines – réalités industrielles : L'Ile de France, Logistique et Sécurité pour une région de 11 millions d'habitants*, mai 2000, p. 73-79.

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.

CHIRKOV, Vadim Anthropogenic Heating of the Atmosphere. *Anthropogenic Heat* [en ligne]. 2003, [réf. du 10 octobre 2008]. Disponible sur : <http://www.iiasa.ac.at/Research/TNT/WEB/heat/>

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.

CHUINE, Isabelle. SEGUIN, Bernard. *Système d'Information Phénologique pour l'Etude et la Gestion des Changement Climatiques*. Rapport annuel d'activité du GDR. 2006, 48p.

CICEK, I. TURKOGLU, N. Urban effects on precipitation in Ankara. *Atmosfera*, vol.18, n°3, 2005, p. 173-187.

CHUINE, Isabelle. YIOU, Pascal. VIOVY, Nicolas. SEGUIN, Bernard. DAUX, Valérie. LE ROY LADURIE, Emmanuel. Historical phenology: Grape ripening as a past climate indicator. *Nature*, n°432, Novembre 2004, p. 289-290.

CLERGEAU, Philippe. CROCI, Solène. 2006. L'urbanisation induit-elle une homogénéisation de l'avifaune ? In : Colloque du Musée National d'Histoire Naturelle « Le réveil du Dodo », Paris, 7-9 mars 2006.

CLERGEAU, Philippe. SAVARD, Jean-Pierre L. MENNECHEZ, Gwenalle. FALARDEAU, Gilles. Bird abundance and diversity along an urban-rural gradient: a comparative study between two cities on different continents. *The Condor*, vol. 100, n°3, août 1998, p. 413-425.

CLUZEL, Denis. Habitat et santé : la maison milieu de vie. *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, n°449, novembre 1986, p. 53-76.

COMINSKY, R.J. HUBER, G.A. KENNEDY, T.W. ANDERSON, M. *The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays*. SHRP-A-407, National Research Council, Washington, DC, 1994.

CRICHTON, David. Role of Insurance in Reducing Flood Risk. *The Geneva Papers*, vol. 33, 2008, p. 117-132

CROS, B. DURAND, P. CACHIER, H. DROBINSKI, Ph. FREJAFON, E. KOTTMEIER, C. PERROS, P.E. PEUCH, V.-H. PONCHE, J.-L. ROBIN, D. SAID, F. TOUPANCE, G.

WORTHMAN, H. The ESCOMPTE program: an overview. *Atmospheric Research*, n°69, 2004, p. 241-279.

CRUTZEN, Paul J. New directions: The growing urban heat and pollution « island » effect – impact on chemistry and climate. *Atmospheric Environment*, vol. 38, 2004, p. 3539-3540.

DAGORNE, Andrée. DARS, René. *Les risques naturels*. 2^e éd. Paris : Presses Universitaires de France, 2001, 129 p. (Que sais-je ?)

DAVENPORT, A.G. GRIMMOND, C.S.B. OKE, T.R. WIERINGA, J. Estimating the roughness of cities and sheltered country. In: Proceedings of the 12th Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Boston, USA, 2000, p. 96-99.

DE PARCEVAUX, Sané. HUBERT, Laurent. *Bioclimatologie, concepts et applications*. Éditions Quae, 2007, 336 p.

DESJARDINS, Xavier. Le Grenelle de l'environnement face à la ville ou l'épuisement des modèles classiques d'action publique. Communication en interne, CSTB, décembre 2007.

DESJARDINS, Xavier. Villes rêvée et ville réelle, veut-on vraiment lutter contre l'étalement urbain ? *Etudes foncières*, n°131, janvier-février 2008, p 16-19.

DETTWILLER, J. L'évolution séculaire de la température à Paris. *La Météorologie*, 1978, n°13, p. 95-130.

DGUHC. CERTU. *Le projet d'Aménagement et de Développement Durable du P.L.U.* DGUHC et CERTU, avril 2002, 87 p. (Collection Référence)

DHAKAL, S. HANAKI, K. Improvement of urban thermal environment by managing heat discharge sources and surface modification in Tokyo. *Energy and Buildings*, 2002, vol.34, p. 13-23.

DOUSSET, Bénédicte. GOURMELON, Françoise. MAURI, Elena. Application of satellite remote sensing for urban risk analysis: a case study of the 2003 extreme heat wave in Paris. In: Urban Remote Sensing Joint Event, Paris, 2007.

DUBOIS-MAURY, Jocelyne. CHALINE, Claude. *Les risques urbains*. 2^e éd. Paris : Armand Collin, 2004, 207 p. (Collection U – géographie)

DUCHENE-MARULLAZ, Philippe. *Recherche exploratoire en climatologie urbaine*. CSTB, 1980, 86 p.

DUMONT, Marc. L'espace public, prisme efficace des recompositions de l'action publique ? *L'espace public, prisme efficace des recompositions de l'action publique* [en ligne]. 11 mars 2005, [réf. du 10 octobre 2008]. Disponible sur : <http://espacestemp.net/document1178.html>

DUPONT, Sylvain. CALMET, Isabelle. MESTAYER, Patrice. Urban canopy modelling influence on urban boundary layer simulation. *4th symposium on Urban Climatology*, 20-24 Norfolk, Etats-Unis, VA. Proceedings AMS, Mai 2002, p. 151-152.

DUPONT, Sylvain. OTTE, Tanya L. CHING, Jason K. S. Simulation of meteorological fields within and above urban and rural canopies with a mesoscale model. *Boundary-Layer Meteorology*, vol.113, n°1, Octobre 2004, p. 111-158.

DUVIGNEAUD, P. L'écologie et l'homme: biosphère, noosphère et sophiosphère. In ESCANDE, J.-P. DUVIGNEAUD, P. BOUCGARDEAU, H. *Santé de l'homme et environnement*, Symposium international, Luxembourg. Paris : Sang de la Terre, 1988, 301 p.

DYURGEROV, Mark B. MEIER, Mark F. Twentieth century climate change: Evidence from small glaciers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol.97, n°4 , 15 février 2000, p. 1406-1411.

ELIASSON, Ingegård. Urban geometry, surface temperature and air temperature. *Energy and buildings*, vol.15, 1990/91, p. 141-145.

ELIASSON, Ingegård. The use of climate knowledge in urban planning. *Landscape and urban planning*, vol.48, n°1-2, 2000, p. 31-44.

ELLEFSEN, R. Mapping and measuring buildings in the urban canopy boundary layer in ten US cities. *Energy and Buildings*, vol.15-16, 1990/91, p. 1025-1049.

EMELIANOFF, C. Les villes européennes face au développement durable : une floraison d'initiatives sur fond de désengagement politique. *Cahier du PROSES*, n°8, Fondation Nationale des Sciences Politiques (FNSP), Paris, janvier/février 2004, 34 p.

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

ESCOURROU, Gisèle. Le climat de l'agglomération parisienne. *L'information géographique*, 1986, n°50, p. 96-102.

ESCOURROU, G. La spécificité du climat de l'agglomération parisienne. *Revue de géographie de Lyon*, vol.65, n°2, 1990, p. 85 à 89.

ESCOURROU, Gisèle. *Le climat et la ville*. Editions Nathan, 1991, 190 p.

ESTOURNEL, Claude. VEHIL, Raoul. GUEDALIA, Daniel. FONTAN, Jacques. DRUILHET, Aimé. Observations and modeling of downward radiative fluxes (solar and infrared) in urban/rural areas. *Journal of climate and applied meteorology*, vol. 22, 1983, p. 134-142.

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.

FIJALKOV, Yankel. *Sociologie de la ville*. Paris : La découverte, 2004, nouvelle édition, 120 p. (repères ; n°331)

GARCIA DE CORTAZAR, Iñaki Aauri. BRISSON, Nadine. SEGUIN, Bernard. Estimation de l'impact du changement climatique sur les résultats agronomique de la vigne avec le modèle STICS. In : Actes Mondiaiviti, *Bordeaux, 1-2 décembre 2004*.

GAUZIN-MULLER, D. *L'architecture écologique, 29 exemples européens*. Paris : Le Moniteur, 2001, 290 p.

GEODE. L'inondation de Paris en 1910 : De l'événement aux réflexions actuelles. *Aquadoc France* [en ligne]. 30 avril 2004, [réf. du 10 octobre 2008]. Disponible sur : http://www.aquadoc.fr/article.php3?id_article=159

GEROS, V. SANTAMOURIS, M. KARATASOU, S. TSANGRASSOULIS, A. PAPANIKOLAOU, N. On the cooling potential of night ventilation techniques in the urban environment. *Energy and buildings*, vol. 37, 2005, p. 243-257.

GHORRA-GOBIN, Cynthia. De la ville à l'urban sprawl : la question métropolitaine des Etats-Unis. *Cercles 13*, 2005, p. 123-138.

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'EVOLUTION DU CLIMAT. *Changements climatiques 2007 : les éléments scientifiques*. GIEC, 2007(a).

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'EVOLUTION DU CLIMAT. *Bilan 2007 des changements climatiques : adaptation et vulnérabilité*. GIEC, 2007(b).

GILL, Susannah. *Literature review: Impacts of Climate Change on Urban Environments*. University of Manchester, Centre For Urban and Regional Ecology, janvier 2004, 72 p.

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 : Editions du Moniteur, 1978, 460 p.

GIVONI, B. *Climate considerations in building an Urban Design*. John Wiley & Sons, 1998, 480 p.

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.

GOMEZ, F. TAMARIT, N. JABALOYES, J. Green zones, bioclimatics studies and human comfort in the future development of urban planning. *Landscape and Urban Planning*. 2001, vol.55, n 3, p. 151-161.

GRAFMEYER, Yves. *Sociologie urbaine*. Paris : Nathan, 1995, 128 p. (collection 128)

GRIDAUH, GIS Socio-Economie de l'Habitat. *L'intégration de l'environnement dans les documents d'urbanisme*, compte rendu du séminaire du 6 février, 2005, 56 p.

GRIMMOND, C.S.B. OKE, T.R. Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form. *Journal of applied climatology*, vol.38, n°9, 1999(a), p. 1262–1292.

GRIMMOND, C.S.B. OKE, T.R. Heat Storage in Urban Areas: Local-Scale Observations and Evaluation of a Simple Model. *Journal of Applied Climatology*, vol.38, n°7, 1999(b), p. 922-940.

GRIMMOND, C. S. B. OKE, T. R. Turbulent Heat Fluxes in Urban Areas: Observations and a Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme (LUMPS). *Journal of applied meteorology*, vol.41, 2002, p. 792-810.

GRIMMOND, C. S. B. CLEUGH, H. A. OKE, T. R. An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. *Atmospheric Environment*, vol.25, n°3, 1991, p. 311-326.

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

GROLEAU, Dominique. FRAGNAUD, Fernand. ROSANT, Jean-Michel. Simulation of the radiative behavior of an urban quarter of Marseille with SOLENE model. In: Fifth International Conference on urban climate, *Lodz, Pologne, 1-5 septembre 2003*.

GUIBET, Jean-Claude. Carburants liquides. *Techniques de l'ingénieur*, BE 8545, avril 1998.

GUILLAUIC, Isabelle. Les forêts urbaines. In : 2^e colloque de l'EDVE : Ville éphémère – Ville durable – Quels acteurs pour la ville de demain ? *Champs-sur-Marne, 17 janvier 2008*.

GUILLERME, André. *Les temps de l'eau : la cité, l'eau et les techniques*. Seyssel : Champ vallon, 1990, 263 p. (Milieux)

GROMAIRE, M. C. WAINTROP, N. CHEBBO, G. CONSTANT, A. Importance of zinc roofs in Paris and their impact on urban runoff pollutant loads = Importance des toitures en zinc à Paris et leur impact sur la pollution des eaux urbaines. In : Congrès NOVATECH 2001 : les nouvelles technologies en assainissement pluvial, *Villeurbanne, 25-27 juin 2001*.

GUO, Xueliang. FU, Danhong. WANG, Jing. Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing City. *Atmospheric Research*, vol.82, 2006, p. 112-126.

GUYOT, Alain. Le vent - l'architecture et l'aménagement urbain, Intervention de cours - conférence en 4eme année à l'école d'architecture de Marseille Luminy [en ligne]. [réf. du jeudi 12 juillet 2007]. Disponible sur: <http://www.marseille.archi.fr/~M35/M45/vent01.pdf>

HAGE, K.D. Urban-Rural Humidity Differences. *Journal of Applied Meteorology*, vol.14, 1975, p. 1277-1283;

HALLEGATTE, Stéphane. Adaptation to climate change: do not count on climate scientists to do your work. *Reg-Markets Center*, Related Publication 08-01, February 2008.

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.

HEMON, Denis. JOUGLA, Eric. *Surmortalité liée à la canicule d'août 2003 – Rapport d'étape (1/3). Estimation de la surmortalité et principales caractéristiques épidémiologiques*. Paris : INSERM, septembre 2003, 59 p.

HJELMFELT, Mark R. Numerical simulation of the effects of St. Louis on mesoscale boundary layer airflow and vertical air motion: Simulations of urban vs non-urban effects. *Journal of Applied Climatology*, vol.21, n°9, 1982, p. 1239-1257.

HUFF, F.A. VOGEL, J.L. Urban, topographic and diurnal effects on rainfall in St. Louis region. *Journal of Applied Meteorology*, vol.17, 1978, p.565-577.

HUGREL, Charlotte. JOUMARD, Robert. *Transport routier – Parc, usage et émissions des véhicules en France de 1970 à 2025*. INRETS, rapport LTE n°0420, septembre 2004, 133 p.

HUYNEN, MM. MARTENS, P. SCHRAM, D. WEIJENBERG, MP. KUNST AE. The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the Dutch population. *Environmental Health Perspectives*, vol.109, n°5, 2001, p. 463–470.

ICHINOSE, Toshiaki. SHIMODOZONO, Kazuhiro. HANAKI, Kazuhiro. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmospheric Environment*, vol.33, 1999, p. 3897-3909.

INSTITUT D'AMENAGEMENT ET D'URBANISME DE LA REGION ILE-DE-FRANCE. Appréhender la densité - Les repères historiques. *IAURIF : Note rapide sur l'occupation du sol*, n°382, juin 2005, 6 p.

INSEE. Projections de population à l'horizon 2050 : un vieillissement inéluctable, rédigé par Chantal BRUTEL, *Economie et statistique*, n°355-356, mars 2002.

INSTITUT DE VEILLE SANITAIRE. *Impact sanitaire de la vague de chaleur d'août 2003 en France – Bilan et perspectives*. Institut de Veille Sanitaire, octobre 2003, 120 p.

INSTITUT DE VEILLE SANITAIRE. *Vague de chaleur de l'été 2003 : relations entre températures, pollution atmosphérique et mortalité dans neuf villes française, rapport d'étude*. INVS, septembre 2004, 44 p.

INSTITUT DE VEILLE SANITAIRE. *Etude des facteurs individuels et des comportements ayant pu influencer la santé des personnes âgées pendant la vague de chaleur de 2003*. INVS, février 2006, 60 p.

JAUREGUI, E. Possible impact of urbanization on the thermal climate of some large cities in Mexico. *Atmosfera*, 2005, vol.18, n°4, p. 247-252.

JAUREGUI, Ernesto. ROMALES, Ernesto. Urban effects on convective precipitation in Mexico city. *Atmospheric Environment*, vol.30, n°20, 1996, p. 3383-3389.

JONAS, Olivier. *Rêver la ville, voyage au pays des villes rêvées : l'Oniropolis, l'Utopia, la Virtuapolis, la Cyberpolis, la Futurapolis*. Editions de la DGUHC, 2003, 134 p.

KATZSCHNER, Lutz. The Urban Climate as a Parameter for Urban Development. *Energy and Buildings*, vol.11, 1988, p.137-147.

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

KLYSIK, K. Spatial and seasonal distribution of anthropogenic heat emissions in Lodz, Poland. *Atmospheric Environment*, vol.30, n°20, 1996, p. 3397-3404.

KLYSIK, K. FORTUNIAK, K. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Lodz, Poland. *Atmospheric Environment*, vol.33, 1999, p. 3885-3895

KONDOH, A. NISHIYAMA, J. Changes in hydrological cycle due to urbanization in the suburb of Tokyo Metropolitan Area, Japan. *Advances In Space Research*, vol.26, n°7, 2000, p. 1173-1176.

KRPO, Andrea. CLAPPIER, Alain. MULLER, Clive. Numerical simulation of the interaction between buildings and atmosphere over large urban areas. In: colloque numérique suisse (Schweizer Numerik Kolloquium), *Lausanne, 12 April 2006*.

KUHN, Ingolf. KLOTZ, Stefan. Urbanization and homogenization – Comparing the floras of urban and rural areas in Germany. *Biological Conservation*, vol. 127, 2006, p. 292-300.

LAFORE, P. STEIN, J. ASECIO, 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, Helmut. The meteorologically utopian city. *Bulletin American Meteorological Society*, vol.54, n°2, 1973, p.86-89.

- LANDSBERG, Helmut 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.
- LAROCHE, Dany. MITCHELL, Anne-Marie. PELOQUIN, Sophie. Les toits verts aujourd'hui ; c'est construire le Montréal de demain. [en ligne]. 2004, [réf. du 10 octobre 2008], 20 p. Disponible sur : <http://www2.ville.montreal.qc.ca/ocpm/pdf/41/8aa.pdf>
- LARUELLE, Nicolas. Structure de l'espace urbain francilien et contrainte énergétique. In : Ateliers de prospective de l'IAURIF : les contraintes énergétiques et les mutations urbaines Contribution à l'atelier 5 - Gestion de l'espace (1) : Formes urbaines, densités et enjeux énergétiques, Paris, 11 mai 2007.
- LARRUE, Corinne. BERTRAND, François. Les processus d'institutionnalisation de la question climatique. Anticipations et réactions des territoires face aux effets du changement climatique. In : Journées de l'Association Natures Sciences Sociétés Dialogues, Paris, 7-8 octobre 2008.
- 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.
- LEROYER, Sylvie. CALMET, Isabelle. MESTAYER, Patrice G. A sensitivity of urban boundary layer on canopy description. In: 9th International Conference within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Garmisch-Partenkirchen, Allemagne, 1-4 juin 2004.
- LIEBARD, Alain. DE HERDE, André. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques. Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Le Moniteur, 2006, 776 p.

LINKE, F. Das Klima der Groszstadt. In : LINKE, F. DE RUDDER, B (éd.), *Biologie der Groszstadt*, Dresden : Theodor Steinkopff, 1940.

LONDON CLIMATE CHANGE PARTNERSHIP. *Adapting to climate change : Lessons for London*. Londres : Greater London Authority, 2006, 158 p.

LORRAIN, Dominique. La gig@city, nouveau lieu de la production de capital. *Réalités industrielles - Annales des Mines*, février 2008, p. 63-69.

MANIN, Anaïs. Améliorer le climat urbain grâce aux petits espaces verts. *Bulletin Electronique Allemagne*, n°350, 2007.

MARTILLI, Alberto. *Development of an urban turbulence parameterisation for mesoscale atmospheric models*. Thèse : sciences, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne, Suisse, 2001, 192 p.

MARTILLI, Alberto. CLAPPIER, Alain. ROTACH, Mathias W. an urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. *Boundary-Layer Meteorology*, vol.104, 2002, p.261–304.

MARTILLI, Alberto. ROULET, Yves-Alain. JUNIER, Martin. *et al.* On the impact of urban surface exchange parameterisations on air quality simulations: the Athens case. *Atmospheric environment*, vol.37, 2003, p. 4217-4231.

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

MASSON, Valéry. Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. *Theoretical and Applied Climatology*, vol.24, 2006, p. 35-45.

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.

MAYERE, Jacques. Règles Neige et Vent NV 65. *Techniques de l'Ingénieur*, dossier c3305, mai 2001.

MEADOWS, D. H., et al. *The Limits to Growth*. Potomac Associates, 1972.

MENUT, Laurent. *Etude expérimentale et théorique de la couche limite atmosphérique en agglomération parisienne*. Thèse : Physique de l'Atmosphère, Paris VI, 1997, 213 p.

MESTAYER, P.G. ANQUETIN, S. « climatology of cities ». In 3rd International Conference on Air Pollution, Air Pollution 95, Actes du colloque, 1995.

MESTAYER, Patrice G. DUPONT, Sylvain. CALMET, Isabelle. *Et al.* SM2-U, Soil Model for Sub-Meso scales – Urbain, Model Description. In: Contribution to WP, Deliverable D4.4 of FUMAPEX, Nantes, ECN, printemps 2004.

- MERLIN, Pierre. *L'urbanisme*. 6^e éd. Paris : Presses Universitaires de France, 2005, 127 p. (Que sais-je !,)
- 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.
- MIES. Bilan de la mise en œuvre du Plan Climat. In : *Actes des Rendez Vous Climat des 14 et 15 novembre 2005*, janvier 2006, 189 p.
- MILLS, Gerald M. Simulation of the energy budget of an urban canyon – I. Model structure and sensitivity test. *Atmospheric environment*, vol.27B, n°2, 1993, p. 157-170.
- MILLS, Gerald. The meteorologically utopian city revisited. In: 5th International Conference on Urban Climate, *Lodz, Pologne, 2003*.
- MILLS, Gerald. Cities as agents of global change. *International Journal of Climatology*, n°27, 2007, p. 1849-1857
- MINISTERE DE L'ECOLOGIE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE. *Les tempêtes, dossier d'information*. MEDD, décembre 2002, 26 p.
- MINISTERE DE L'ECOLOGIE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE. *Les inondations, dossier d'information*. MEDD, août 2004, 22 p.
- MINISTERE DE L'EQUIPEMENT, DIRECTION GENERALE DE L'URBANISME, DE L'HABITAT ET DE LA CONSTRUCTION. MINISTERE DE L'ECOLOGIE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE. *Promouvoir l'environnement et l'aménagement durable dans les documents d'urbanisme*. Paris : Ministère de l'équipement, direction générale de l'urbanisme, de l'habitat et de la construction et Ministère de l'écologie et du développement durable, juin 2007, 26 p.
- MORAND-DEVILLER, Jacqueline. *Le droit de l'environnement*. 7^e édition. Paris : Presses Universitaires de France, 2006, 125 p. (Que sais-je ?)
- MURAKAMI, Shuzo. MOCHIDA, Akashi. OOKA, Ryoza. *et al.* Evaluation of the Impacts of Urban Tree Planting in Tokyo Based on Urban Heat Balance Model. In: *11th International Conference on Wind Engineering*, vol.2, 2003, p. 2641-2648.
- MUSY, Marjorie. RAMOS, Fabien. SIRET, Daniel. MOREAU, Guillaume. MARENNE, Christian. Développement d'un SIG 3D dédié au diagnostic des potentialités environnementales des bâtiments. *Revue Internationale de Géomatique*, vol.16, n°1, 2006, p. 71-91.
- 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.

NAKAMURA, Y. OKE, T. R. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment*, vol.22, n°12, 1988, p. 2691-2700

NASCIMENTO, Iuli. Mieux comprendre le développement durable. *IAURIF : Note rapide sur le développement durable*, n°346, décembre 2003, 4 p.

NIKOLOPOULOU, Marialena. BAKER, Nick. STEEMERS, Koen. Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter. *Solar Energy*, vol.70, n°3, 2001, p. 227-235.

NIKOLOPOULOU, Marialena. STEEMERS, Koen. Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings*, vol.35, 2003, p. 95-101.

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.

NOILHAN, J. MAHFOUF, J-F. The ISBA land surface parameterisation scheme. *Global and Planetary Change*, vol.13, 1996, p. 145-159.

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

OBSERVATOIRE REGIONAL DE L'ENVIRONNEMENT DE BOURGOGNE. *Sécheresse et canicule 2003 – rapport de présentation*. Observatoire régional de l'environnement de Bourgogne, octobre 2004, 100 p.

OKE, T.R. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, vol.7, 1973, p. 769-779.

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. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island : Comparison of scale model and field observations. *Journal of climatology*, vol.1, 1981, p. 237-254.

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. Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning. *Energy and buildings*, vol.7, n°1, 1984, p. 1-10.

OKE, T.R. *Boundary Layer Climates*. 2^e 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(a).
- OKE, T.R. *Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites*. World Meteorological Organization, Report n°81, 2004(b), 47 p.
- OKE, T.R. Towards better scientific communication in urban climate. *Theoretical and applied climatology*, vol.84, n°1-3, 2006, p. 179-190.
- OKE, T.R. HANNELL, F.G. The form of the urban heat island in Hamilton, Canada. In: *Urban climates*. WMO Tech. Note, n°108, 1970, p.113-126.
- OKE, T.R. JOHNSON, G.T. STEYN, D.G. WATSON, I.D. Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night – part 2: Diagnosis and causation. *Boundary Layer Meteorology*, vol.56, n°3, 1991, p. 275-294.
- 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.
- ONERC. *Conséquences du réchauffement climatique sur les risques liés aux évènements météorologiques extrêmes : sur la base des dernières connaissances scientifiques, quelle action locale ?* Paris : ONERC, 2003, 70 p.
- ONERC. *Stratégie d'adaptation au changement climatique*. Document de travail soumis à consultation, version V.1 du 8 juillet 2005, Paris, 43 p.
- PAGNEY, Pierre. *La climatologie*. 7^e éd. Paris : Presse Universitaire de France, 2000, 127 p. (Que sais-je ?)
- PARRIS, Kirsten M. HAZELL, Donna L. Biotic effects of climate change in urban environments: the case of the grey-headed flying-fox (*Pteropus poliocephalus*) in Melbourne, Australia. *Biological conservation*, vol.124, 2005, p. 267-276.
- PENEAU, Jean-Pierre. Des densités aux rugosités, les modalités instrumentales d'une transposition. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, 1995, n°67, p. 128-134.
- PERBEN, Dominique. *Imaginer les métropoles d'avenir*. Rapport de l'Assemblée Nationale, Janvier 2008, 79 p.

PETERSON, James T. FLOWERS, Edwin C. Interactions between air pollution and solar radiation. *Solar Energy*, vol.19, 1977, p. 23-32.

PIGEON, Grégoire. DURAND, Pierre. MASSON, Valéry. Evaluating parameterization of anthropogenic heat release in urban land surface scheme from field measurements and energy consumption inventory over Toulouse during Capitoul. In: The 86th AMS Annual Meeting : Symposium on the urban environment, *Atlanta, Etats-Unis, 30 janvier – 2 février 2006*.

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, Tiziana. GATTONI, Luca P. ARLUNNO, Riccardo. PANSA, Giorgio. ZAPPALA, Daniele. 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, 22-24 novembre 2007*.

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>

PRADO, Racine Tadeu Araújo. FERREIRA, Fabiana Lourenço. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and buildings*, vol.37, 2005, p. 295-300.

PRUD'HOMME, Rémy. KOPP, Pierre. BOCAREJO, Juan Pablo. Evaluation économique de la politique parisienne des transports. *Revue Transports*, n°434, 2005, p. 346-359.

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.

RACHELE, Henry. TUNICK, Arnold. Energy balance model for imagery and electromagnetic propagation. *Journal of applied meteorology*, vol.33, 1993, p.964-976.

REDMAN, C. GROVE, M. KUBY, L. Integrating Social Science into the Long-Term Ecological Research (LTER) Network: Social Dimensions of Ecological Change and Ecological Dimensions of Social Change. *Ecosystems*, vol.7, 2004, p. 161-171

RIBERON, J. VANDENTORREN, S. BRETIN, P. *et al.* Building and urban factors in heat related deaths during the 2003 heat wave in France. In: Proceedings of Healthy buildings, Lisbon, Portugal, 4-8 juin 2006.

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.

ROAF, Sue. Crichton, David. NICOL, Fergus. *Adapting buildings and cities for climate change, a 21st century survival guide*. Elsevier, 2005, 363 p.

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.

ROBINSON, Darren. Urban morphology and indicators of radiation availability. *Solar Energy*, vol.80, 2006, p.1643-1648.

RONCAYOLO, Marcel. *La ville et ses territoires*. Editions Gallimard, 1997, 281 p. (Folio essais)

ROETZER, T. WITTENZELLER, M. HAECKEL, H. NEKOVAR, J. Phenology in central Europe - differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas. *International Journal of Biometeorology*, vol.44, n°2, 2000, p. 60-66.

ROSENFELD, Arthur H. AKBARI, Haschem. BRETZ, Sarah. *et al.* Mitigation of urban heat island : materials, utility programs, updates. *Energy and Buildings*, n°22, 1995, p. 255-265.

ROSENFELD, Arthur. AKBARI, Hashem. ROMM, Joseph. POMERANTZ, Melvin. 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, 31 janvier 2006*.

ROTACH, M.W. Profiles of turbulence statistics in and above an urban street canyon. *Atmospheric Environment*, vol.29, n°13, 1995, p. 1473-1486

ROTACH, Mathias W. CHRISTEN, Andreas. VOGT, Roland. Profiles of turbulence statistics in the urban roughness sublayer with special emphasis to dispersion modelling. In: 5th International Conference on Urban Climate, *Lodz, Poland, 1-5 septembre 2003*.

ROULET, Yves-Alain F. *Validation and application of an urban turbulence parameterisation scheme for mesoscale atmospheric models*. Thèse : sciences techniques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004, 224 p.

ROUSE, Wayne R. Noad, Donald. McCUTCHEON, John. Radiation, temperature and atmospheric emissivities in a polluted urban atmosphere at Hamilton, Ontario. *Journal of climate and applied meteorology*, vol.12, 1973, p. 798-807.

ROUTHIER, Jean-Louis. Du transport de marchandises en ville à la logistique urbaine. *2001 Plus*, n°59, avril 2002, 67p.

ROZOFF, Christopher M. COTTON, William R. ADEGOKE, Jimmy O. Simulation of St. Louis, Missouri, Land Use Impacts on Thunderstorms. *Journal of Applied Meteorology*, vol.42, n°6, 2003, p. 716-738.

SACRE, Christian. *Le confort dans les espaces extérieurs : analyse microclimatique*. Nantes : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, division climatologie, 1983, 138 p.

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

SAILOR, David J. LU, Lu. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmospheric Environment*, vol.38, 2004, p. 2737-2748.

SAILOR, David J. DIETSCH, Nikolaas. The urban heat island mitigation impact screening tool (MIST). *Mitigation impact screening tool* [en ligne]. 2005 [réf. du 26 mars 2007], 22p. Disponible sur : <http://www.heatislandmitigationtool.com/>

SALAGNAC, Jean-Luc. Lessons from the 2003 heat wave: a French perspective. *Building Research and Information*, vol.35, n°4, 2007, p. 450-457.

SAMAALI, Mehrez. Évaluation d'un modèle de couche limite atmosphérique 3d dans un cas homogène : application à une parcelle agricole de soja. *Thèse : mécanique énergétique*, Aix-

Marseille 1, 2002 [réf. Du 14 octobre 2008] Disponible sur : <http://www.inra.fr/theses/these-integrale/Theses/samaali/html/these.html>

SANDERSON, Marie. GORSKI, Richard. The effect of metropolitan Detroit-Windsor on precipitation. *Journal of Applied Meteorology*, vol.17, 1978, p.423-427.

SANTAMOURIS, M. Heat-island effect. In : SANTAMOURIS, M. *Energy and climate in the urban built environment*. London: James and James, 2001(a), 402 p.

SANTAMOURIS, M. The role of green space. In : SANTAMOURIS, M. *Energy and climate in the urban built environment*. Londres: James and James, 2001(b), 402 p.

SANTAMOURIS, M. Appropriate materials for the urban environment. In : SANTAMOURIS, M. *Energy and climate in the urban built environment*. Londres: James and James, 2001(c), 402 p.

SANTAMOURIS, Matheos. *Passive cooling of buildings*. Advances of solar energy, ISES, James and James Science Publishers, London, 2005.

SANTAMOURIS, M. DOULOS, L. *Comparative study of almost 70 different materials for streets and pavements*, Master of Science. Final report, University of Athens, Department of physics, Athens, 2001.

SANTAMOURIS, M. ADNOT, J. ALVAREZ, S. *et al.* *Cooling the cities – rafraichir les villes*. Paris : Ecole des Mines de Paris-Les Presses, 2004, 263 p.

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.

SASAKI, Kiyoshi. MOCHIDA, Akashi. YOSHINO, Hiroshi. *Et al.* A new method to select appropriate countermeasures against heat-island effects according to the regional characteristics of heat balance mechanism. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, doi:10.106/j.jweia.2008.02.035

SCHERER, D. FEHRENBACH, U. BEHA, H.-D. PARLOW, E. Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban planning processes. *Atmospheric Environment*, 1999, vol.33, p. 4185-4193.

SCUDO, Gianni. DESSI, Valentina. ROGORA, Alessandro. Evaluation des conditions de rayonnement dans les espaces urbains. In : NIKOLOPOULOU, Marialena (éd.). *Concevoir des espaces extérieurs en environnement urbain : une approche bioclimatique*. NIKOLOPOULOU, 2004, 85 p.

SERINA, Guillaume. « Un million d'arbres à L.A. ». *Urbanisme*, n°361, juillet-août 2008, p. 56.

SHAW, R. COLLEY, M. CONNELL, R. *Climate change adaptation by design: a guide for sustainable communities*. London: Town and Country Planning Association (TCPA), 2007, 50 p.

SHEPHERD, J. Marshall. PIERCE, Harold. NEGRI, Andrew 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.

SOUAMI, Taoufik. L'intégration des technologies énergétiques dans l'action urbaine. *Les annales de la recherche urbaine*, n°103, 2007, p. 6-17.

STANHILL, G. KALMA, J. D. Solar dimming and urban heating at Hong Kong. *International Journal of Climatology*, vol.15, n°8, 1995, p. 933-941.

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

STEEMERS, Koen. Environmental Urban Design: The Role of Diversity on Human Biometeorology. In: Symposium on Urban Climate and Urban Greenery, Hong Kong, Chine, 2 décembre 2006b.

STERN, Nicholas. *Stern Review : The Economics of Climate Change*. 2006.

STONE, Brian Jr. Urban Heat and Air Pollution, An Emerging role for Planners in the Climate Change Debate. *Journal of the American Planning Association*, vol.71, n°1, 2005, p. 13-25.

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.

SUNDBORG, A. Local Climatological Studies of the Temperature Conditions in an Urban Area. *Tellus* 2, 1950, p. 221-231.

TAHA, H. Nighttime air temperature and the sky view factor: a case study in San Francisco, CA. Lawrence Berkeley Laboratory Report n°24009. *Proceedings Technical Conference in Mexico City: urban climatology and its applications with special regard to tropical areas*. WMO-n°652, World Meteorological Organization: Genève, Suisse, 1988.

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, H. 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, Haider. AKBARI, Hashem. ROSENFELD, Arthur. HUANG, Joe. Residential Cooling Loads and the Urban Heat Island the Effects of Albedo. *Building and Environment*, vol.23, n°4, 1988, p. 271-283.

TAHA, H. SAILOR, D. AKBARI, H. *High albedo materials for reducing cooling energy use*. Lawrence Berkeley Laboratory Report, 1992(a).

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(b).

UMR 1563 Ambiances architecturales et urbaines (École d'architecture de Nantes – CERMA et École d'architecture de Grenoble – CRESSON). *Rapport d'activité 2002-05*. Deuxième partie : Bilan scientifique du quadriennal 2002-2005

VACHON, Gaëlle. ROSANT, Jean-Michel. MESTAYER, Patrice. *Et al.* Experimental investigation of pollutant dispersion within a street in low wind conditions, the experiment Nantes'99. In: 9th International Scientific Symposium Transport and Air Pollution, Avignon, France, 5-8 juin 2000.

VERON, Jacques. *L'urbanisation du monde*. Paris : La découverte, 2006, 119 p. (Repères)

VIGNEAU, Jean-pierre. *Climatologie*. Paris : Armand Colin, 2005, 200 p.

VOGT, R. CHRISTEN, A. ROTACH, M.W. Vertical structure of sensible heat flux in an urban canopy layer. *EGS-AGU-EUG Joint Assembly*, Nice, 6-11 avril 2003 Abstract N° EAE03-A-12252.

VINCENT, Christian. RIBSTEIN, Pierre. FAVIER, Vincent. *Et al.* Glacier fluctuations in the Alps and in the tropical Andes. *Comptes Rendus Geosciences*, vol.337, n°1-2, janvier-février 2005, p. 97-106.

WACKERMANN, Gabriel. Démocratie, gouvernance urbaine et environnement. In : WACKERMANN, Gabriel (éd.), *Ville et environnement*. Paris : Ellipses, 2005, 400 p. (Carrefours)

WEISS, Karine. CORBEAU-JUSTIN, Ludvina. MARCHAND, Dorothée. Entre connaissance, mémoire et oublis : représentations de l'environnement et réactions face à une catastrophe naturelle. In : WEISS, Karine. MARCHAND, Dorothée (éds.). *Psychologie sociale de l'environnement*. Presses Universitaires de Rennes, 2006, 248 p. (Didact Psychologie sociale)

WILMERS, Fritz. Green for Melioration of Urban Climate. *Energy and Buildings*, vol.11, 1988, p. 289-299.

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.

YANNAS, Simos. Toward more sustainable cities. *Solar Energy*, vol.70, n°3, 2001, p. 281-294.

YAP, D. Seasonal excess urban energy and the nocturnal heat island – Toronto. *Theoretical and Applied Climatology*, vol.23, n° 1-2, 1975, p. 69-80.

YOSHINO, Masatoshi. Development of urban climatology and problems today. *Energy and buildings*, vol.15, 1990-1991, p. 1-10;

YU, Chen. HIEN, Wong Nyuk. Thermal benefits of city parks. *Energy and buildings*, n°38, 2006, p. 105-120.

Sites web consultés

ADEME. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.ademe.fr>

AGORA 21, site francophone du développement durable. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.agora21.org/>

Anah, Agence Nationale de l'Habitat. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.anah.fr/>

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.cstb.fr/>

CITEPA. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.citepa.org/>

Comité 21. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.comite21.org/>

CNRM. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.cnrm.meteo.fr/>

DIACT. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.diact.gouv.fr/>

EEA, Agence européenne pour l'environnement. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://local.fr.eea.europa.eu/>

Efisol, isolation thermique des maisons. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.efisol.com>

Energie-Cités, promouvoir les politiques énergétiques durables par l'action locale. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.energie-cites.org/>

ESPERE. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.espere.net>

Grenelle environnement. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.legrenelle-environnement.gouv.fr/grenelle-environnement/>

Institut de Veille Sanitaire. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.invs.sante.fr/>

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.ipcc.ch/>

IFEN. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.ifen.fr/>

IPSL, recherches en sciences de l'environnement, climat, pollution, planétologie. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.ipsl.jussieu.fr/>

Météo-France. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.meteofrance.com/>

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du territoire. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/>

Mission Interministérielle de l'Effet de Serre. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.effet-de-serre.gouv.fr/>

Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC). [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.onerc.gouv.fr>

Organisation des Nations Unies (ONU). [réf. du 20 octobre 2008] : <http://www.un.org/french/>

Portail architecture, urbanisme et environnement en Midi-Pyrénées. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.caue-mp.fr/>

Prim.net. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.prim.net/>

Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.unep.org/french/>

Réseau Action Climat France. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.rac-f.org/>

UK Climate Impacts Programme. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.ukcip.org.uk/>

Ville de Paris. [réf. du 20 octobre 2008] : <http://www.paris.fr/>

WIKIPEDIA. [réf. du 14 octobre 2008] : <http://www.wikipedia.fr/>

Dictionnaires

DE VIGAN, Jean. DICOBAT, dictionnaire général du bâtiment. Ris-Orangis : Arcature, 1992.

Petit Larousse illustré, 1991.

Petit Larousse illustré, 2000.

Annexes

Annexe 1 Prise en compte du climat dans la conception des villes

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), c'est-à-dire de façon la plus adaptée possible aux conditions climatiques locales. Empirisme puis approche scientifique de la construction ont permis de répondre en partie aux besoins humains de sécurité physique et de confort. L'amélioration des connaissances scientifiques et techniques a permis progressivement aux architectes, ingénieurs ou urbanistes de tenir compte d'autres contraintes telles que la dépense énergétique ou la qualité de l'air, mais également de prendre conscience des modifications climatiques locales engendrées par leurs aménagements.

Bâtiment et climat

« *Les bâtiments sont notre troisième peau* » nous signalent Roaf *et al.* (2005) ; il est vrai que d'abord conçu pour protéger les personnes et les biens des contraintes et aléas climatiques extérieurs, le bâtiment a vu et voit l'étendue de ses fonctions s'élargir au fur et à mesure de son évolution dans le temps¹³⁸. Aujourd'hui, en plus de nous protéger nous et nos biens des événements climatiques, il doit pouvoir proposer un environnement agréable, ce qui passe par exemple par un contrôle du climat intérieur (chauffage en hiver, climatisation en été, etc.), mais également par une attention au bruit, à la lumière, etc., et ce toujours en tenant compte des contraintes de coût et de limitation des impacts environnementaux.

Ces dernières décennies, la question de l'efficacité énergétique s'est également imposée avec la mise en place de réglementations thermiques de plus en plus ambitieuses. Aux contraintes économiques, qui ont motivé ces actions, s'ajoute également aujourd'hui la perspective d'un changement climatique, intimement lié aux consommations d'énergies fossiles.

Les éléments du climat qui sont pris en compte dans la conception du bâti sont nombreux (le rayonnement solaire, la température, les vents, l'humidité atmosphérique, les précipitations, etc.). Chaque région, française ou du monde, possède ainsi un habitat traditionnel dont la

¹³⁸ A ce sujet, Cluzel (1986), s'inspirant des besoins fondamentaux de Maslow (dans l'ordre : la santé, la sécurité, l'appartenance, l'estime des autres et l'accomplissement de soi), estime que les habitations possèdent aujourd'hui des « *fonctions d'usage* », « *liées essentiellement aux besoins de santé et de sécurité (maison-abri)* », et des « *fonctions d'estime* », « *directement liées à l'appartenance, l'estime des autres et l'accomplissement de soi* ».

conception et la forme sont intimement liées au climat (figure A 1). Givoni (1978), Griffiths (1976) ou encore Escourrou (1991) ont noté et expliqué ces différences. Des climats secs et chauds aux climats froids en passant par des climats chauds et humides ou de type méditerranéen, le choix des matériaux et la forme du bâtiment sont en partie conditionnés par les contraintes climatiques. Les ressources locales ont également largement influencé le choix des matériaux.

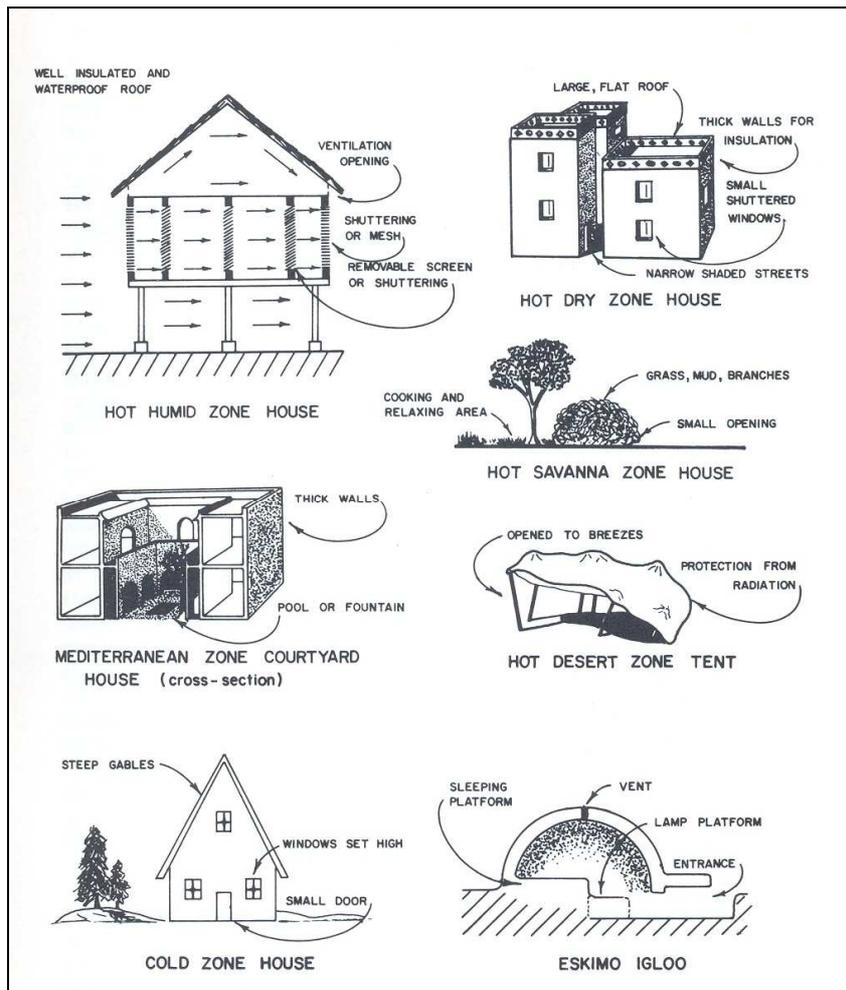


Figure A 1 : Habitat traditionnel selon les régions du Monde (Griffiths, 1976).

Pour les climats chauds et secs ou encore méditerranéens (étés chauds et secs, hivers doux et humides), l'objectif est de laisser pénétrer à l'intérieur du bâtiment le moins de chaleur possible. Les murs et les toits blancs ou avec des teintes claires sont ainsi privilégiés (cela limite l'absorption de la chaleur par les murs grâce à une plus grande réflexion du rayonnement solaire), les murs sont épais pour freiner la diffusion de la chaleur et amortir les fluctuations de températures à l'intérieur, les ouvertures sont petites, et selon la région des puits de fraîcheur avec de la végétation et de l'eau peuvent également être mis en place.

Pour les milieux froids et très froids, un des objectifs est d'éviter la perte de chaleur du bâtiment chauffé. Cela passe par une organisation à l'intérieur du logement, comme la création de sas pour entrer au sein du logement, par l'utilisation de matériaux approprié bien sûr, ou encore par une forme de construction particulière. Par exemple dans certaines villes de Russie des constructions sont conçues sur pilotis profondément enfoncés dans le sol où celui restera toujours gelé même en été. Le matelas d'air entre le rez-de-chaussée et le sol gelé permet de protéger, selon Escourrou (1991), l'habitation du froid issu du substratum¹³⁹. Cette couche d'air permet surtout de protéger le pergélisol¹⁴⁰ d'un réchauffement par le bâtiment et donc d'une fonte des glaces sous celui-ci qui engendrerait des mouvements de terrain.

Les différences architecturales entre les climats influencent quatre formes d'interaction entre le bâtiment et son environnement (Givoni, 1998) :

- l'exposition solaire effective des éléments opaques ou vitrés de l'enveloppe du bâtiment (ses murs, ses fenêtres et son toit) ;
- le gain effectif en chaleur solaire du bâtiment ;
- le gain ou la perte de chaleur avec l'air ambiant par convection¹⁴¹ et conduction¹⁴² ;
- et le potentiel pour mettre en place une ventilation naturelle ou un système de refroidissement passif au sein du bâtiment.

Ces interactions sont plus ou moins affectées par les éléments suivants (Givoni, 1998) :

- la forme du bâtiment ;

¹³⁹ Le substratum représente la surface terrestre : sols, végétation, surface en eau...

¹⁴⁰ Le pergélisol (*permafrost* en anglais) désigne un sous-sol gelé en permanence, au moins pendant deux ans.

¹⁴¹ En météorologie, la convection constitue le déplacement vertical de l'air et est souvent d'origine thermique ou orographique. Plus généralement, la convection est le mouvement d'un fluide, avec transport de chaleur, du fait d'un différentiel de températures. 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 transféré de la surface d'un solide à l'air adjacent, et vis et versa, ou quand la chaleur est transféré entre deux surfaces de températures différentes par le moyen d'un flux 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.

¹⁴² 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. Les molécules de n'importe quel matériau vibrent et cette vibration devient plus vigoureuse quand la température de la substance augmente. Le flux de chaleur conductif est causé par le transfert d'énergie de des molécules chaudes à forte vibration vers les molécules plus froides. De cette façon, le transfert de l'énergie cinétique de la vibration est converti en chaleur. La conduction thermique au sein des bâtiments correspond au processus de transfert de chaleur à travers des matériaux solides (murs, toits) et ce du côté le plus chaud de l'élément vers celui le plus froid. Son importance dépend de la conductivité du matériau et de l'épaisseur de l'élément considéré.

- l'orientation des fenêtres et l'ombre dont elles bénéficient ;
- l'orientation et la couleur des murs ;
- la taille et la localisation des fenêtres (pour la ventilation et les apports solaires) ;
- et l'effet des conditions de ventilation d'un bâtiment sur son climat intérieur.

La connaissance scientifique a permis de maîtriser petit à petit de nombreux aspects de la construction en relation avec son climat et son environnement plus généralement. La réglementation n'a, depuis le milieu du XX^e siècle, cessé de prendre en compte de nouvelles exigences pour satisfaire un certain niveau de confort pour les occupants, préserver le bâti, réduire le bruit et la consommation énergétique ou encore augmenter la sécurité en cas d'incendie. En France, par exemple, les règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions sont d'actualité depuis 1965 (règles NV 65¹⁴³) ; la première réglementation thermique est née en 1974 ; et la réglementation acoustique est elle-aussi récente (le premier arrêté relatif à l'isolation acoustique des bâtiments d'habitation date du 14 juin 1969).

La réglementation thermique tient compte en France de différentes zones climatiques. Il est vrai qu'énergie, ou plus précisément consommation d'énergie, et climat sont intimement liés comme le montre la figure A 2. Cette relation est également fortement influencée par le comportement des personnes, et leur relation au bâtiment et au confort.

Aujourd'hui, la technique permet de s'affranchir des conditions climatiques locales et des savoir-faire traditionnels pour concevoir des bâtiments au climat intérieur agréable en toute saison. Cela conduit à une généralisation des modes de constructions, et par voie de conséquence à une uniformisation des cadres bâtis¹⁴⁴, mais peut également mener à des aberrations. Les gratte-ciels vitrés et climatisés de Dubaï en sont une illustration. Escourrou (1991) explique ainsi que : « *La maîtrise du milieu par des techniques de jour en jour plus perfectionnées s'est développée dans la civilisation dite « occidentale », c'est-à-dire dans un*

¹⁴³ « Les règles NV 65 fixent les valeurs des charges de la neige et du vent et permettent d'évaluer les efforts correspondant agissant sur la structure d'une construction. Rédigées en 1965, elles ont fait l'objet d'annexes, de révisions, d'addenda en 1967, 1970, 1975, 1976, 1985 (carte neige), 1996 (carte neige), 1999 (carte vent) et 2000 (accumulation de la neige). » (Mayere, 2001)

¹⁴⁴ Jacques Veron (2006), dans son ouvrage sur l'urbanisation du monde, note également cette évolution au sein des villes : « *Un autre enjeu urbain, c'est d'éviter que la mondialisation ne se traduise par une uniformisation totale des villes, notamment de leurs centres, avec la présence des mêmes enseignes, des mêmes chaînes hôtelières internationales, du même design urbain, etc.* »

milieu où les contraintes climatiques restent modérées et, par suite, les urbanistes et architectes n'ont guère eu à se soucier du climat dans l'élaboration de leurs projets. »

La ville accueille aujourd'hui un grand nombre de ces bâtiments au climat intérieur agréable mais qu'en est-il de sa propre relation avec le climat ?

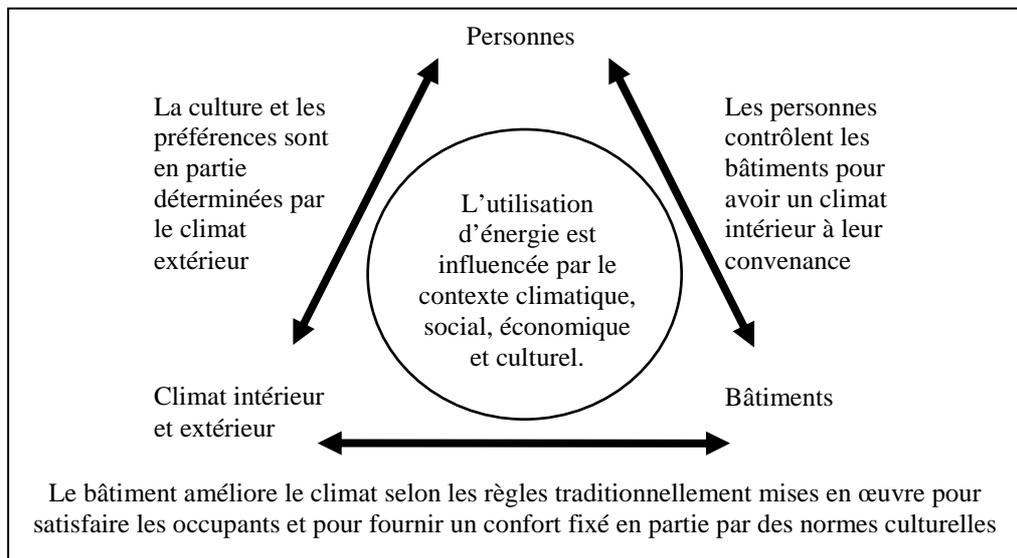


Figure A 2 : Interactions traditionnelles entre le climat (intérieur comme extérieur), les personnes et les bâtiments qui influencent nos besoins énergétiques (D'après Roaf *et al.*, 2005).

Ville et climat

Jusqu'à très récemment, le climat n'a pas été une préoccupation majeure des urbanistes. Comme le signalent Adolphe *et al.* (2002), « *Les acteurs de la planification urbaine et de l'aménagement de l'espace ont aujourd'hui perdu cette mémoire sur les effets climatiques de la forme urbaine, sur l'influence régulatrice de la végétation, ou sur le rôle bénéfique des espaces d'eau (couloirs fluviaux, fontaines...).* Ces acteurs sont aujourd'hui dépourvus d'outils et de données de base indispensables pour intégrer à leur réflexion les caractéristiques de l'environnement climatique aux trois échelles fortement imbriquées du climat régional, du mésoclimat (à l'échelle de l'agglomération), et du microclimat (à l'échelle du bloc). Pourtant ces outils et ces connaissances existent, mais sont affaires de spécialistes (d'un côté, architectes et thermiciens sur le comportement énergétique des bâtiments à « Haute Qualité Environnementale »¹⁴⁵, de l'autre les climatologues ou

¹⁴⁵ La Haute Qualité Environnement (HQE) est une démarche qualitative récente qui vise l'intégration dans le bâti des principes du développement durable et qui intègre toutes les activités liées à la conception, la construction, le fonctionnement et la déconstruction d'un bâtiment (logement, bâtiment public, tertiaire ou

aérauliciens). La complexité des phénomènes participe à cette technicisation du domaine [...], par minéralisation et imperméabilisation du substrat, et augmentation de l'énergie anthropique, ou l'impact réciproque du climat et de la concentration de polluants en milieu urbain (inversion de température, dispersion horizontale, précipitations...). »

L'absence de préoccupations d'ordre climatique n'a pas toujours existé et différentes interventions ont même eu comme objectif affiché d'améliorer la qualité de l'air ou le climat qui régnait dans la ville comme le montre Benzerzour (2004). Avant la seconde moitié du XX^e siècle, les aménageurs ne parlent pas encore du climat urbain mais ont pris ou prennent conscience des modifications qu'ils peuvent apporter.

Benzerzour (2004) a étudié les modifications climatiques engendrées par la ville en distinguant quatre périodes successives : le Moyen Age (et sa prise de conscience d'une possibilité d'intervention sur le microclimat malsain des villes), le XVIII^e siècle (et la mise en œuvre des interventions), la période moderne du XIX^e siècle (et ses utopies sociales) et la période contemporaine. Nous reprenons ici ce découpage temporel. Les influences climatiques des différentes interventions effectuées sur la ville depuis la fin du Moyen-âge et que nous allons ici présenter succinctement sont résumés au sein du tableau A 1.

Au Moyen Age, la ville s'est créée avant tout dans un objectif de protection, de survie et pour répondre à un certain contexte militaire et économique¹⁴⁶. Ainsi, les besoins de protection imposent aux villes en plus des murailles de s'entourer de larges fossés, ce qui crée un climat local plus humide. A ceci s'ajoute l'ensemble des activités économiques concentrées dans la ville intra-muros pour lesquelles l'humidité est nécessaire et qui crée des zones malsaines au sein de la ville¹⁴⁷. A défaut de pouvoir supprimer les sources malsaines, l'adaptation des

industriel). Elle s'appuie sur 14 cibles : des cibles d'écoconstruction (C1. Relations harmonieuses du bâtiment avec son environnement immédiat / C2. Choix intégré des produits, systèmes et procédés de construction / C3. Chantier à faible impact environnemental) ; des cibles d'éco-gestion (C4. Gestion de l'énergie / C5. Gestion de l'eau / C6. Gestion des déchets d'activités / C7. Maintenance - Pérennité des performances environnementales) ; des cibles de Confort (C8. Confort hygrothermique / C9. Confort acoustique / C 10. Confort visuel / C 11. Confort olfactif) ; des cibles de santé (C 12. Qualité sanitaire des espaces / C 13. Qualité sanitaire de l'air / C 14. Qualité sanitaire de l'eau).

¹⁴⁶ « La ville fonctionne comme une entité sociale, capable d'assurer la mise en œuvre de la solidarité devant les périls.[...] Le tracé se fait à partir d'un centre attractif et d'un souci de sécurité : d'où l'importance des murailles, des pont-levis qu'on lève, et des portes qu'on ferme pour s'abriter du monde hostile » (Bonello, 1998)

¹⁴⁷ « Textiles, cuirs, papier et salpêtre représentent en volume la majeure partie des produits transformés dans et par la ville jusqu'au début du XVIII^{ème} siècle. Leurs modes de production dépendent intimement de l'humidité et de la putréfaction ou plutôt de la quantité d'excréments produits dans la ville. L'eau et les fientes sont dans l'économie artisanale des richesses premières qu'il faut stocker, sinon accumuler. En ce sens, les déchets et l'eau sont à l'artisan ce que l'or et l'argent sont à l'état dans la théorie mercantiliste. » (Guillermé, 1990. D'après Benzerzour, 2004)

populations se fait quand cela est possible par l'éloignement. Ainsi les espaces les moins pollués sont investis par les religieux ou les riches alors que les ouvriers vivent aux abords de ces sources. La disparition des causes militaires et économiques et l'avancée scientifique vont permettre aux villes d'améliorer leur climat et surtout d'assainir leur air.

Dès le XVIII^e siècle, qui est le siècle des Lumières, la qualité sanitaire de l'air des villes devient un enjeu. Il y a désormais une volonté de réduire, au sein des habitats et des espaces urbains, l'humidité et d'accéder à l'air, au soleil et à la lumière naturelle. Les interventions salubristes vont alors se dérouler sur plusieurs décennies et même siècles¹⁴⁸.

Un assainissement des surfaces malsaines va donc s'opérer (minéralisation du sol des rues et renouvellement du crépi des murs, comblement des fossés et canalisation des rivières, et drainage en sous-sol des eaux de surface) ainsi qu'une ventilation des vides urbains (alignement des rues, élargissement et percées de nouvelles rues, normalisation du prospect des rues).

Le XIX^e siècle va, pour sa part, voir apparaître des propositions utopistes sur l'avenir des villes et leurs conceptions.

L'urbanisme moderne s'ancre sur les utopies sociales du XIX^e siècle et propose de nouvelles formes urbaines parfois opposées à la forme de la ville ancienne. Les auteurs les plus connus du XIX^e siècle ayant écrit sur les formes urbaines refusent la ville héritée du passé synonyme pour eux d'inégalités et d'insalubrité. Comme le signale Benzerzour (2004), « *les solutions proposées sont de deux types : construire une nouvelle ville de toute pièce en alliant ville et campagne ou transformer (actualiser) la ville existante de telle sorte à obtenir une nouvelle ville* ». Si c'est la première solution qui est préconisée dans la première moitié du XX^e siècle, sans réussir réellement à être mise en œuvre hors cas particuliers, c'est la seconde qui l'est aujourd'hui pour nos villes.

¹⁴⁸ « [...] tout nanti cherche à réduire l'humidité de son habitat. Le pavage des rues et la construction de fosses d'aisance contribuent à réduire les dépôts d'immondices intra-muros, tandis que les populations des grands centres économiques s'adonnent à des métiers moins polluants, laissant aux campagnes le soin de pousser d'avantage la préparation des matériaux ; L'élite urbaine goûte le bon air des promenades et des jardins publics. La grande ville s'épure et se dégage subrepticement de ses fanges. La putréfaction qui avait fait sa richesse et celle de la nation va être écartée, éliminée, réduite. » (Guillermé, 1990. D'après Benzerzour, 2004)

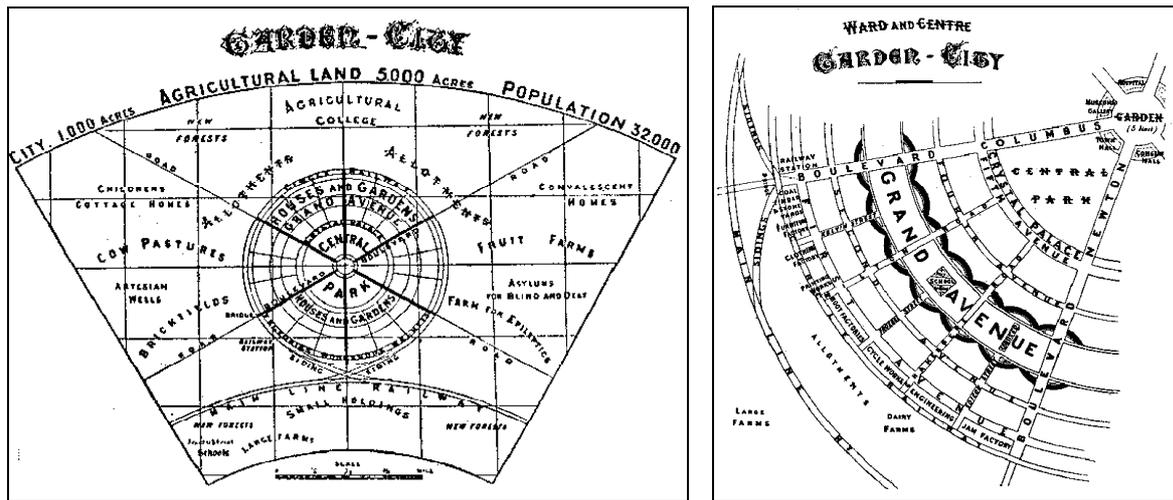


Figure A 3 : La cité jardin circulaire d'Ebenezer Howard (www.library.cornell.edu/Reps/DOCS/howard.htm)

Pour illustrer ces propos, les figures A 3 présentent la cité idéale imaginée par Ebenezer Howard dans son ouvrage *les cités jardins de demain* (1902), cité qui est un « *modèle de développement urbain alternatif qui veut apporter une réponse au problème de l'habitat à l'ère industrielle* » (Jonas, 2003)¹⁴⁹.

Les figures A 4 représentent pour leur part la façon dont Le Corbusier¹⁵⁰ s'imaginait une ville contemporaine de trois millions d'habitants. L'objectif est de « *resserrer la ville en densifiant son centre par la juxtaposition de gratte-ciel (dix-huit tours de deux cent mètres de haut pour le Plan Voisin)* » (Jonas, 2003). Le Plan Voisin (figure A 4) fut un projet proposé par Le Corbusier en 1925 pour le centre de Paris.

¹⁴⁹ « *La cité-jardin est de taille limitée (la population ne doit pas dépasser trente mille personnes), elle regroupe toutes les fonctions administratives et les activités tertiaires au centre, lui-même entouré de jardins et d'avenues arborées bordées d'habitations et de commerces. L'urbanisation des quartiers et leur entretien sont gérés de manière mixte par des promoteurs privés et les pouvoirs publics qui régulent l'éventuelle spéculation immobilière et la concentration de la propriété foncière (tout en laissant sa place à l'initiative privée). Les villes sont cernées par une couronne de terre agricole où sont également implantées les industries. A terme les cités-jardins, reliées les unes aux autres par un réseau de chemin de fer, formeraient des grappes d'agglomérations à dimension humaine, toutes fondées sur le même système de gestion collectif, mi public, mi privé. Les premières cités-jardins sur le modèle imaginé par Ebenezer Howard ont été réalisées à partir de 1903 dans les environs de Londres à Letchworth et Weirwyn Garden City.* » (Jonas, 2003).

¹⁵⁰ « *Le Corbusier, dans l'esprit du Purisme, courant artistique qu'il a contribué à fonder et qui s'inspire de l'esthétisme fonctionnel des machines, prône une nouvelle architecture rationnelle et mono fonctionnelle. [...] L'« homme-machine » vivra dans une « ville-machine » : les unités d'habitation sont des blocs, disposés régulièrement dans un espace vert, logeant chacun mille six cents personnes et disposant de services collectifs intégrés [...]; espacés les uns les autres de cent cinquante mètres, chaque immeuble de bureaux de l'hyper centre accueille dix à cinquante mille employés.* » (Jonas, 2003).



Ville de trois millions d'habitants, conçue par Le Corbusier en 1922. Maquette présentée dans le cadre de l'exposition « à la recherche de la cité idéale » à la Saline d'Arc-et-Senans. (<http://www.athenaeum.ch/corbu3m1.htm>)



Le Plan Voisin proposé par Le Corbusier en 1925. Source : site internet de la fondation Le Corbusier (<http://www.fondationlecorbusier.asso.fr/>)

Figure A 4 : Les projets de Le Corbusier.

Une prise de conscience environnementale contemporaine va avoir lieu dans la continuité des préoccupations salubristes du XIX^e siècle et du début du XX^e siècle. Comme l'écrit Benzerzour (2004), « *le développement durable est devenu le leitmotiv de l'urbanisme contemporain* ». Le microclimat urbain, la pollution atmosphérique, le changement climatique deviennent de nouveaux enjeux. Gauzin-Müller (2001) préconise trois objectifs pour que la ville puisse répondre au critère de qualité environnementale : une ville compacte (l'étalement augmente l'utilisation de la voiture), un habitat dense (économie d'énergie pour le chauffage et économie de matériaux de construction) et un verdissement des vides urbains et des toitures (humidification de l'air, fixage des poussières, abaissement des températures, stockage du carbone et libération de l'oxygène, affaiblissement de la propagation du bruit, réduction de l'impression de densité, augmentation de l'inertie thermique, etc.).

Cette densification s'oppose à l'étalement urbain observé actuellement en France et, d'une manière plus générale, dans les pays européens ou du monde. En 2003, selon l'IFEN, les surfaces artificialisées (routes, parkings, chantiers, pelouses, espaces bâtis) occupent 8% du territoire métropolitain. Entre 1982 et 2003, elles ont augmenté de plus de 40% au détriment des zones agricoles et naturelles, ce qui s'explique plus par l'évolution du mode de vie des français que par la croissance démographique : la population française a en effet augmenté de seulement 10% dans la même période (IFEN).

Selon le Bulletin Européen du Moniteur n°749 (janvier 2006), « *les problèmes de l'étalement urbain (l'extension non maîtrisée de l'urbanisation vers la campagne environnante) et de la périurbanisation (l'exode des habitants et des activités économiques hors du centre des villes*

et vers les périphéries) sont susceptibles de détériorer sensiblement la qualité environnementale des zones urbaines. Cette tendance est fréquente dans les anciens Etats membres [de l'Union Européenne] et souvent la règle dans les nouveaux Etats membres. »

Tableau A 1 : Tableau synthétique des modes d'intervention sur la forme urbaine visant la régulation du microclimat urbain (Benzerzour, 2004).

| Types d'intervention | Périodes | Intentions microclimatiques | Interventions sur la forme urbaine | Modalités |
|--------------------------------------|---|--|---|--|
| 1. Adaptation spatiale | ... Jusqu'au XVII ^{ème} siècle | Eloignement des sources et des espaces malsains | Choix d'une situation spatiale pour habiter dans la ville intra-muros selon : - La hauteur des édifices (abandon des RDC) ; - La rue (voir toponymie) ; - Le quartier (ouvriers, religieux...) ; - La topographie (rivière, hauteurs de la ville). | - Différenciation spatiale de la qualité du microclimat urbain : d'un étage à un autre, d'une rue à une autre, d'un quartier à un autre, ou d'une situation topographique à une autre. - Différenciation foncière des parcelles selon leur qualité microclimatique. |
| 2. Ajustements morphologiques | Des Lumières au XVIII ^{ème} à la reconstruction des villes au XX ^{ème} siècle | - Améliorer l'accessibilité de l'air, du soleil et de la lumière naturelle. - Favoriser le rejet de l'air pollué vers l'extérieur des villes. | - Destruction des saillies. - Elargissement des rues selon une ligne droite (alignements). - Limitation des hauteurs de rues selon leurs largeurs (prospects). - Percées de rues nouvelles avec des directions nouvelles. | - Ouverture progressive des vides urbains. |
| | | Eliminer les sources malsaines | - Pavage des sols. - Comblement des fossés. - Comblement des cours d'eau malsains (égouts à ciel ouvert). - Enterrement des réseaux d'évacuation d'eau. | - Minéralisation et imperméabilisation des surfaces. |
| 3. Nouvelles formes urbaines | XIX ^{ème} et XX ^{ème} siècle | + de soleil + d'air naturel + de lumière + de verdure + de logements | - Densification verticale. - Inversion des rapports « plein-vidé ». - Choix des orientations des parois. | - Nouvelle forme d'ouverture du vide urbain (étalement). - Espaces verts considérables. |
| 4. La ville contemporaine ? | XX ^{ème} siècle | - Réduire l'étalement des espaces bâtis. - Economiser l'énergie. - Augmenter les surfaces plantées. | - Economiser l'espace. - Densifier la ville existante. - Optimiser la constructibilité des vides urbains existants. | - Nécessité d'optimisation - Quels connaissances ? - Quels outils ? |

Les villes américaines sont sans doute un bon exemple de ce que l'étalement urbain à l'excès peut provoquer. Comme le signale Ghorra-Gobin (2005) pour les villes américaines, « *l'urbanisation se poursuit en dehors de toute notion de limite spatiale au détriment de l'environnement naturel ou encore du domaine rural, suivant le principe de la faible densité. [...] L'urban sprawl correspond à un phénomène d'étalement urbain se poursuivant au gré de la construction des routes et des autoroutes, de la dynamique d'implantation d'entreprises soucieuses de bénéficier d'un cadre agréable au moindre coût et des lotissements résidentiels (y compris les lotissements sécurisés, les gated communities).* »

Si la relation avec la pollution atmosphérique est tout de suite évoquée, cet *urban sprawl* a également des conséquences climatiques de par l'artificialisation toujours plus importante des surfaces.

Nombre des interventions urbaines explicitées ici et listées au sein du tableau A 1 se sont inscrites dans les règlements d'urbanisme ou ont été influencées par eux. Ce fut le cas, par exemple, des rues parisiennes, souvent caractérisées par l'homogénéité des bâtiments qui la bordent¹⁵¹.

Cependant la « *perte de mémoire* », pour reprendre le terme d'Adolphe *et al.* (2002), des acteurs de la planification urbaine sur les effets climatiques de la ville a pour conséquence qu'aujourd'hui peu de villes et d'acteurs de la ville (urbanistes, architectes, ingénieurs, politiques, etc.) tiennent compte des modifications climatiques locales qu'ils engendrent de par leur choix et décisions, et ce sans doute parce ces modifications ne sont pas perçues aujourd'hui nécessairement comme négatives. Le phénomène est pourtant connue depuis déjà plusieurs décennies (cf. première partie).

¹⁵¹ « Dès le XVIII^{ème} siècle, les règles d'urbanisme ont proportionné la hauteur maximale des façades et la forme du couronnement des immeubles à la largeur des rues. Ces dispositions ont peu varié au cours du XIX^{ème} siècle et ont largement été respectées dans le règlement d'urbanisme de 1902 qui a été en vigueur jusqu'à la fin des années 1950. Aussi, le paysage des onze premiers arrondissements ainsi que des 16^{ème}, 17^{ème} et 18^{ème} arrondissements est-il très largement issu de l'application de ces règles.

Cependant en 1961, sous l'influence du mouvement moderne, des préoccupations hygiénistes et du développement de la circulation automobile, le plan d'urbanisme directeur a imposé un urbanisme nouveau qui abandonnait l'alignement des voies, la gradation mesurée des hauteurs et, de manière plus générale, le souci d'insertion des constructions dans la ville ancienne. Dans les arrondissements périphériques, particulièrement sur la rive gauche et sur la couronne de Paris, cette rupture a produit des formes urbaines et architecturales inhabituelles qui vont très vite susciter un rejet et conduire à l'élaboration et à l'application anticipée dès 1975 du plan d'occupation des sols (POS) approuvé en 1977.

Le POS de 1977 a rétabli la continuité des formes urbaines. Il a réintroduit l'exigence d'homogénéité du bâti inscrite dans les règlements anciens par l'obligation d'alignement et le retour aux gabarits traditionnels sur rue. Révisé à deux reprises et modifié de très nombreuses fois, il nécessite aujourd'hui une révision générale pour répondre aux nouveaux objectifs que se fixe la Ville de Paris en matière d'occupation du sol et de paysage. » Diagnostic du PLU de Paris (2007)

Annexe 2 Perturbations climatiques : sources d'instabilité à gérer par la ville

Une ville conçue a priori en adéquation avec son climat reste vulnérable quand survient un évènement extrême. Du fait des enjeux¹⁵² que présentent les espaces urbains et de leur vulnérabilité¹⁵³, les pouvoirs publics se sont organisés pour faire face aux différents aléas¹⁵⁴ climatiques et minimiser ainsi les risques¹⁵⁵ qui pourraient survenir. C'est ce dont nous allons discuter au sein du premier paragraphe de ce chapitre.

A cette variabilité naturelle du climat s'ajoute aujourd'hui la problématique plus préoccupante du changement climatique. Face à ce dernier, la question de l'adéquation de la ville à un nouveau climat est plus délicate, plus complexe, et pleine d'incertitudes. Il est alors difficile d'engager des actions d'adaptation pour minimiser le risque (et quel risque justement ?) comme nous le verrons.

Les villes ont une position complexe. Elles sont souvent à l'origine des modifications locales et globales du climat et subissent à la fois les effets conjoints du changement climatique et du climat urbain. Ce sont ainsi elles qui vont devoir le plus mettre en œuvre des actions pour lutter contre les rejets en gaz à effet de serre tout comme agir pour s'adapter à un nouveau climat.

¹⁵² Les enjeux sont « l'ensemble des personnes et des biens susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel » (MEEDDAT) ou encore « les personnes, les biens, les équipements, l'environnement menacé par l'aléa, et susceptibles de subir des dommages et des préjudices » (Dagorne, 2001).

¹⁵³ La vulnérabilité « exprime et mesure le niveau de conséquences prévisibles de l'aléa sur les enjeux. Différentes actions peuvent la réduire en atténuant l'intensité de certains aléas ou en limitant les dommages sur les enjeux. » (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable) ou encore « mesure les conséquences dommageables de l'évènement sur les enjeux concernés » (Dagorne, 2001).

¹⁵⁴ L'aléa est « la manifestation d'un phénomène naturel d'occurrence et d'intensité données » (MEEDDAT - Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire) ou encore « la probabilité d'un évènement qui peut affecter le système étudié naturel ou technologique » (Dagorne, 2001).

¹⁵⁵ Le MEEDDAT évoque également le risque majeur et le définit comme « la conséquence d'un aléa d'origine naturelle ou humaine, dont les effets peuvent mettre en jeu un grand nombre de personnes, occasionnent des dégâts importants et dépassent les capacités de réaction des instances directement concernées » et Dagorne (2001) préfère lui le terme simple de risque et le définit comme la « possibilité de survenance d'un évènement susceptible de porter atteinte à l'équilibre naturel ». De façon plus simple, « Le risque est le produit combiné d'une vulnérabilité et d'un aléa » selon Dubois-Maury (2004). La définition de l'ONERC (Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique) (2003), plus détaillée présente le risque comme « la combinaison de divers éléments : les phénomènes (le vent, la crue, la foudre etc.) – les enjeux pouvant être impactés par des phénomènes (les personnes, les biens, l'environnement) - et une troisième composante : la vulnérabilité, c'est à dire la plus ou moins grande capacité des enjeux à résister aux phénomènes. » (ONERC, 2003)

Gestion des risques climatiques par les villes françaises

Dans l'étude des risques, la ville est désormais régulièrement considérée de manière particulière par rapport aux milieux plus ruraux. En effet, la ville est un milieu particulièrement vulnérable aux événements climatiques du fait de la forte présence d'enjeux. Le triangle du risque de Crichton (2008) permet une représentation de ce qui crée le risque (figure A 5), c'est-à-dire l'association d'un aléa (*hazard*), d'une vulnérabilité (*vulnerability*) et d'une exposition ou des enjeux (*exposure*)

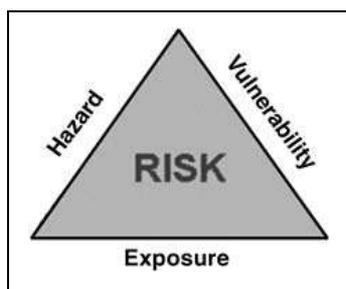


Figure A 5 : Le triangle du risque (Crichton, 2008).

Les principaux risques naturels d'origine climatique sont pour les villes françaises : les inondations, les averses orageuses, les cyclones, les tempêtes, et les canicules. Nous n'aborderons ici que trois d'entre eux, à savoir les inondations (les averses orageuses ont souvent pour conséquences une inondation), les tempêtes, et les canicules qui affectent plus particulièrement la France métropolitaine.

Inondations

Selon l'ONERC, « *Les enjeux liés aux inondations concernent 3 à 4 % de la population française (2 millions de personnes – 7600 communes). Les conséquences économiques et humaines sont importantes. Les inondations ont fait 185 victimes sur la période 1980/2000. Le coût annuel moyen est de 600 millions d'euros* ». Le risque d'inondation est, en France, le risque le plus fréquent et le plus coûteux pour la société (80 % du coût des dommages nationaux imputables aux risques naturels, d'après l'IFEN - Institut Français de l'Environnement).

Les inondations peuvent avoir trois origines : une remontée des nappes phréatiques (due à un surplus régulier de pluies pendant un long moment, ce qui entraîne un affleurement de la nappe), le ruissellement pluvial (dû à l'imperméabilisation croissante des sols du fait des

aménagements ou des pratiques culturelles, comme le remembrement¹⁵⁶) ou le débordement d'une voie d'eau, une crue (due à l'augmentation du débit de la voie d'eau lors de précipitations intenses).



Figure A 6 : Les inondations de Nîmes du 3 octobre 1988 : un sinistre exceptionnel pour une inondation en France, 9 morts, 4 milliards de francs de dégâts (<http://www.prim.net/>).

Un exemple d'inondation par ruissellement est celle survenue à Nîmes le 3 octobre 1988 suite à des pluies diluviennes (figure A 6). Les caractéristiques naturelles de la ville ont favorisé ce phénomène : Nîmes se situe en piémont d'un plateau calcaire qui domine la ville d'une centaine de mètres. Six cours d'eau temporaires la traversent et drainent les eaux du « plateau des Garrigues » vers la plaine du Vistre, par des bassins versants peu étendus (4 à 12 km de longueur totale pour 10 à 25 km² de superficie). Nîmes est en quelque sorte « un amphithéâtre » naturel, au pied de sept collines. A cela s'ajoute une structure géologique complexe (karst¹⁵⁷) qui favorise la circulation des eaux souterraines vers la Fontaine de Nîmes et d'autres résurgences¹⁵⁸ temporaires avec de brutales augmentations de débit. L'urbanisation progressive et l'extension des voies de communication dans la plaine et sur les hauteurs immédiates ont également eu des effets défavorables sur le ruissellement et l'écoulement des eaux et accru le risque d'inondation pour la ville de Nîmes (site de la ville de Nîmes : <http://www.nimes.fr/>).

Pour les crues, la notion de période de retour¹⁵⁹, dépendant du débit et de l'intensité, a été définie. Quatre types de crue sont ainsi distingués (MEDD, 2004) : Les crues fréquentes (la

¹⁵⁶ Le remembrement est une « réunion de différentes parcelles en un seul tenant afin d'effectuer une redistribution rationnelle pour l'agriculture (remembrement rural) ou pour l'aménagement urbain » (Le Petit Larousse illustré, 2000). Il a notamment pour conséquence de supprimer les talus, sources de biodiversité, et surtout protections face au ruissellement.

¹⁵⁷ Le karst est une « région possédant un relief karstique », c'est-à-dire un « relief particulier aux régions calcaires et résultant de l'action, en grande partie souterraine, d'eaux qui dissolvent le carbonate de calcium » (Le petit Larousse illustré, 2000).

¹⁵⁸ La résurgence est la « réapparition à l'air libre, sous forme de grosse source, d'eaux infiltrées dans un massif calcaire » (Le petit Larousse illustré, 2000).

¹⁵⁹ La période de retour est « l'inverse de la probabilité d'occurrence du phénomène. Un phénomène ayant une période de retour de cent ans (phénomène centennal) a une chance sur cent de se produire ou d'être dépassé

période de retour est comprise entre un et deux ans), les crues moyennes (la période de retour est comprise entre dix et vingt ans), les crues exceptionnelles (la période de retour est de l'ordre de cent ans) et la crue maximale vraisemblable (elle occupe l'intégralité du lit majeur¹⁶⁰).

Dans le cadre de l'élaboration des documents réglementaires, la référence utilisée est la crue centennale ou le plus fort évènement connu. Pour Paris, c'est par exemple la crue de 1910 qui est utilisée.

La période de retour fait partie des paramètres permettant de qualifier l'aléa inondation avec la hauteur et la durée de submersion, la vitesse du courant et le volume de matière transportée.

Les zones urbaines sont plus vulnérables aux inondations, par rapport aux zones rurales et naturelles, du fait notamment de la densité en infrastructures. Cette vulnérabilité s'est accrue avec le temps du fait de la sophistication du fonctionnement de notre société (qui correspond à une augmentation des enjeux). Prenons le cas par exemple de la crue de 1910 à Paris. Les dégâts ont été évalués à 400 millions de francs de l'époque, soit presque un milliard d'euros, et 200 000 personnes ont été touchées. Si une crue de cette ampleur avait lieu aujourd'hui, il est estimé qu'elle affecterait plus ou moins gravement 500 000 personnes et coûterait entre huit et neuf milliards d'euros (Geode, 2004).

L'imperméabilisation du sol et la survenue plus fréquente de pluie orageuse au niveau de l'agglomération ou des villes sous le vent de celle-ci pourrait favoriser de rapides et faibles inondations par ruissellement.

La prévision, l'information, la prévention ou encore la protection sont les maîtres-mots de la gestion du risque inondation, gestion dont l'objectif est de minimiser les conséquences d'une nouvelle crue de cette importance. Cependant, comme le signale Chery (2000), « *quelles que soient les dispositions prises à ce jour, une crue de type 1910 en région Ile-de-France constituerait une catastrophe économique nationale. [...] On peut considérer qu'un tel scénario aurait pour conséquences : Une crise majeure d'alimentation en eau potable, en électricité, en téléphone ; Une désorganisation générale des transports (vulnérabilité*

chaque année. Cela est vérifié à condition de considérer une très longue période. Mais elle peut aussi, sur de courtes périodes (quelques années, parfois une seule), se répéter plusieurs fois. » (MEDD, 2004)

¹⁶⁰ Le lit mineur correspond au lit du cours d'eau occupé lors des crues fréquentes. Le lit majeur s'étend pour sa part jusqu'aux limites des crues exceptionnelles sur une distance qui peut donc aller de quelques mètres à plusieurs kilomètres. (MEDD, 2004)

particulière des transports en commun), réseau routier coupé en de nombreux points et, évidemment, sursaturé ; une perturbation majeure de l'acheminement des matières premières et des biens de consommation ainsi que de l'évacuation des déchets... »

Pour gérer le risque inondation, plusieurs éléments ont été mis en place. La prévision, gérée par Météo-France, en est le premier aspect (SHAPI - Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévention des Inondations – a été créé en juin 2003 pour servir d'appui aux services de prévision des crues au niveau national ainsi que pour assurer une veille hydrométéorologique 24 heures sur 24 localisée sur les bassins rapides). Elle est basée à la fois sur une surveillance météorologique et sur un suivi des débits de plusieurs cours d'eau.

A cela s'ajoute la prévention qui « regroupe l'ensemble des dispositions à mettre en œuvre pour réduire l'impact d'un phénomène naturel prévisible » (MEDD, 2004). Cela consiste donc à réduire la vulnérabilité des enjeux, anticiper la crise (exemple : le plan familial de mise en sureté, http://www.prim.net/citoyen/moi_face_au_risque/222_anticiper.html), ou encore réduire la gravité des crues torrentielles (réalisation de travaux de correction active ou passive).

L'aménagement doit également prendre en compte le risque. Cela se fait au travers des documents d'urbanisme, d'aménagements particuliers (bassins de retenue, bassins de compensation, fossés, etc.) et surtout du plan de prévention des risques naturels prévisibles (PPR) qui ne concerne par ailleurs pas uniquement le risque inondation (mais également les séismes, les éruptions volcaniques, les mouvements de terrain, les avalanches, les feux de forêt, les cyclones et les tempêtes). Ce plan, établi par l'Etat, définit les zones d'interdiction et les zones de prescription, constructibles sous réserve.

Une information préventive envers les populations est également mise en place (dossier départemental des risques majeurs¹⁶¹, document d'information communal sur les risques majeurs). Cependant, comme le constatent Weiss *et al.* (2006)¹⁶², cela ne suffit pas forcément

¹⁶¹ Le risque majeur est la possibilité d'un événement d'origine naturelle ou anthropique, dont les effets peuvent mettre en jeu un grand nombre de personnes, occasionner des dommages importants et dépasser les capacités de réaction de la société. Huit risques naturels principaux sont prévisibles sur le territoire national : les inondations, les séismes, les éruptions volcaniques, les mouvements de terrain, les avalanches, les feux de forêt, les cyclones et les tempêtes. Les risques technologiques, d'origine anthropique, sont au nombre de quatre : le risque nucléaire, le risque industriel, le risque de transport de matières dangereuses et le risque de rupture de barrage. (<http://www.prim.net/>)

¹⁶² « Les différentes études menées par notre équipe sur les risques naturels, et plus particulièrement sur les inondations en France ces dernières années, ont mis en évidence la difficile acceptation du risque, et ce quelles que soient la situation et la connaissance que peuvent en avoir les individus. En effet, qu'il s'agisse de régions

pour que la population se sente concernée, accepte le risque. De plus, la loi du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages a créé dans son article 77 (codifié à l'article L 125-5 du code de l'environnement) une obligation d'information de l'acheteur ou du locataire de tout bien immobilier (bâti et non bâti) situé en zone de sismicité ou/et dans un plan de prévention des risques prescrit ou approuvé. A cet effet sont établis directement par le vendeur ou le bailleur : 1. un état des risques naturels et technologiques pris en compte par ces servitudes, à partir des informations mises à disposition par le préfet de département ; 2. Une déclaration sur papier libre sur les sinistres ayant fait l'objet d'une indemnisation consécutive à une catastrophe reconnue comme telle.

Ces outils permettant l'information préventive sont donc élaborés pour les communes exposées à des risques d'inondations mais également en cas d'exposition à des risques de séismes, volcanisme, cyclones, feux de forêts, mouvement de terrain et risques technologiques.

Tempêtes

« Une tempête correspond à l'évolution d'une perturbation atmosphérique, ou dépression, pouvant s'étendre sur une largeur atteignant 2 000 km et le long de laquelle sont confrontées deux masses d'air aux caractéristiques distinctes (température, teneur en eau). De cette confrontation naissent notamment des vents pouvant être très violents. On parle de tempêtes lorsque les vents dépassent 89 km/h » (MEDD, 2002).

Nous n'aborderons pas dans cette thèse le cas particulier des tornades et des cyclones, qui concerne peu la France métropolitaine (nous pouvons citer cependant la mini tornade exceptionnelle qui s'est abattue en août 2008 sur le Nord de la France).

Une tempête se manifeste donc par la vitesse des vents, et s'accompagne de façon plus ou moins importante de pluies (avec les conséquences telles que les inondations, les glissements de terrain ou encore les coulées boueuses) et également, en zones littorales, de marées anormalement hautes (marée de tempête) et de hauteur de vagues importante.

« dans lesquelles les inondations constituent un problème récurrent (dans le sud de la France), un phénomène oublié (dans la Somme) ou encore un risque diffus non expérimenté personnellement (dans la Loire), les populations ne semblent pas se sentir suffisamment concernées. » (Weiss et al., 2006)

Comme l'explique le document sur les tempêtes du Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD, 2002), « *du fait des forces de frottement : la vitesse des vents à l'intérieur des terres est souvent inférieure à celle des rafales soufflant sur les mers. De plus, l'intensité des vents décroît au fur à mesure de l'avancement de la perturbation sur le continent. Ceci explique la menace pesant plus particulièrement sur les zones littorales. En revanche, en raison du caractère turbulent de l'écoulement de l'air, la violence (et donc le pouvoir destructeur) des vents terrestres peut être sensiblement supérieure à celle des vents marins.* »

Les dommages d'une tempête peuvent être importants. Si la prudence permet bien souvent d'éviter un trop grand nombre de décès et de blessés (dus notamment à la projection d'objets par le vent, à la chute d'arbres, ou encore à des glissements de terrain), les activités sont pour leur part très perturbées. Les conséquences économiques peuvent être importantes du fait de la destruction et des dommages sur les infrastructures, de l'interruption des réseaux de communication, électriques ou d'eau, des dommages sur le bétail et les cultures.

A ces conséquences humaines et économiques s'ajoutent les conséquences environnementales qui peuvent survenir comme la destruction des forêts, ou la pollution en cas de naufrage côtier, de « trop-plein » des égouts, d'utilisation des déversoirs d'orage, etc.

Comme le signale Christian Sacré (ONERC, 2003), « *la forêt et la ville correspondent à de fortes rugosités qui freinent beaucoup la vitesse du vent mais qui génère en revanche plus de rafales, plus de turbulence. [...] L'analyse [des dommages du point de vue de l'exposition du vent] permet aussi de constater que les bâtiments sous le vent d'une forte rugosité (ville, banlieue) ont subi plus de dommages sur leurs menuiseries (fenêtres et portes). La rugosité au vent des bâtiments ne joue pas comme une protection sur les dommages aux éléments de couverture.* »

Le risque tempête n'entre pas en général pour les documents de prévention des risques dans la catégorie des risques majeurs. La prévention, dans le cas des tempêtes, s'appuie principalement sur la prévision météorologique et sur la procédure *Vigilance Météo*, mise en service depuis octobre 2001 par Météo-France (<http://www.meteo.fr/meteonet/vigilance/#>).

En plus de cette procédure, comme le signale le Ministère de l'Ecologie et du développement Durable (MEDD, 2002), « *la prévention la plus efficace consiste à respecter les normes de construction en vigueur fixant les efforts à prendre en compte pour résister aux vents. [...]*

Dans l'idéal, une conception adaptée de l'habitat doit s'accompagner de mesures portant sur les abords immédiats de l'édifice construit ».

Canicules ou vagues de chaleur

Canicule et vague de chaleur ne possèdent pas de définition rigoureuse (Besancenot, 2002). Ainsi, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) reste floue et définit une vague de chaleur comme étant un « réchauffement important de l'air », une « période caractérisée par des températures anormalement élevées » ou encore une « invasion d'air très chaud ».

Ce manque de clarté a pour conséquence une pluralité de définitions selon les pays. Ainsi les météorologues français et américains apprécient l'anomalie thermique en valeur absolue en fixant un seuil respectivement à 30 et 32°C ; alors que les britanniques fonctionnent en valeur relative et préfèrent parler de vague de chaleur lorsque les températures sont 4°C au-dessus de la moyenne trentennale du lieu et du mois (Besancenot, 2002). A ceci s'ajoute la confusion concernant la durée de l'anomalie thermique pour pouvoir parler de canicule. En effet, alors que le National Weather Service des Etats-Unis hésite entre un minimum de deux ou de trois jours consécutifs (Besancenot, 2002), l'Institut royal de météorologie des Pays-Bas définit une vague de chaleur comme une période d'au moins cinq jours consécutifs avec une température maximale d'au moins 25°C, incluse trois jours au moins où la température maximale dépasse les 30°C (Huynen, 2001).

Si la mesure des températures permet de se faire une première idée de l'exposition à la chaleur à laquelle sont soumis les individus, il est nécessaire, pour mieux appréhender cette exposition, de prendre en compte d'autres paramètres météorologiques (vitesse du vent, niveau de rayonnement solaire, humidité) et non météorologiques (niveau d'activité physique, habillement, adaptation physiologique) (INVS, 2003). Pour prendre en compte ces différents éléments, des indices biométéorologiques ou « indices de confort » sont définis et permettent ainsi d'évaluer les risques sanitaires inhérents aux vagues de chaleur. La température apparente AT^{163} , l'indice d'inconfort ID^{164} , l'indice de chaleur $(Hi)^{165}$ en sont des exemples (INVS, octobre 2003).

¹⁶³ Température apparente (AT) : $AT = 2,719 + 0,994*t + 0,016*(tdr)^2$
t correspond à la température de l'air sous abri en Celsius ($15,6 < t < 50^\circ C$).
tdr correspond à la température du point de rosée en Celsius ($tdr < 31^\circ C$).

¹⁶⁴ Indice d'inconfort (DI) : $DI = t - 0,55*(1-0,01*hu)*(t-14,5)$
t correspond à la température de l'air sous abri en Celsius.

Prenons le cas de la canicule européenne de 2003. La France a vécu durant cette période un évènement météorologique exceptionnel. En moyenne, les températures maximales étaient plus élevées de 2°C que celles atteintes lors des étés chauds de 1976, 1983 et 1994. Dans deux tiers des stations météorologiques françaises les températures ont franchi 35°C, et 15% de ces stations ont même enregistré des températures de 40°C. Les températures minimales, atteintes en fin de nuit, ont également été largement supérieures aux normales. A Paris, entre le 7 et le 14 août, les températures sont restées de façon continue au-dessus des 23°C.

Si l'intensité de la canicule de 2003 a beaucoup marqué, sa durée a également été atypique.

Cette canicule a engendré une vague de surmortalité à laquelle personne ne s'attendait dans toutes les régions de France. La période de surmortalité a épousé la période de canicule (établie du 4 au 13 août) comme on peut le constater sur la figure A 7. Ainsi dès le 4 août 2003, on assiste à un excès de près de 400 décès. La surmortalité se stabilise aux alentours du 20 août avec une surmortalité cumulée de près de 15 000 décès. (Hémon et Jouglu, 2003)

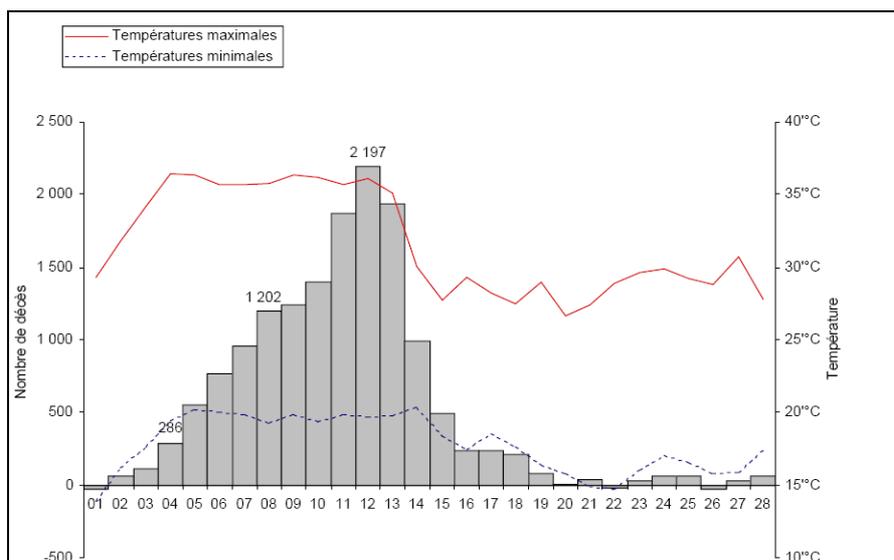


Figure A 7 : Excès de décès observé quotidiennement en France pendant le mois d'août 2003 et relevé des températures extérieures (Hémon et Jouglu, 2003).

hu correspond au taux d'humidité.

$$^{165} \text{ Indice de chaleur (Hi) : } Hi = -42,379 + 2,04901523*t + 10,14333127*hu - 0,22475541*t*hu - (6,83783*10^{-3}*t^2) - 5,481717*10^{-2}*hu^2 + 1,22874*10^{-3}*t^2*hu + hu + (8,5282*10^{-4})*t*hu^2 - 1,99*10^{-6}*t^2*hu^2$$

t correspond à la température de l'air sous abri en Fahrenheit17.

hu correspond au taux d'humidité.

L'indice de chaleur développé par le National Weather Service des Etats-Unis est une version modifiée de la température apparente simplifiant la procédure informatique de calcul.

L'intensité de la surmortalité n'a pas été la même dans toutes les régions et des disparités importantes ont pu être observées (Hémon et Jouglu, 2003). Les ratios de surmortalités les plus élevés ne correspondent pas aux régions les plus touchées par la canicule mais à l'Ile-de-France et à la région Centre où la mortalité a plus que doublé. La région Ile-de-France a contribué à elle seule à 33% de la surmortalité (elle constitue « seulement » un peu plus de 18% de la population en France métropolitaine).

Cette surmortalité n'est pas le seul effet sur l'individu de la canicule. En effet, l'exposition à des températures élevées peut entraîner soit un coup de chaleur soit un épuisement par la chaleur avec des conséquences plus ou moins graves pour l'organisme, ces conséquences pouvant donc aller jusqu'au décès (INVS, 2003).

Dans ce genre de situation, « l'effet de moisson » (*harvesting effect*) est souvent évoqué en arguant que la vague de chaleur n'a emporté que des personnes à haut risque qui seraient décédés dans les mois suivants la canicule. Cette compensation, si elle existe, est en générale partielle et « *force est d'admettre que la chaleur tue des sujets qui, sans elle, auraient survécu et, pour certains, survécu longtemps* » (Besancenot, 2002).

Une étude de l'Institut nationale de veille sanitaire (INVS, 2004) a confirmé cela pour la canicule de 2003 puisque « *le déficit de décès observé dans les 3 semaines qui ont suivi la période caniculaire est très largement inférieur à la surmortalité observée pendant la vague de chaleur.* »

De nombreux facteurs individuels et environnementaux influent sur les effets sanitaires d'une vague de chaleur. Dans les facteurs individuels, peuvent être cités (Besancenot, 2002 ; INVS, 2003 ; INVS, 2006) : le mode de vie et les contacts sociaux, le statut social l'âge, le sexe, l'acclimatation physiologique, la prise de drogue et de médicaments, et l'état de santé générale. Les caractéristiques de l'habitat, la localisation géographique (ville ou campagne) et la pollution constituent les trois facteurs environnementaux pouvant le plus influencer les effets sanitaires de la canicule.

L'Institut nationale de veille sanitaire (INVS) a étudié les facteurs de risque de décès des personnes âgées résidant à domicile durant la vague de chaleur d'août 2003 (INVS, 2004). Cette étude a fait ressortir de nombreux paramètres liés aux caractéristiques du bâtiment, du logement et de l'environnement proche. Ainsi « *deux facteurs apparaissent les plus liés au risque de décès : les caractéristiques d'isolation du logement et du bâtiment et la situation en*

dernier étage ou sous les toits ». Il apparaît que les personnes vivant dans une habitation bien isolée avaient un risque de mortalité divisé par cinq, alors que les personnes vivant au dernier étage d'un bâtiment mal isolé avaient un risque de mortalité multiplié par quatre (Ribéron *et al.*, 2006). L'indice thermique (température moyenne des surfaces mesurée par satellite dans un rayon de 200 m du domicile) apparaît également comme un facteur de risque significatif. RIBERON *et al* (2006) notent également que l'îlot de chaleur local accroît le risque de mortalité.

Dans un article sur les vagues de chaleur et la mortalité dans les grandes agglomérations urbaines, Besancenot (2002) met en avant le rôle joué par l'îlot de chaleur urbain. Les températures minimales permettent souvent un repos nocturne réparateur. Elles jouent donc un rôle décisif dans la récupération de l'organisme face à de fortes chaleurs. Or, le milieu urbain empêche les températures nocturnes de diminuer suffisamment pour permettre ce repos réparateur, ce qui a pour effet de provoquer un impact sanitaire plus marqué dans les centres villes que dans les campagnes.

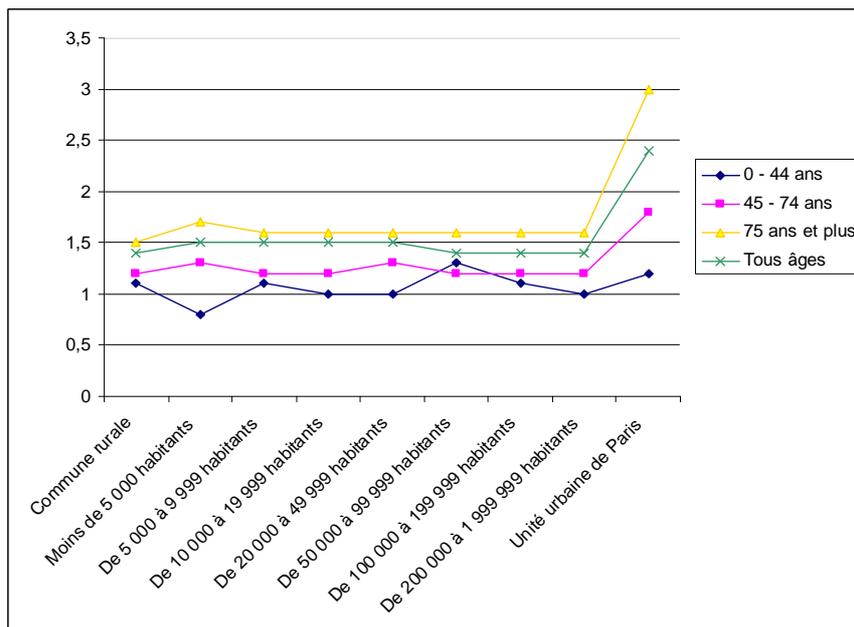


Figure A 8 : Nombre de décès observés sur nombre de décès attendus au cours de la période du 1^{er} au 20 août 2003 en France en fonction de la tranche d'unité urbaine (D'après Hémon et Jouglu, 2003).

Hémon et Jouglu (2003) ont également analysé l'impact du degré d'urbanisation sur la surmortalité. Il constate ainsi que « la surmortalité, de +54% sur la France entière, a été moins importante, bien que marquée, dans les zones rurales, les petites agglomérations et les

villes de moyennes et grandes tailles (environ +40% pour toutes ces catégories de communes), et très élevée dans la région parisienne où elle a plus que doublé (+141%) » (figure A 8).

Une étude de l'Institut nationale de veille sanitaire (INVS, septembre 2004) a présenté également les relations entre températures, pollution atmosphérique et mortalité dans neuf villes françaises (Bordeaux, Le Havre, Lille, Lyon, Marseille, Paris, Rouen, Strasbourg et Toulouse). Cette étude cherchait entre autres à estimer l'excès de risque de mortalité lié conjointement à la température et à l'ozone, et la part relative de chacun des facteurs, lors de la vague de chaleur de 2003 (figure A 9). Une des conclusions a été que : « *Il semble que les excès de mortalité observés les plus élevés soient liés dans leur quasi totalité à l'effet propre de la chaleur : c'est ce que l'on observe à Paris et Lyon. Dans ces villes, les fortes températures semblent avoir un effet persistant à court terme (3 jours). Dans les villes où l'excès de mortalité observé est plus modéré, les parts relatives des effets de la température et de l'ozone se répartissent de façon plus hétérogène, selon le niveau atteint localement par chacun des deux facteurs mais également selon leur excès de risque local.* »

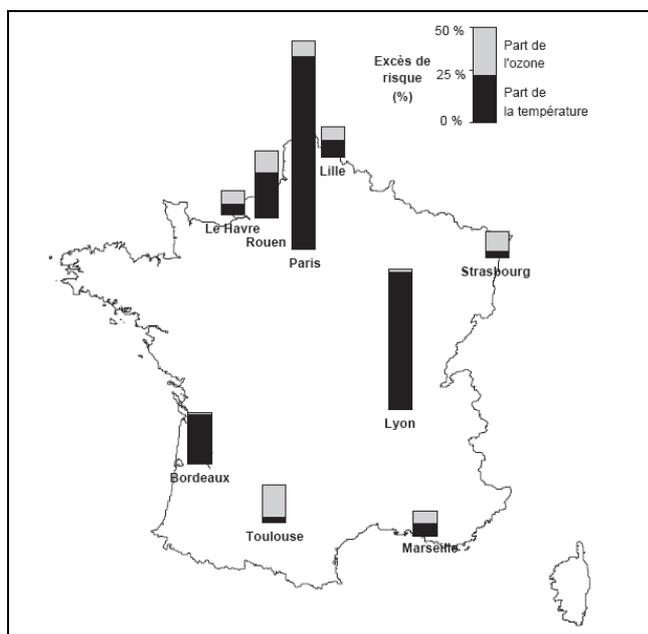


Figure A 9 : Excès de risque¹⁶⁶ (%) liés à l'ozone et à la température et représentation des parts relatives de chaque facteur pour la population tous âges. Période du 3 au 17 août 2003. (INVS, 2004).

¹⁶⁶ Cet excès de risque représente, en pourcentage, l'augmentation du risque de mortalité à court terme expliquée par le niveau des deux facteurs pendant cette période par rapport à leur niveau moyen pendant la même période en 2000, 2001 et 2002.

La canicule et la sécheresse ont eu également d'autres effets. Parmi les secteurs touchés, peuvent être cités la santé et la qualité de l'air, l'habitat, le tourisme, les activités industrielles, l'énergie, l'alimentation en eau potable, les activités agricoles, les forêts et les écosystèmes terrestres, ou encore la qualité de l'eau et les écosystèmes aquatiques (OREB, 2004).

Le Plan Canicule mis en place en France suite à la canicule de 2003 doit permettre de gérer la situation de crise. Cependant, de nombreux aspects sont à prendre en compte pour les futures décennies comme la modification des comportements humains et le vieillissement de la population en France, qui accroît par conséquent le nombre de personnes vulnérables (INSEE, 2002). La climatisation est une de ces avancées qui, en permettant d'améliorer par certains aspects la qualité de vie de l'homme, la met également en péril si elle est mal gérée ou mal choisie. Ainsi, les grandes tours réfrigérées sont des sources de légionellose, les climatiseurs individuels rejettent un surplus de chaleur à l'extérieur augmentant ainsi en ville l'effet îlot de chaleur, ou encore la consommation d'énergie liée à l'utilisation de ces appareils provoque des problèmes au niveau des centrales de production.

La gestion de la canicule de 2003 a été inadaptée. L'évènement et surtout ses répercussions sur la santé n'avaient pas été prévus ou encore étaient peu connus en France avant cette canicule de 2003. Suite à la canicule de 2003, le gouvernement a mis en place un Plan Canicule National, publié en mai 2004, décliné en trois niveaux d'alerte, qui définit les actions dans les domaines de la prévention et de la gestion d'une crise et qui repose sur la mobilisation de tous (Etat, collectivités territoriales, associations, professionnels de la santé...). Ce plan vise notamment, à repérer et à intervenir auprès des personnes à risques dont la fragilité se trouverait aggravée durant une canicule. A ce titre, la réglementation prévoit que chaque commune se charge de recenser les personnes âgées et personnes handicapées, isolées et de tenir à jour, tout au long de l'année un registre nominatif confidentiel.

Les trois niveaux d'alerte ou de veille mis en œuvre sont :

- Le niveau de veille saisonnière : déclenché automatiquement du 1^{er} juin au 31 août, il permet la mise en place d'un numéro vert d'information et de communication et la transmission quotidienne d'un point météorologique au ministère.
- Le niveau « mise en garde et actions » : déclenché par les préfets de département, il permet :

- La mise en œuvre de mesures de prévention et de gestion de la canicule dans les établissements de santé, sociaux, médico-sociaux, etc. En prévision, le dispositif « Établissement de santé en tension » est activé pour adapter les capacités d'hospitalisation ;
 - La réquisition des médias pour diffuser des messages de prévention, notamment en direction des personnes les plus exposées (personnes âgées, handicapées, etc.) ;
 - L'envoi quotidien des données sanitaires au ministère par les départements.
- Le niveau de mobilisation maximale : Il est déclenché sur instruction du Premier ministre dans le cas où la canicule est aggravée par des effets collatéraux : rupture de l'alimentation électrique, pénurie d'eau potable, saturation des établissements de santé, etc.

Le Plan Canicule ne concerne pas uniquement l'organisation de la gestion en cas de survenue d'une nouvelle vague de chaleur. Comme le signale Salagnac (2007), un chapitre du Plan Canicule concerne également des recommandations pour améliorer les conditions à l'intérieur des bâtiments des maisons de retraites. Ces actions concernent à la fois les défauts de conception du bâtiment que l'exploitation de ce dernier, et s'adressent au bâti existant et aux futures constructions. Au sein d'un chapitre du Plan canicule, une liste de moyens à mettre en œuvre prioritairement est donnée (Salagnac, 2007) :

- Réduire les sources internes de chaleur telles que les équipements pour l'éclairage ou la cuisine.
- Limiter la pénétration du soleil en utilisant par exemple des volets, des rideaux, des stores, ce qui permet d'occulter les fenêtres.
- Améliorer l'isolation thermique du bâtiment.
- Rafraîchir les pièces durant la nuit en y faisant circuler de l'air frais venant de l'extérieur (cela suppose que les températures nocturnes sont suffisamment fraîches et que l'habitation le permet, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de risque d'intrusion, ou encore de sources de bruit à proximité).

Un passage de quelques heures dans des pièces naturellement fraîches (celliers, églises, etc.) ou encore dans des endroits climatisés (zones commerciales, musées, cinémas, etc.) a également été préconisé.

En juin 2005, une vague de chaleur est survenue dans huit régions françaises et plus particulièrement dans la région de Lyon. Elle a permis en partie de tester l'efficacité du Plan Canicule et l'INVS a montré qu'aucune surmortalité n'avait été enregistrée (Salagnac, 2007).

Comme le signale l'INVS (septembre 2004), « *les actions de prévention relatives à l'habitat et l'urbanisme ne pourront être mises en place qu'à moyen et long terme compte tenu de l'ampleur des travaux qu'elles nécessitent et de leur coût. Cependant, leur intérêt est à étudier à l'aune du réchauffement climatique qui fait augurer la répétition de périodes de fortes chaleurs.* »

La ville est donc soumise à la variabilité climatique face à laquelle elle tente de se sécuriser, de se protéger au mieux. Pourtant, comme on peut le voir pour les trois types d'aléas présentés ici, elle est également souvent à l'origine de sa propre vulnérabilité du fait d'une ignorance et/ou d'une mauvaise prise en compte durant plusieurs décennies des modifications qu'elle engendre sur son environnement.

Le changement climatique annoncé devrait modifier la fréquence de ces différents aléas. S'il y a déjà une quasi certitude sur l'augmentation de la fréquence des vagues de chaleur, ce n'est pas le cas encore pour les autres risques climatiques.

Changement climatique

La population du globe est passée de 1850 à 2000 de 1,26 milliards à 6,06 milliards d'individus (ONU) et les découvertes scientifiques et techniques effectuées durant ces 150 années ont donné aux hommes plus de pouvoirs sur la nature qu'en 10 000 ans d'histoire. « *Le dialogue homme-nature conditionne des dynamiques, fruits du politique, du culturel, de l'économique mêlés, qui produisent à la fois des risques (comme les gaz à effet de serre) et des systèmes plus ou moins efficaces pour faire face à ces risques. L'homme est autant acteur qu'usager du milieu. Il le subit ou s'y adapte, le transforme, déclare le contrôler, le modeler à sa convenance comme un artiste modèlerait l'argile. Il peut aussi feindre de l'ignorer. Toutes ces attitudes modulent les risques climatiques et leurs effets* » (Amat-Roze, 1999).

La Convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) de 1992 définit ainsi dans son premier article le changement climatique : « *On entend par «changements climatiques» des changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables.* » En effet, comme le signale Amat-Roze (1999), « *les évolutions climatiques sont naturelles, mais en 150 ans, modes de vie et systèmes de production ont donné aux hommes le pouvoir de bouleverser les équilibres globaux jusqu'ici régulés par la seule nature* ».

Aujourd'hui, la majorité de la communauté scientifique s'accorde sur la présence d'un changement climatique. Un certain nombre d'indicateurs permet de montrer qu'il y a bel et bien déjà un changement climatique en cours. Ces indicateurs ne s'appuient pas uniquement sur la mesure de paramètres climatiques (températures, nombre de jours de gel, nombre de journées estivales, niveau de la mer marégraphique, etc.) mais également sur l'évolution des cycles de vie de plusieurs plantes (phénologie) ou encore sur l'apparition de nouvelles espèces dans certaines régions. Les prévisions pour demain ne sont pas toujours très optimistes comme nous allons le voir.

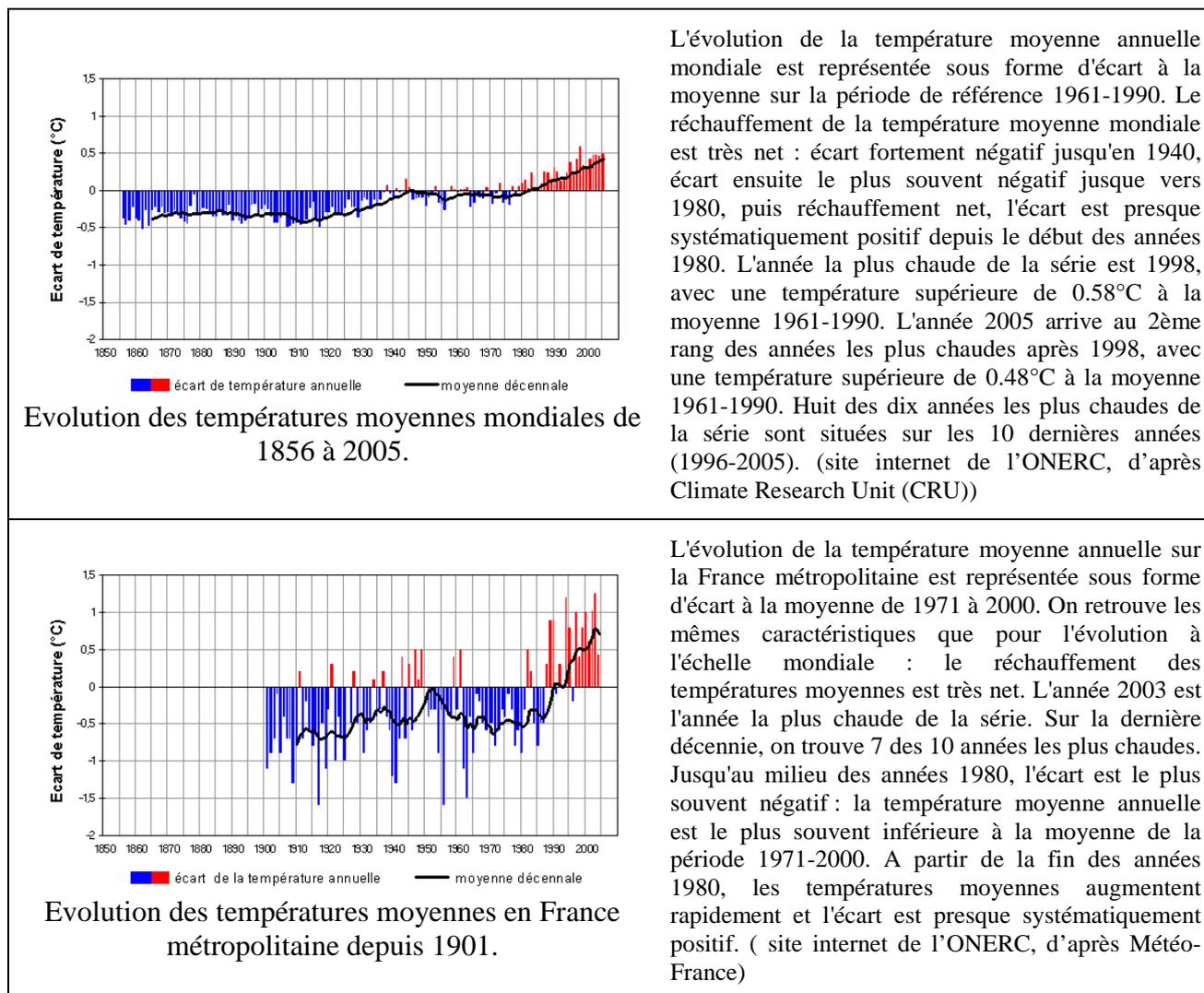
Le changement climatique lié à l'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère est aujourd'hui bien documenté. L'objectif n'est pas de présenter ici l'ensemble de la problématique climatique. Nous n'aborderons donc pas la variabilité naturelle du climat, la difficile prise en compte de certains éléments pour évaluer la situation future (nuages, relâchement de méthane, comportement des puits de carbone, circulation thermoaline, etc.), la position des sceptiques, ou encore les solutions de type géoingénierie proposées aujourd'hui. Nous présentons ici uniquement les modifications climatiques qui sont déjà sensibles depuis quelques décennies ainsi que les conséquences déjà observables. Les résultats du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) sont ensuite présentés pour analyser les possibles situations futures. Nous terminerons par les mesures mises en œuvre aujourd'hui par les collectivités locales en France pour lutter et s'adapter au changement climatique et par la difficulté que ce dernier pourra apporter dans leur fonctionnement et leurs prises de décision.

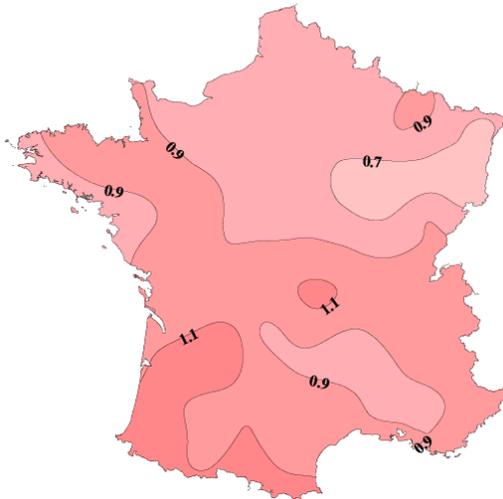
Changement climatique : une évolution déjà en cours

Un certain nombre d'indicateurs permet aujourd'hui de montrer qu'il y a bel et bien déjà un changement climatique en cours. Ces indicateurs ne s'appuient pas uniquement sur la mesure de paramètres climatiques (températures, nombre de jours de gel, nombre de journées estivales, niveau de la mer marégraphique, etc.) mais également sur l'évolution des cycles de vie de plusieurs plantes (phénologie) ou encore sur l'apparition de nouvelles espèces dans certaines régions.

Le tableau A 2 présente l'évolution de différents paramètres climatiques, et plus particulièrement des températures, durant le XX^e siècle.

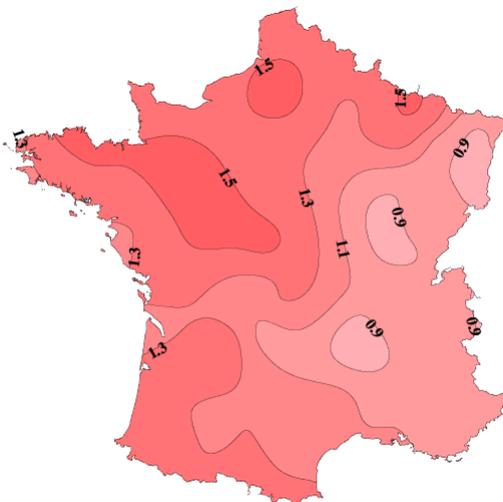
Tableau A 2 : Evolution de différents paramètres climatiques, et plus particulièrement des températures, durant le XX^e siècle.





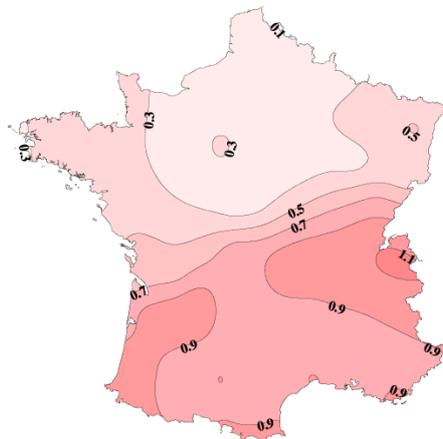
La température moyenne annuelle est en hausse sur la France métropolitaine sur la période 1901-2000. Cette augmentation est de l'ordre de 0,7°C sur le siècle sur le nord-est du pays ; elle est plus marquée sur le sud-ouest où elle atteint plus de 1,1°C. (site internet de l'ONERC, d'après Météo-France)

Augmentation de la température moyenne annuelle en France métropolitaine sur la période 1901-2000.



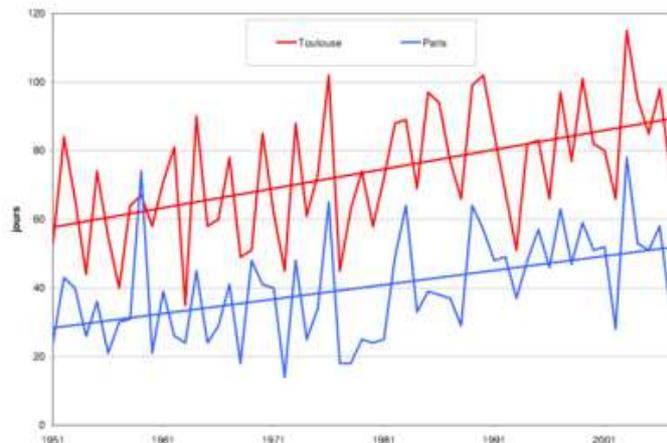
Le réchauffement de la moyenne annuelle des températures minimales journalières au cours du XX^e siècle est bien marqué. L'augmentation atteint 0,9°C sur le siècle dans l'est du pays et atteint jusqu'à 1,5°C au nord-ouest. (site internet de l'ONERC, d'après Météo-France)

Augmentation de la moyenne annuelle de la température minimale journalière en France métropolitaine sur la période 1901-2000.



La moyenne annuelle de la température maximale journalière est en hausse sur la France métropolitaine au cours du XX^e siècle. Cette hausse est de l'ordre de 0,3°C sur la période 1901-2000 au nord, et l'augmentation de température maximale atteint 0,9°C au sud. Le réchauffement constaté sur les températures maximales est inférieur à celui des températures minimales. (site internet de l'ONERC, d'après Météo-France).

Augmentation de la moyenne annuelle de la température maximale journalière en France métropolitaine sur la période 1901-2000.



Evolution du nombre annuel de journées estivales à Toulouse et Paris depuis 1951.

Les courbes représentent l'évolution du nombre annuel de journées estivales sur deux stations françaises au climat différent : en rouge, à Toulouse et en bleu, à Paris. Les droites correspondent à la tendance linéaire sur la période 1951-2007. On constate que Toulouse enregistre davantage de journées estivales que Paris. Le nombre de journées estivales présente de fortes variations d'une année sur l'autre mais, en moyenne, il augmente à Paris et à Toulouse. L'augmentation est de l'ordre de 4 jours tous les 10 ans sur à Paris et de plus de 5 jours tous les 10 ans à Toulouse. Cet indicateur permet également d'identifier le caractère exceptionnel de l'été 2003. L'année 2003 correspond au record du nombre de journées estivales sur la période 1951-2007 pour ces deux stations : 115 journées estivales à Toulouse et 78 à Paris. L'année 1976 ressort également nettement sur le graphique avec 102 journées estivales à Toulouse et 65 à Paris. (site internet de l'ONERC, d'après Météo-France).

Une des conséquences de ces augmentations de températures, et un des indicateurs de la présence d'un changement climatique, est le recul des glaciers dans de nombreux pays (Dyurgerov et Meier, 2000). En s'appuyant sur des séries disponibles de position des fronts glaciaires et de bilans de masse comparés et interprétés en fonction de la variabilité climatique, Vincent *et al.* (2005) ont montré qu'un net recul des glaciers alpins pouvait être observé tout au long du XX^e siècle. Leurs analyses ont également permis de corréliser ce recul avec les changements de la température de l'air (par exemple, pour les glaciers des Andes, c'est plus particulièrement la précipitation neigeuse qui a de l'influence).

Le règne végétal est également un bon indicateur du réchauffement climatique. Comme le précise Chuine et Seguin (2006), la phénologie (étude des variations des phénomènes périodiques de la vie végétale et animale en relation avec le climat) est un marqueur du climat et son étude permet de retracer finement l'évolution du climat des derniers millénaires. Cet exercice a été effectué par exemple pour le climat de la Bourgogne qui a été reconstitué depuis 1370 à partir des dates de vendanges du Pinot noir (Chuine *et al.*, 2004). La Bourgogne a ainsi connu entre 1370 et 1850 (Petit Age Glaciaire) plusieurs périodes aussi chaudes que les années 1990. L'année 2003 apparaît cependant de loin comme l'année la plus chaude qu'ait connue la Bourgogne, avec une anomalie de + 5,86°C, soit 43% plus élevée que l'anomalie de la deuxième année la plus chaude enregistrée en 1523 (+ 4,10°C).

Différentes études présentées sur le site internet de l'ONERC montrent l'évolution de différents végétaux. Ainsi l'étude de l'évolution des dates de début de vendanges pour l'appellation d'origine contrôlée Tavel sur la période 1951 à 2005 et pour l'appellation

d'origine contrôlée Châteauneuf du Pape sur la période 1945 à 2005 par le Syndicat intercommunal de l'appellation Châteauneuf du Pape et Château d'Aqueria montre qu'en l'espace de 50 ans, pour ces deux appellations, les vendanges ont avancé de trois semaines et que ce phénomène s'intensifie depuis le début des années 1990. L'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) et le CTIFL (Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes) se sont intéressés à l'évolution de la date de floraison du pommier et du poirier. Ils observent ainsi que, malgré des fluctuations annuelles courantes, les séries chronologiques de la seconde moitié du XX^e siècle présentent des évolutions assez similaires vers plus de précocité de la floraison (en moyenne 7-8 j pour le pommier et 10-11 j pour le poirier entre la fin des années 80 et 2005).

L'évolution phénologique, dont nous n'aborderons pas ici tous les éléments explicatifs, dépend du niveau d'accentuation des températures moyennes annuelles mais aussi de la répartition de cette accentuation au cours des saisons. L'effet n'est en effet pas identique selon le stade phénologique (dormance, débourrement, etc.) auquel se situe le végétal (Garcia De Cortazar et al, 2004).

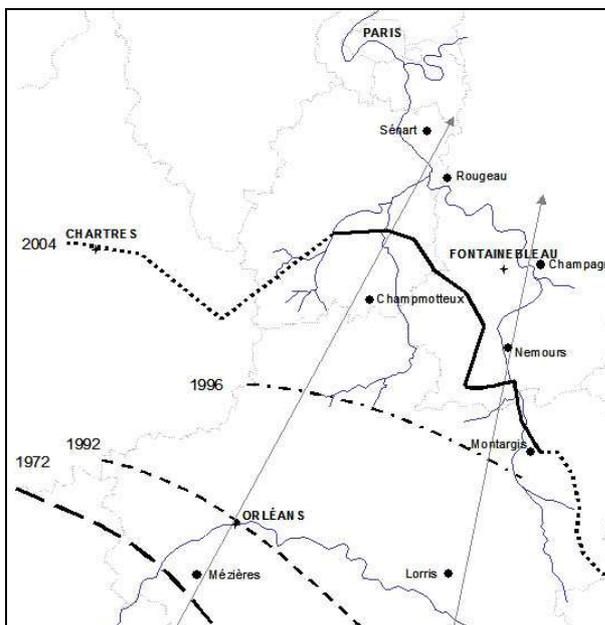


Figure A 10 : Evolution du front d'expansion de la chenille processionnaire du pin dans le Bassin Parisien entre 1972 et 2004 (ONERC, d'après INRA – Orléans).

Les végétaux ne sont pas les seuls dont les comportements sont modifiés par le climat. La vie animale est également perturbée par ces évolutions climatiques. L'ONERC prend l'exemple de la chenille processionnaire du pin étudié par l'INRA (figure A 10) et montre que « *le front*

d'expansion de la chenille processionnaire dans le sud du Bassin Parisien s'est déplacé en moyenne de 87 km vers le nord entre 1972 et 2004 en parallèle à une augmentation moyenne de la température hivernale de 1.1°C dans la même zone. La progression qui était relativement limitée entre 1972 et 1992 avec un rythme de 2.7km/an, s'est notablement accélérée ensuite, avec un déplacement moyen de 5.5 km/an durant les 10 dernières années. »

Beaugrand (2005) montre également que la survie de la morue en mer du Nord est fragilisée par le réchauffement des températures de surface, responsable de la modification des écosystèmes et plus particulièrement de la qualité et de la quantité des larves planctoniques disponibles pour les morues. Il présente également les résultats de deux études sur l'évolution et la migration des espèces du fait du changement climatique. La première, dirigée par le docteur Camille Parmesan de l'Université du Texas (Etats-Unis) suggère, à partir d'une base de données sur l'abondance ou la présence de 1 700 espèces appartenant à des écosystèmes terrestres et marins, que les espèces ont progressé vers les pôles ou migré en altitude de 6,1 kilomètres par décennie. La seconde étude, dirigée par la biologiste anglaise Alison Taylor, s'est penchée sur les changements à long terme de la répartition spatiale de 90 espèces de poissons en mer du Nord. *« Pendant la période étudiée (de 1977 à 2001), cette mer s'est réchauffée d'à peine 1,05 °C. Pourtant, sur les espèces de poissons ayant leur limite nord ou sud de répartition dans la mer du Nord (trente-six espèces), quinze ont migré en réponse au réchauffement des eaux (exemples : la sole commune et la morue de l'Atlantique) ».*

Le changement climatique peut donc aujourd'hui déjà s'observer par le biais de mesures climatiques mais également par le biais de l'observation des évolutions de la vie animale et végétale. Ses conséquences sur les écosystèmes naturels, semi-naturels, agricoles ou urbains du Monde sont cependant encore mal mesurées et les prévisions pour les futures décennies ne sont pas toujours des plus optimistes pour les partisans d'un changement minime comme nous allons le voir.

Changement climatique : prévisions pour demain

Si à l'heure actuelle, les modifications climatiques sont mesurables avant tout sur les températures, ce n'est pas le seul paramètre climatique qui devrait évoluer durant les prochaines décennies. Les derniers rapports du GIEC (2007(a), 2007(b)) font ainsi clairement ressortir que le changement climatique déjà observé est relativement faible en regard du changement climatique attendu. Ce dernier est estimé pour un ensemble de scénarii socio-

économiques prévus pour le XXI^e siècle : alors que la planète s'est réchauffée en moyenne d'environ 0,6°C au cours du XX^e siècle, ces scénarii conduisent à une estimation du réchauffement moyen à l'horizon 2100 dans une fourchette comprise entre 1,1°C et 6,4°C par rapport à la température moyenne de 1990 (la fourchette est due pour moitié aux scénarii et pour l'autre à l'incertitude). Une augmentation de 3°C peut sembler anecdotique, c'est pourtant l'écart de température qui nous sépare du dernier âge glaciaire arrivé il y a plus de 10 000 ans, époque durant laquelle le nord de l'Europe était recouvert de glaces.

A ces modifications attendues des températures moyennes s'ajoutent des effets majeurs pour certaines régions du Monde. Les évolutions régionales des précipitations moyennes en sont un. Elles devraient nettement s'accroître dans les latitudes élevées et autour de la ceinture équatoriale. En revanche, la région méditerranéenne, l'Afrique du Nord, le Sahel, le Moyen-Orient, le sud de l'Amérique Latine ou encore l'Australie deviendront probablement plus secs ou arides. Une élévation du niveau de la mer de 10 à 80 cm due à la dilatation thermique, à la fonte des glaciers et des calottes glaciaires, et à la fonte du Groenland et de l'Antarctique, est également attendue durant ce siècle avec les conséquences dramatiques que cela peut avoir : 250 millions d'habitants vivent entre 0 et 1 m d'altitude.

En ce qui concerne les phénomènes météorologiques plus turbulents (tempêtes, tornades, ouragans), les projections ne sont pas encore sûres et sont encore à l'étude¹⁶⁷.

Les impacts du changement climatiques affectent de nombreux domaines : écologique, sanitaire, économique, démographique, social, politique, etc. (figure A 11), et toutes les sociétés ne possèdent pas les mêmes armes pour les affronter. « *Ainsi, le réchauffement climatique annoncé, perturbant des équilibres, aura des effets et des conséquences très variables selon les lieux et les hommes* » (Amat-Roze, 1999). La figure A 11 fait par ailleurs bien apparaître le seuil de 2-3°C d'augmentation des températures au-dessus duquel de nombreux changements devraient survenir.

¹⁶⁷ Par exemple, l'étude IMFREX (IMPact des changements anthropiques sur la FRéquence des phénomènes EXtrêmes de vent, de température et de précipitations) menée en collaboration par le CSTB et Météo-France a entre autre permis de conclure en partie sur l'évolution des vents extrêmes (<http://imfrex.mediasfrance.org/web/>). Deux modèles de circulation générale ont été utilisés : ARPEGE-Climat de Météo-France et LMDZ de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL). Des biais ont été constatés entre les observations et les simulations de climats présents ; cependant, des tendances pour le futur ont pu être dégagées. Dans le cas des vents extrêmes, la tendance vers un renforcement ou une diminution de ceux-ci à 10 m du sol dans le futur n'est pas très significative (-2,8 m.s⁻¹ à +1,5 m.s⁻¹ pour ARPEGE-Climat et -2,0 m.s⁻¹ à +1,5 m.s⁻¹ pour LMDZ). La tendance pour ARPEGE-Climat n'est pas non plus très homogène sur toute la France avec une diminution au Centre et à l'Est et une augmentation ou pas de changement ailleurs. Pour LMDZ une diminution au Centre et au Sud de la France est observée et une augmentation des fortes vitesses est visible sur la pointe de la Bretagne et le quart Nord Est. Le reste du territoire ne présente pas de changement notable.

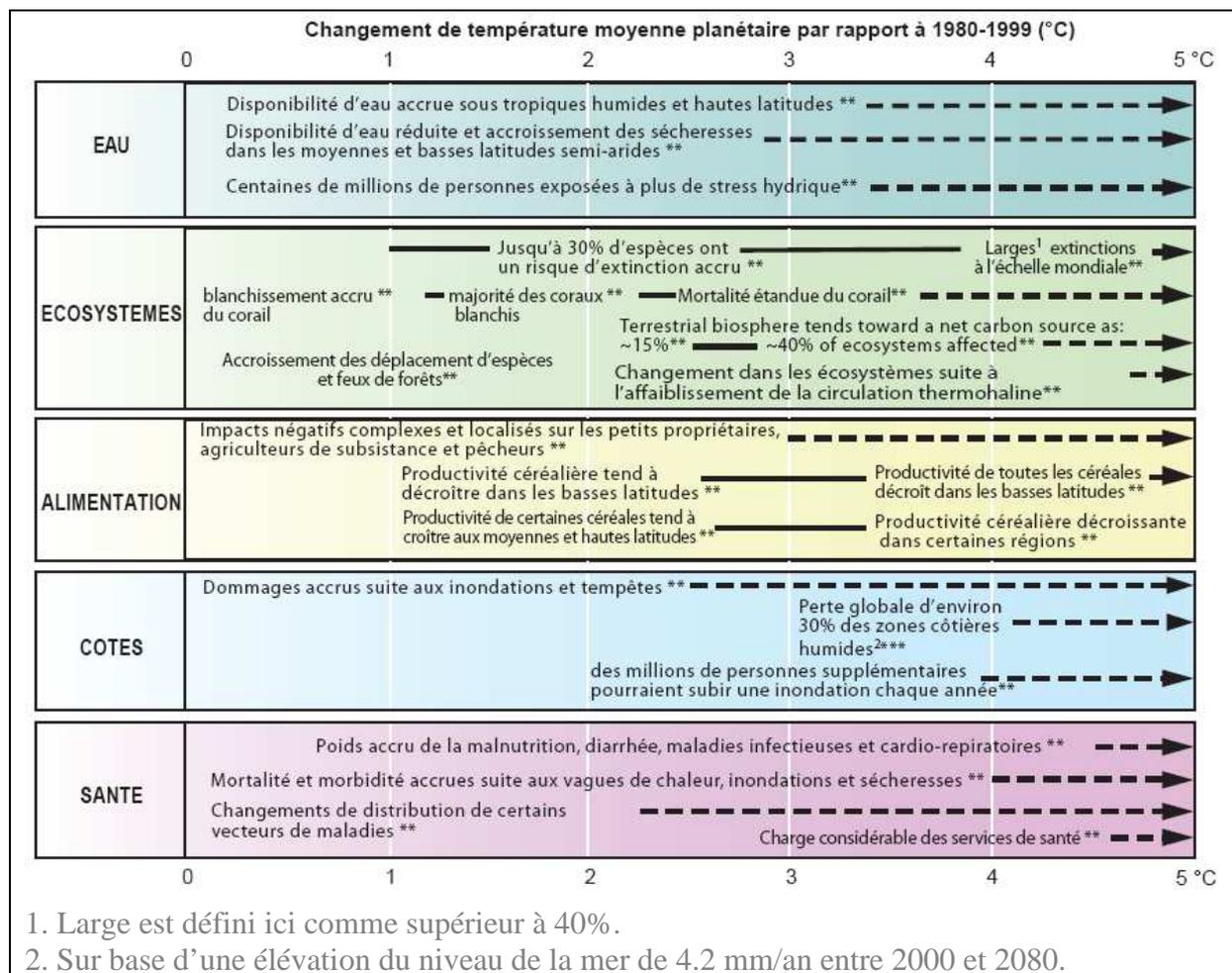


Figure A 11 : Impacts fondamentaux en fonction de l'accroissement de température moyenne planétaire (les impacts varieront en fonction de l'étendue de l'adaptation, du rythme de variation de température, du scénario socio-économique) (GIEC (2007(b)).

En ce qui concerne la santé par exemple, Besancenot (1999) estime que « si l'on extrapole à partir des situations rencontrées aujourd'hui lors des hivers particulièrement doux sur les deux tiers septentrionaux de la France, il est permis d'avancer pour le milieu du XXI^{ème} siècle, ou un peu plus tard, un recul de l'ordre de 5 à 7 % du nombre des décès enregistrés en hiver. [...] A l'inverse, il faut s'attendre à ce que les nouvelles dispositions thermiques régnant au XXI^{ème} siècle déterminent une assez franche surmortalité de saison chaude. » Besancenot (1999) signale également que « dans ces conditions, tout porte à croire que l'évolution de la mortalité au cours des prochaines décennies se fera dans le sens d'un double accroissement des gradients N-S et W-E, ainsi que d'un renforcement du nombre des décès survenant au plus fort de l'été dans les grandes villes de l'intérieur. »

Climat urbain et changement climatique

Comme le signale Mills (2007), beaucoup de livres, d'articles ou de rapports qui abordent le changement climatique et la politique à mettre en œuvre face à ce dernier, en relation avec les zones urbaines, se focalisent sur l'adaptation aux changements pour protéger les infrastructures de valeur et les ressources en eaux. L'exception à cette focalisation sur l'adaptation et la protection des infrastructures et des ressources est l'intérêt porté à la question suivante : comment le changement climatique va-t-il interagir avec l'îlot de chaleur urbain ?

Roaf *et al.* (2005) présentent une étude effectuée sur Londres (Grande-Bretagne) pour essayer de prévoir l'évolution de l'îlot de chaleur urbain du fait du changement climatique. L'intensité de l'îlot de chaleur urbain à Londres peut atteindre au centre jusqu'à 8°C. L'étude note les variations journalières de l'îlot de chaleur urbain (il est plus important la nuit) et les influences du climat régional comme la vitesse du vent, la couverture nuageuse, ou encore le rayonnement solaire global, pour ensuite mettre en relation l'évolution de ces influences avec l'évolution du climat en Grande-Bretagne. Ainsi, les simulations montrent une diminution importante en été de la couverture nuageuse sur toute la Grande-Bretagne, et plus particulièrement dans le sud. Les réductions de la couverture nuageuse pour le scénario le plus optimiste en termes de rejets en GES sont autour de 10% pour 2080, mais pour les scénarii les plus pessimistes cette réduction est plutôt de l'ordre de 25% ou plus, ce qui aura pour effet d'exacerber l'îlot de chaleur urbain. La couverture nuageuse devrait faiblement augmenter en hiver, pas plus de 2-3%, et ce pour tout le pays. L'automne et le printemps devraient devenir plus ensoleillés, et ce particulièrement dans le sud-est du pays. En été, le rayonnement solaire devrait ainsi augmenter de 10, 20 ou même 30 W.m⁻² dans le sud de la Grande-Bretagne. L'augmentation des températures devrait être plus importante les nuits que les journées durant l'hiver, et inversement durant l'été. Il devrait également faire chaud plus longtemps en été. L'îlot de chaleur urbain est également influencé par le vent, dont la vitesse devrait augmenter en moyenne entre 4 et 10% et ce particulièrement en hiver ; en été, l'augmentation devrait être plus faible.

L'ensemble de ces changements climatiques permet de déterminer l'évolution possible de l'intensité de l'îlot de chaleur de Londres (figure A 12).

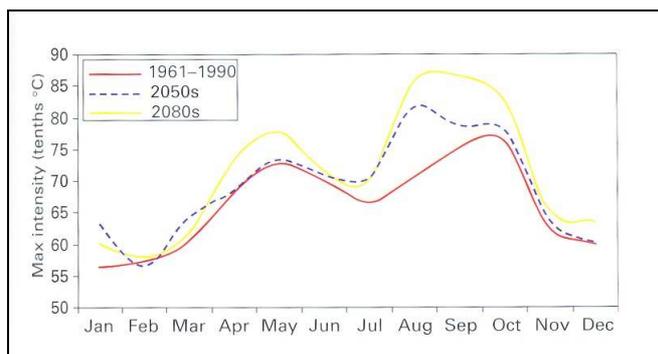


Figure A 12 : Intensité de l'îlot de chaleur de Londres aujourd'hui et dans le futur (Roaf *et al.* (2005), d'après R.L. Wilby, The Environment Agency).

Best et Betts (2004) ont essayé de modéliser l'impact du changement climatique sur la ville de New-York. Ils ont utilisé le modèle climatique atmosphérique HadAM3 du Hadley Centre et le schéma de surface MOSES 2.2 du Met Office (en Grande Bretagne). Ils ont intégré au bilan énergétique de la surface une source supplémentaire de chaleur pour représenter la présence de New-York (Etats-Unis) dans leurs modélisations. Les simulations ont été faites principalement avec deux valeurs pour la chaleur anthropique (20 W.m^{-2} , qui correspond environ à ce qui est rejeté actuellement en milieu urbain, et 60 W.m^{-2}) et deux valeurs de taux de CO_2 dans l'atmosphère (concentration actuelle ($1\times\text{CO}_2$) et double de la concentration ($2\times\text{CO}_2$)).

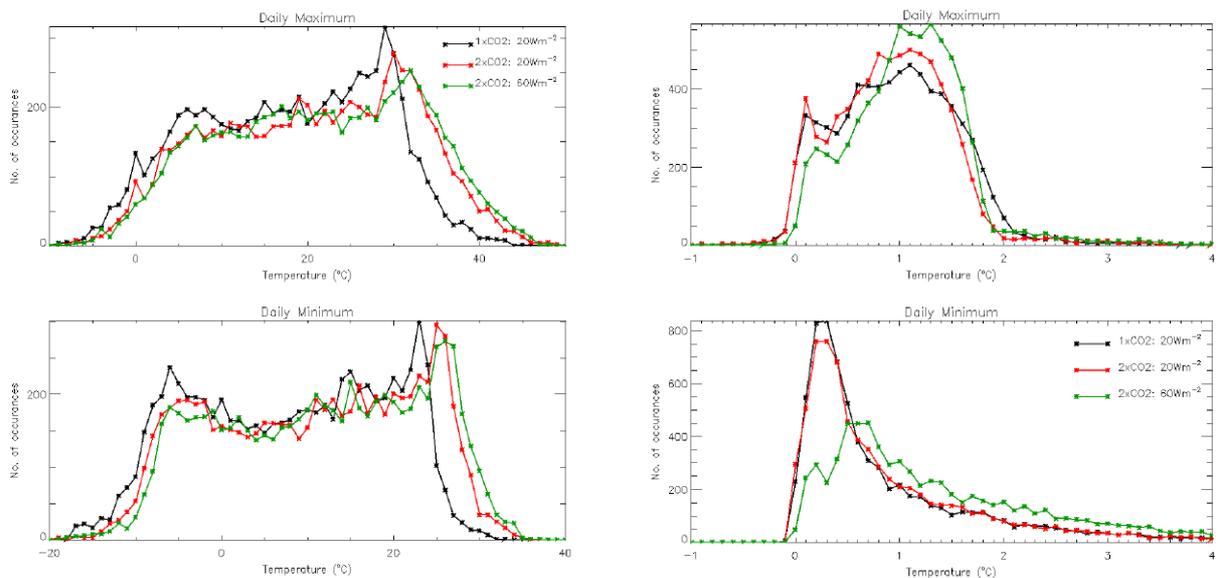
Les modélisations effectuées dont une partie des résultats est représentée figures A 13 (a et b) montrent que le changement climatique (soit le doublement de CO_2) a plus d'impact que la chaleur anthropique sur les températures. En revanche c'est l'inverse en ce qui concerne l'intensité de l'îlot de chaleur.

Best et Betts (2004) concluent plusieurs éléments de leur étude :

- Les zones urbaines doivent être intégrées au sein des simulations climatiques si nous voulons construire une réelle image de l'impact du changement climatique au sein des villes elles-mêmes ;
- L'impact de la chaleur anthropique sur le réchauffement des zones urbaines est significatif mais pas autant que celui lié à l'augmentation de la concentration en CO_2 dans l'atmosphère. Cela signifie que même si l'on essaie de limiter le réchauffement direct lié aux sources de chaleur anthropique, d'autres mesures vont être nécessaires

pour avoir plus d'effets significatifs en association avec le réchauffement global de la planète.

- L'impact d'une augmentation de chaleur anthropique dans le futur peut changer de façon significative l'intensité de l'îlot de chaleur urbain. Il pourrait y avoir moins régulièrement un îlot de chaleur d'intensité nulle. Il pourrait y avoir également un plus grand nombre d'îlot de chaleur avec une intensité plus importante que celle observée actuellement, et ceci particulièrement la nuit.



(a) Comparaison entre l'impact des sources anthropiques de chaleur et le changement climatique dû à un doublement du taux de CO₂ dans l'atmosphère. Le nombre d'occurrences correspond à 20 ans de simulations ($\approx 20 \times 365$ jours de simulations).

(b) Modification de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (différence de températures entre la zone urbaine et la zone rurale) du fait des sources anthropiques de chaleur et du changement climatique (doublement du taux de CO₂ dans l'atmosphère). Le nombre d'occurrences correspond à 20 ans de simulations.

Figure A 13 : Changement climatique et îlot de chaleur urbain (Best et Betts, 2004).

Rosenzweig *et al.* (2005) ont essayé de caractériser l'îlot de chaleur urbain pour le climat actuel et future du New Jersey (Etats-Unis) et ont regardé comment le changement climatique (qui comprend des modifications de température, de vitesse du vent, et de couverture nuageuse) pouvait altérer l'intensité, la fréquence, et l'extension spatiale de l'îlot de chaleur urbain à Newark et Camden, deux villes du New Jersey. Ils se sont appuyés pour les émissions de gaz à effet de serre sur les scénarii A2 (pessimiste-émissions élevées) et B2 (optimiste-réduction des émissions) du GIEC et sur des scénarii utilisés par le Metropolitan

East Coast Regional Assessment of Climate Variability and Change. La forte relation entre la vitesse du vent et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain ainsi qu'entre la couverture nuageuse et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain dans la région impliquent que les changements dans l'amplitude de l'îlot de chaleur urbain durant le XXI^e siècle vont dépendre en partie de la manière dont la couverture nuageuse et la vitesse du vent vont évoluer. L'analyse des scénarii de changement climatique montre que la vitesse du vent va diminuer alors que la couverture nuageuse va augmenter dans le New Jersey. Ces tendances faibles et peu significatives suggèrent que les différences de température entre les zones urbaines et non-urbaines vont, a priori, peu évoluer avec le changement climatique.

Les villes étant des contributeurs majeurs du changement climatique global, elles sont en première ligne pour mettre en œuvre des solutions performantes pour réduire leurs émissions. Ces solutions s'orientent généralement vers des villes plus compactes. Comme le signale Mills (2007), Les villes « compactes », bien conçues, densément occupée sur un espace restreint, sont intrinsèquement plus efficaces que les villes à faible densité, qui nécessitent des services et des déplacements coûteux. Ainsi, pour beaucoup, « *la ville de demain devra être dense, économe de son espace et de ses consommations d'énergie ; elle sera encore plus la ville des réseaux* » (Lorrain, 2008). Cependant, comme le signale Laruelle (2007) ou Shaw *et al.* (2007), la question des formes urbaines est délicate. Autant la réduction des émissions de gaz à effet de serre, c'est-à-dire par exemple la réduction des consommations énergétiques, orientent plutôt vers une densification des espaces urbains, autant l'adaptation au changement climatique et aux fortes chaleurs orientent plutôt vers « l'aération de la ville », la mise en place de forêt urbaine, permettant une diminution de l'îlot de chaleur. Les deux orientations proposées ici sont donc en opposition.

Ces différentes études montrent que la compréhension du climat urbain peut permettre de proposer des outils d'adaptation au changement climatique mais qu'il ne peut être le seul et unique moyen.

Les collectivités territoriales vont être un acteur important de la lutte et de l'adaptation au changement climatique. Elles ne sont cependant pas les seules. L'Etat, les entreprises, les centres de recherche, les citoyens, etc., tous ont un rôle à jouer.

Organisation face au changement climatique

Face au changement climatique, les Hommes doivent s'organiser pour prévenir tout changement excessif et se protéger face aux risques encourus. Les villes sont des acteurs indispensables mais pas les seuls.

Politique d'atténuation et d'adaptation à mettre en œuvre

La politique d'atténuation est destinée à diminuer les rejets en gaz à effet de serre mondiaux. Les actions portent ainsi sur les différents secteurs contributeurs : l'industrie, l'agriculture, le transport, le bâtiment, la production d'énergie, les déchets ou encore la déforestation. Parallèlement, des recherches sur les puits de carbone, ou les techniques de stockage du dioxyde de carbone sont effectuées. L'article 3 du protocole de Kyoto¹⁶⁸ précise ainsi que : *« Les Parties visées à l'annexe I font en sorte, individuellement ou conjointement, que leurs émissions anthropiques agrégées, exprimées en équivalent-dioxyde de carbone, des gaz à effet de serre indiqués à l'annexe A ne dépassent pas les quantités qui leur sont attribuées, calculées en fonction de leurs engagements chiffrés en matière de limitation et de réduction des émissions inscrits à l'annexe B et conformément aux dispositions du présent article, en vue de réduire le total de leurs émissions de ces gaz d'au moins 5 % par rapport au niveau de 1990 au cours de la période d'engagement allant de 2008 à 2012 »*. L'Europe des quinze¹⁶⁹ doit globalement diminuer ses émissions de 8% et la France doit pour sa part stabiliser ses émissions à leur niveau de 1990.

L'adaptation part du principe que malgré les efforts effectués en termes de réductions des rejets en gaz à effet de serre, une modification climatique probable aura lieu à laquelle il sera nécessaire de s'adapter. *« Elle consiste à faire évoluer les activités humaines et les écosystèmes afin de limiter les dommages que pourront occasionner les changements climatiques qui n'auront pu être évités et, dans quelques cas, de saisir les opportunités créées par les évolutions favorables de certaines régions ou secteurs d'activité »* (ADEME, 2007). Cette adaptation nécessite d'être pensée et réfléchie pour ne pas entrer en conflit avec la nécessité de réduire les rejets en GES (figure A 14). En effet, de nombreuses solutions, comme la climatisation pour améliorer le confort thermique d'été, peuvent avoir comme

¹⁶⁸ Le protocole de Kyoto a été adopté le 11 décembre 1997, ouvert à ratification le 16 mars 1998 et entré en vigueur le 16 février 2005 (Bressol, 2006).

¹⁶⁹ Europe des quinze = Italie, Irlande, Danemark, Grèce, Luxembourg, Portugal, Allemagne, Royaume-uni, France, Belgique, Pays-Bas, Espagne, Autriche, Suède, Finlande.

conséquence directe une surconsommation énergétique et une augmentation des rejets de gaz à effet de serre.

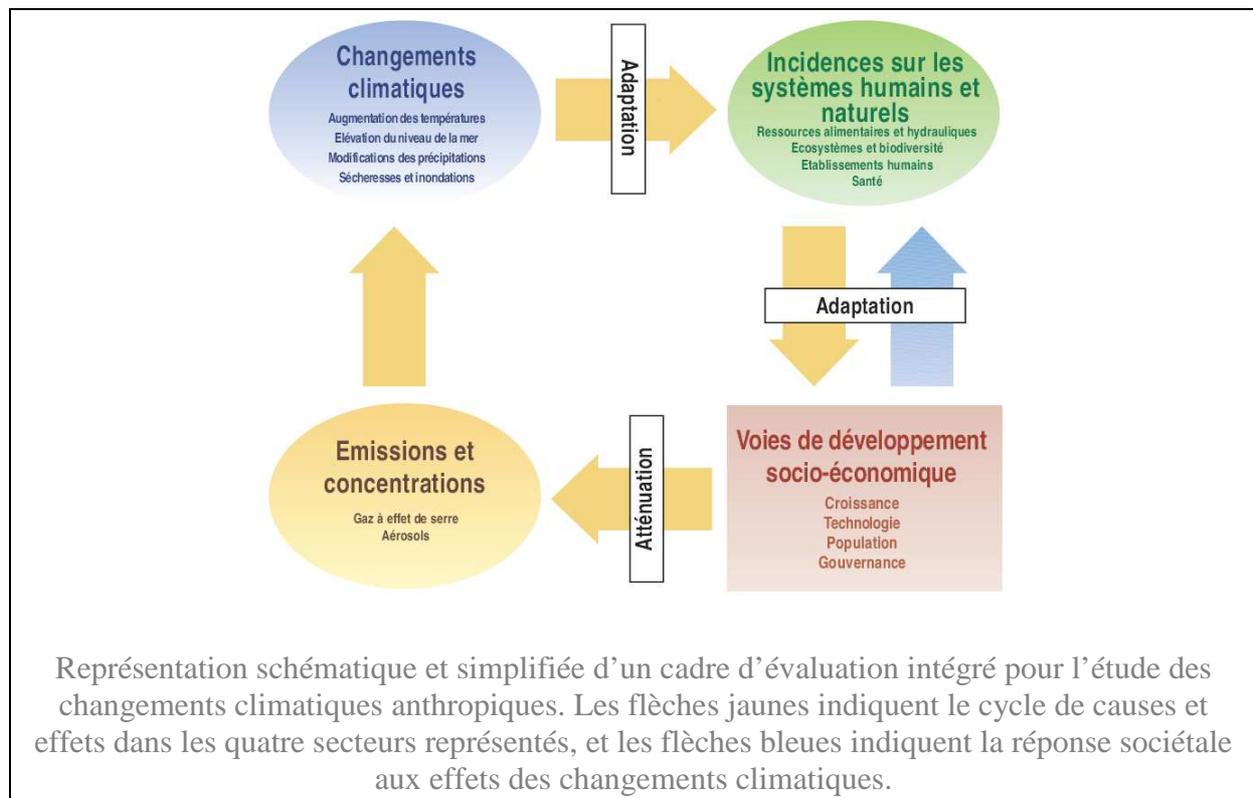


Figure A 14 : Changements climatiques — un cadre intégré (GIEC).

Nicholas Stern, économiste britannique, a présenté fin 2006 un rapport sur les conséquences économiques du changement climatique (Stern, 2006). Si certaines de ces hypothèses de travail ont été critiquées, il est l'un des premiers à avoir essayé de chiffrer les coûts et les risques globaux du changement climatique. Ainsi selon ce rapport, « *Utilisant les résultats de modèles économiques officiels, la Revue estime que si l'on ne réagit pas, les coûts et les risques globaux du changement climatique seront équivalents à une perte d'au moins 5 % du PIB mondial chaque année, aujourd'hui et pour toujours. Si l'on prend en compte un éventail plus vaste de risques et de conséquences, les estimations des dommages pourraient s'élever à 20 % du PIB ou plus. Par contre, les coûts de l'action, à savoir réduire les émissions de gaz à effet de serre pour éviter les pires conséquences du changement climatique, peuvent se limiter à environ 1 % du PIB mondial chaque année* ».

La difficulté pour mettre en œuvre de telles politiques d'atténuation et d'adaptation revient à la difficulté à percevoir pour tout un chacun, qu'il soit père ou mère d'une famille, responsable au sein de sa ville, acteur de la vie nationale ou encore internationale,

l'importance de son influence sur son environnement. En ce qui concerne l'adaptation par exemple, l'UKCIP (*United Kingdom Climate Impacts Programme*), dans son rapport « *Identifying adaptation options* » estime que les contraintes et barrières à une mise en œuvre immédiate d'actions sont de plusieurs ordres : une compréhension limitée de la nature et de l'étendue des risques et des vulnérabilités tant présentes que futures ; un manque de politiques, de normes, de réglementations, de guides – des insuffisances encourageant le statu quo ; un manque de disponibilité ou accès restreint aux technologies appropriées ; le coût prohibitif des options d'adaptation identifiées quand les budgets sont limités ; un manque de disponibilité du capital humain (expertise) avec des conflits de priorité ; une rigidité et des conflits sociaux, culturels, financiers (existants ou perçus) ; La nature court terme de la prise de décision et des horizons de l'aménagement, et la nécessité et l'attente d'un retour sur investissement ; un manque d'acceptation du besoin de s'adapter en relation avec l'incertitude du changement climatique ; l'impression que le changement climatique n'est pas un problème grave et la tentation d'attendre les impacts pour ensuite réagir ; l'impression que l'incertitude est trop grande pour prendre des décisions ; manque d'exemples d'adaptation ; etc. Un certain nombre de ces éléments sont directement transposable à la situation concernant l'atténuation.

Le schéma de Bossel (1999) (figure A 15) illustre bien cette divergence entre ce qu'il nomme horizon d'influence (ce qui est influencé par la personne), horizon d'attention (ce qui intéresse la personne et auquel elle porte attention) et horizon de responsabilité (ce pour lequel la personne s'engage, fait quelque chose) dans le temps et l'espace¹⁷⁰.

Idéalement, l'horizon de responsabilité et l'horizon d'attention coïncideraient avec l'horizon d'influence, mais pour cela il faudrait que la personne est conscience des influences qu'elle a sur son milieu, son environnement à court, moyen comme long termes, et qu'elle prenne

¹⁷⁰ Bossel (1999) définit ainsi ces trois horizons :

L'horizon d'influence s'étend sur tous les systèmes dans le temps et l'espace qui sont affectés significativement par les actions de l'acteur. L'horizon d'influence est une conséquence pratique des relations au sein du vrai système et du pouvoir de l'acteur. Ce n'est pas l'acteur qui définit l'horizon d'influence.

L'horizon d'attention comprend tous les systèmes pour lesquels l'acteur s'intéresse à leur comportement et à leur développement, et pour lesquels il fait attention à leur destin. L'horizon d'attention est défini par la curiosité de l'acteur et n'implique pas d'engagement de la part de l'acteur vis-à-vis du devenir des systèmes au sein de cet horizon.

L'horizon de responsabilité est limité aux systèmes qui influent sur la vie de l'acteur et pour le devenir desquels il s'engagera. L'horizon de responsabilité est défini par des considérations éthiques de l'acteur. Il implique de l'engagement de la part de l'acteur vis-à-vis du devenir des systèmes au sein de cet horizon. L'horizon de responsabilité, pour un acteur égoïste par exemple, sera limité essentiellement par lui-même. Il pourra cependant avoir un horizon d'attention aussi grand voir plus qu'une personne plus altruiste, cet horizon dépendant plus particulièrement des informations que l'on recherche et de la connaissance que l'on souhaite acquérir.

également conscience qu'elle peut modifier, si cela est nécessaire, ses influences, pour en éviter les effets négatifs.

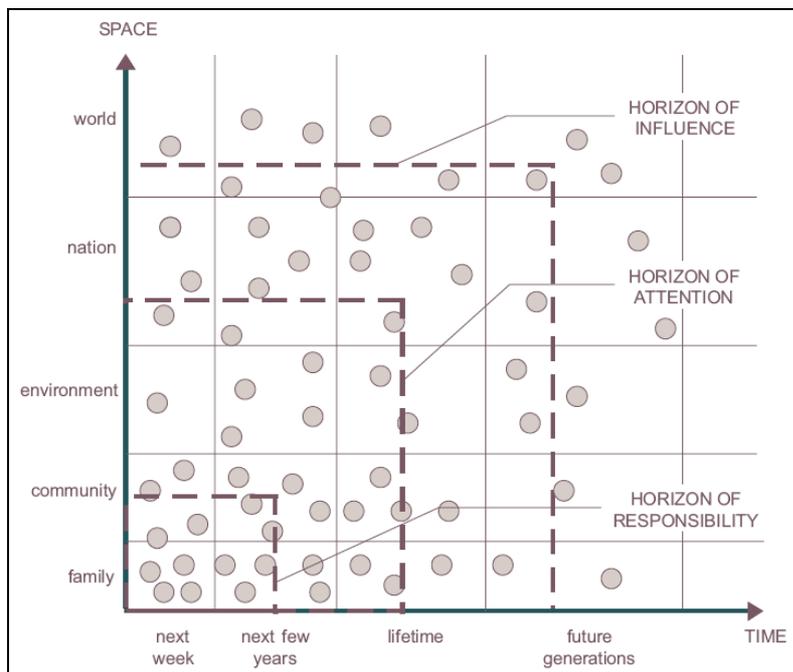


Figure A 15 : Les horizons d'influence, d'attention et de responsabilité dans le temps et l'espace. Les points indiquent la distance dans le temps et l'espace de différents intérêts humains (Bossel (1999), d'après Meadows *et al.* (1972)).

Ce schéma conforte l'idée de Amat-Roze (1999) selon laquelle « *le succès des actions de prévention, des programme de lutte engagés par les Etats est déterminé en partie par l'interprétation du risque et son degré d'acceptation* » par les populations.

Comme le signalent Roaf *et al.* (2005), « *chaque aspect de notre vie va être affecté par le changement climatique : Les régions et les lieux dans lesquels nous vivons, l'air que l'on respire, la nourriture que nous mangeons, nos emplois, nos vacances et les bâtiments dans lesquels nous vivons. Il y a un large champ de challenges, de défis à affronter pour s'accommoder de changements si rapides* ».

Les collectivités territoriales françaises prennent aujourd'hui petit à petit conscience du rôle qu'elles peuvent porter dans cette lutte contre le changement climatique. Pour ce qui est de l'adaptation, la question est encore trop faiblement abordée malgré son intérêt, comme nous allons le voir. Mais avant cela, nous nous intéressons au cas particulier des grandes agglomérations qui combine et/ou combineront climat urbain et changement climatique.

Les collectivités face au changement climatique

Dans un article sur l'adaptation au changement climatique, Hallegatte (2008) met en avant les difficultés, notamment des collectivités, à s'adapter à un changement climatique plein d'incertitudes. De nombreuses décisions s'accompagnent d'un engagement à long terme et peuvent être sensibles au climat. Il est possible de citer par exemple les plans d'urbanisation, les stratégies de gestion de risque, les infrastructures pour l'eau pluviale, et la conception et les normes dans le bâtiment. Ces décisions ont des conséquences sur des périodes allant de 50 à 200 ans. Le problème n'est pas que l'on ne sait pas construire ou concevoir pour certains climats, mais que l'on ne sait pas réellement le faire pour plusieurs : *« Pour un architecte, ce n'est pas plus difficile (ni plus cher) de concevoir un bâtiment adapté au climat de Cordoue qu'au climat de Paris. C'est par contre plus difficile (et plus cher) de concevoir un bâtiment adapté aux deux, c'est-à-dire capable d'être confortable tout au long de l'année, pas cher à chauffer en hiver, et pas cher en air conditionné, dans cette large gamme de conditions climatiques »*. Hallegatte (2008) prend également l'exemple des réseaux dont le dimensionnement dépend de la pluviométrie. Or, pour une ville telle que Toulouse, selon les modèles et les hypothèses, celle-ci peut rester inchangée ou alors diminuer de 30%. Si les modèles peuvent certes devenir de plus en plus performants, les prévisions climatiques dépendent d'un trop grand nombre de facteurs non « naturels » pour être précises. Ainsi les infrastructures doivent être conçues en connaissant qu'elles devront faire face à une gamme plus large de conditions climatiques qu'avant ; et cette gamme est et restera hautement incertaine. Hallegatte (2008) propose plusieurs solutions qui sont : l'institutionnalisation d'un planning sur le long terme pour anticiper les problèmes et y apporter des réponses adéquates ; les stratégies « sans regret », qui réduisent la vulnérabilité à un coût négatif, nul ou négligeable ; le choix de stratégies réversibles ; une réflexion et un investissement sur des durées plus courtes, l'incertitude sur le climat augmentant rapidement avec le temps ; la proposition de solutions pour s'adapter à différents climats pas uniquement techniques mais aussi institutionnelles ou financières.

Dans le cadre d'un projet de recherche du programme GICC (Gestion et Impacts du Changement Climatique) Bertrand et Larrue (2007) se sont intéressés à la manière dont le changement climatique est traduit en objet de politique territoriale, et plus particulièrement à l'échelle régionale. Comme ils le signalent, l'importance du rôle des collectivités territoriales dans la mise en œuvre de la politique nationale sur le changement climatique n'est apparue qu'une fois la question des modalités d'actions posées suite à l'accord européen sur les

quotas¹⁷¹. Ainsi, la prise en compte du problème de l'effet de serre d'origine anthropique et du changement climatique conjoint n'est apparue que récemment dans l'action des collectivités locales. La montée progressive de ce problème parmi les préoccupations environnementales des français¹⁷² peut expliquer ce nouvel intérêt de la part des collectivités.

Un des premiers points que Bertrand et Larrue (2007) abordent au sein de leur rapport est la difficulté que rencontrent les villes à articuler plusieurs échelles d'actions et d'analyse qui ne correspondent pas au découpage administratif actuel¹⁷³. Ce problème n'est pas particulier à la question de la gestion du changement climatique mais se retrouve également dans la gestion des risques et la gestion de l'eau. Ce « décadre urbanistique »¹⁷⁴, pour reprendre le terme de Cyria Emelianoff citée par Bertrand et Larrue (2007), intervient dès lors que les collectivités cherchent à intégrer des enjeux climatiques dans leurs actions. Ainsi, la problématique du changement climatique doit permettre d'engager une réflexion sur la façon dont « *les collectivités peuvent mener des politiques prenant en compte à la fois les contraintes de leurs territoires et celles des territoires infra et supra* » (Bertrand et Larrue, 2007). Cette nécessaire, et presque impérative, coopération souligne, selon Bertrand et Larrue (2007), le fait que « *la prise en compte des changements climatiques dans les politiques territoriales pose donc des problèmes qui sont autant d'ordre technique qu'organisationnel et hiérarchique* ».

¹⁷¹ « Si le Programme National de Lutte contre le Changement Climatique (PNLCC) adopté en 2000 souligne l'importance d'une déclinaison territoriale des mesures nationales, il reste, pour la présentation comptable des économies d'émissions à réaliser, organisé par grands secteurs d'interventions au niveau national (découpage par ministère). Et ce n'est qu'en 2004, avec l'annonce du Plan Climat de 2004, que l'importance à accorder aux acteurs territoriaux [a été] renforcée, en avançant notamment l'idée de Plans Climat Territoriaux. » (Bertrand et Larrue, 2007)

¹⁷² Selon un sondage TNS/SOFRES réalisé en 2006, en tête des risques environnementaux qui semblent les plus inquiétants pour l'avenir de la planète arrive le réchauffement de la planète et le changement climatique (pour 42% des personnes), suivi par la pollution de l'eau (38%), la pollution de l'air (32%), la disparition des forêts (25%), l'apparition de nouvelles maladies graves (23%), etc.

¹⁷³ « L'action locale face aux changements climatiques permet d'appréhender concrètement l'articulation délicate entre « durabilité interne » et « durabilité externe » des territoires [...]. Les « politiques climatiques locales » semblent en effet introduire un renouvellement des horizons spatiaux et temporels de l'action territoriale, renouvellement se heurtant évidemment aux horizons classiques sur lesquels est encore très largement fondée l'action politique locale (basée sur un découpage spatial en circonscription et un découpage du temps en durée de mandat). » (Bertrand et Larrue, 2007)

¹⁷⁴ « L'évolution des villes a des conséquences sur la biosphère qui pèsent en retour, de manière de plus en plus visible, sur les sociétés. L'inscription de la problématique urbaine dans cette évolution planétaire induit un décadre urbanistique, amorcé par exemple par les villes qui engagent un plan local de lutte contre l'effet de serre, visant à réduire leurs émissions de CO₂. Un lien local-global se tisse, qui ne se réduit pas à l'affirmation d'une logique de compétition économique. Avec la Terre comme horizon ou cadre de vie, l'urbanisme se trouve assez brutalement confronté à une multiplicité d'enjeux relatifs à l'articulation des échelles spatio-temporelles, qui retentissent sur les logiques d'implantation des activités ou de l'habitat, les modes de mobilité, l'approvisionnement énergétique, les choix des matériaux, etc. Ce recadrage dans le temps et l'espace s'impose dès que les externalités du développement urbain commencent à être prises en compte. » (Emelianoff, 2004)

Bertrand et Larrue (2007) ont observé pour les régions et les collectivités territoriales les différentes actions mises en œuvre pour prendre en compte les changements climatiques dans leurs politiques. Leur analyse montre que : « *En matière d'effet de serre et de changement climatique, le thème de l'atténuation est le plus développé pour toutes les régions. La présence d'éléments liés aux effets des changements climatiques sur le territoire est rare et témoigne d'une prise de conscience de la vulnérabilité du territoire à des phénomènes globaux.*

Concernant l'adaptation, un premier niveau de prise en compte peut être la mise en relation avec des évènements climatiques marquants (tempête, canicule), qui soulignent une prise en compte de la fragilité du territoire, d'une nécessité de vigilance et donc d'adaptation vis-à-vis du futur proche. Les phénomènes de sécheresse et de canicule suscitent l'élaboration de plans canicule issus de la Préfecture, de conférences, de rapports techniques de la Région, ou de recommandations de la DIREN.

[...] Si le thème de l'atténuation peut commencer à être articulé dans les discours politiques régionaux, celui de l'adaptation n'apparaît absolument pas porté (et encore moins « porteur ») par la classe politique régional. Il semble davantage introduit par des scientifiques et des techniciens. »

Ainsi les initiatives locales sur les changements climatiques incorporent peu, voire pas, de volet adaptation dans leur politique climatique. Pourtant les volets « atténuation » et « adaptation » sont indissociables pour mener une politique climatique territoriale cohérente. Bertrand et Larrue (2007) distinguent ainsi dans leur étude ce qui relève de l'adaptation précautionneuse de ce qui constitue plutôt une adaptation aggravante¹⁷⁵, soulignant, qu'une fois, « *en fonction des buts poursuivis et des échelles d'actions et d'observation des problèmes, les avis divergent et divergeront fortement sur la pertinence des réponses adaptatives à mettre en œuvre* »¹⁷⁶. L'adaptation, comme l'atténuation, nécessite une

¹⁷⁵ « (...) il peut y avoir une adaptation aggravante et une adaptation précautionneuse. L'exemple type de l'adaptation aggravante c'est à la suite de la canicule l'annonce gouvernementale pour demander qu'il y ait de la climatisation dans toutes les maisons de retraite. Or tout le monde sait bien aujourd'hui que la climatisation technologique –je ne parle pas de la climatisation mécanique- est un phénomène aggravant. Donc on a bien une adaptation aggravante. Et naturellement, il nous faut travailler sur une adaptation qui préserve. » (MIES, 2006) d'après Bertrand et Larrue (2007).

¹⁷⁶ On peut notamment citer comme moyen d'adaptation le cas du recours aux canons à neige en montagne pour palier à la réduction de l'enneigement, qui suscitent des avis très divergents entre acteurs locaux et acteurs centraux. Perçue comme une solution locale et respectueuse de l'environnement au niveau local, la généralisation de l'usage des canons à neige est au contraire considérée au niveau central comme « *une parade de court terme* », une « *fuite en avant technologique (...) coûteuse et non durable à long terme* » dans le projet

coordination et une coopération multi-échelles et « *toute politique d'adaptation doit non seulement se développer selon une logique de prévention, en limitant l'exposition des populations aux risques encourus (inondations, glissements de terrain...) par des choix d'actions adéquats, mais aussi suivre une logique de solidarité afin de pouvoir venir soutenir les zones les plus vulnérables aux événements extrêmes ne disposant pas nécessairement de moyens suffisants.* » (Bertrand et Larrue, 2007).

Ainsi, malgré la juste nécessité de tenir compte dès le départ de l'adaptation au changement climatique pour avoir une politique climatique cohérente, le volet atténuation tient la dragée haute au volet adaptation. Si la tardive implication sur ce sujet de la politique nationale (et même internationale) peut justifier en partie ce manque d'intérêt, cela n'explique pas tout et Bertrand et Larrue (2007) identifient principalement trois autres raisons :

- Les actions d'atténuation représentent aux yeux des élus locaux des potentiels de gains en termes économiques (économies d'énergie, création d'emplois non délocalisables, etc.), mais également en terme politiques et d'image. Inversement, l'adaptation ne semble pas offrir de gains et apparaît comme couteuse et anxiogènes pour les décideurs comme pour le grand public¹⁷⁷.
- Les pratiques liées à l'atténuation, conçues en termes de doubles dividendes, gagnantes-gagnantes¹⁷⁸, s'appuient sur des éléments de politiques préexistantes que les acteurs locaux connaissent déjà, ce qui n'est pas le cas pour l'adaptation. Les actions envisagées pour l'adaptation s'appuient sur la politique existante de prévention et de gestion des risques et de réparation des catastrophes naturelles, ce qui montre l'absence de réflexion autour de ce que pourrait être une action adaptative. Pour

de stratégie nationale d'adaptation aux changements climatiques (ONERC, 2005).d'après Bertrand et Larrue (2007)

¹⁷⁷ « *L'action climatique locale peut participer à des stratégies de marketing territorial et renforcer l'attractivité d'un territoire grâce à l'image d'une collectivité vertueuse, engagée pour le maintien et l'amélioration de la qualité de vie de son territoire mais également pour la santé de la planète. Inversement, les gains en matière d'adaptation n'apparaissent ni distinctement ni directement pour les décideurs comme pour le grand public. Les perspectives qu'ouvrent des actions d'adaptation apparaissent pour les acteurs locaux comme coûteuses, hors de portée, voire angoissantes, comme un signe de menaces et d'ennuis supplémentaires pour le territoire. Logiquement, aucun gain politique direct n'apparaît clairement associé aux actions adaptatives, ce qui peut largement expliquer les réticences des élus à aller sur ces terrains-là. On observe donc des mesures d'atténuation, qui bénéficient localement d'un portage politique fort, et des mesures d'adaptation, qui apparaissent essentiellement bénéficier d'un portage technique, par les services.* » (Bertrand et Larrue, 2007)

¹⁷⁸ « *On affiche une action responsable sur le climat, donc une collectivité responsable et inscrite dans son environnement globale et on réduit les factures énergétiques (de la collectivité, du territoire, des ménages...), la dépendance énergétique du territoire, on améliore la qualité de l'air, l'offre de transport, la qualité des logements, on soutient et suscite de l'activité économique et des emplois non délocalisables (développement de filières d'énergie renouvelables sur la base de gisements locaux)* ». (Bertrand et Larrue, 2007)

Bertrand et Larrue (2007), « *on ne sait pas faire et on est là sans aucun doute au tout début d'un ample mouvement d'acculturation* »¹⁷⁹.

- A ces deux points s'ajoute la posture attentiste des différents acteurs qui pensent qu'aucun d'eux ne peut endosser la responsabilité de l'adaptation des territoires¹⁸⁰.

L'ADEME (2007) explique que « *pour être capable de s'adapter, il faut percevoir les risques encourus et en avoir pris conscience* » et identifie également trois causes pouvant expliquer les échecs d'adaptation :

- Le manque d'anticipation : « *c'est le cas lorsque la situation à imaginer est tellement différente de celle que l'on vit qu'elle ne revêt aucune réalité* » (ADEME, 2007).
- L'existence de forts conflits d'intérêts locaux : « *Abandonner un investissement qui a été coûteux, contre un gain potentiel pour l'environnement de demain, n'est pas chose facile, que ce soit pour un individu, ou pour un groupe tout entier car cela nécessite qu'une valeur supérieure prenne le pas sur l'égoïsme « naturel »* » (ADEME, 2007). L'exemple des stations de montagne ayant investi dans les canons à neige peut être donné.
- L'incapacité à s'appropriier la responsabilité du problème : « *Ici, le problème a été appréhendé avec justesse, des solutions ont été imaginées, mais la motivation pour surmonter les intérêts individuels ou collectifs fait défaut. Le groupe peut considérer, étant donné le niveau des enjeux, la sauvegarde de la planète, que la solution n'est pas de son ressort, mais qu'elle engage un niveau supérieur : l'Etat, les accords*

¹⁷⁹ « Ainsi, en Nord-Pas-de-Calais, les travaux pris en charge par le prêt à taux 0 « Isolto » sont des travaux d'isolation thermique classique de l'habitat (des toitures). Ils sont donc compris comme isolation du froid et l'amélioration du confort d'été n'est mentionnée dans aucun document se rapportant à ce dispositif. Les actions financées sont exclusivement conçues dans une logique d'atténuation du changement climatique et ce point peut souligner que la « culture » de l'adaptation aux impacts du changement climatique semble encore relativement absente. » (Bertrand et Larrue, 2007)

¹⁸⁰ « Enfin, en ce qui concerne l'engagement de mesures d'adaptation au niveau régional, chacun des acteurs paraît adopter une posture attentiste, et attend que l'autre fasse le premier pas. Côté Région, on rappelle que les perspectives ouvertes par la réparation des impacts liés au changement climatique ne sont pas supportables pour les finances de la collectivité. Côté Etat, on explique qu'on ne pourra rien faire seul. Il y a là une délicate question de répartition des compétences. Qui est responsable et quelles sont les responsabilités de chacun dans les actions à mettre en œuvre ? Sur le terrain, si les mesures d'atténuation peuvent être facilement endossées et portées par tous les acteurs, les actions d'adaptation semblent davantage incomber aux seuls services de l'Etat, qui tiennent en réponse un discours de coresponsabilité : l'Etat déconcentré ne peut rien seul et le défi de l'adaptation des territoires ne se relèvera qu'avec la participation de tous les acteurs locaux. » (Bertrand et Larrue, 2007)

internationaux... Il y a impossibilité de s'approprier la responsabilité attendue »
(ADEME, 2007).

Ce manque d'intérêt pour la thématique de l'adaptation s'accompagne, selon Bertrand et Larrue (2007), d'un manque d'instruments et d'outils et par une absence au sein des discours politique des enjeux de l'adaptation aux effets du changement climatique. La Réunion semble cependant se préoccuper davantage de ces questions du fait de sa plus grande vulnérabilité. Le peu d'outils et d'actions mis en œuvre s'orientent vers une accentuation des politiques de prévention et de gestion des risques et par un renforcement des connaissances sur les impacts que pourraient subir la région du fait des effets du changement climatique.

La mise en place d'actions face à la problématique du changement climatique de la part des gouvernements locaux est donc un mouvement en émergence porté en premier lieu principalement par les villes. Les politiques régionales de développement durable préexistantes ou en cours d'élaboration participe plus ou moins fortement la résolution du problème global du changement climatique qui devient alors « *un critère de durabilité de toute action locale* » (Bertrand et Larrue, 2007).

Pour Bertrand et Larrue (2007), « *il convient alors de s'interroger sur les effets de la thématique climat dans le champ régional en matière de développement durable, et notamment sur d'éventuels phénomènes de concurrence, d'occultation ou au contraire de renforcement mutuel entre climat et développement durable, ou du moins entre les différents instruments de politiques publiques qui leur sont dédiés (comme par exemple l'Agenda 21 et le Plan Climat territorial).* »

L'étude du climat urbain s'intègre aujourd'hui pleinement dans la recherche de solutions d'adaptation au changement climatique. Les grandes agglomérations ne peuvent plus faire abstraction de leur particularité climatique et doivent la prendre en compte, comme le fait par exemple Londres (Grande-Bretagne) (London Climate Change Partnership, 2006)¹⁸¹, dans leur politique d'adaptation et/ou d'aménagement urbain.

¹⁸¹ La présence de l'îlot de chaleur, son incidence sur la santé et les moyens disponibles actuellement pour diminuer son intensité comme les toits verts ou les toits froids, ont été notés et discutés dans le rapport de 2006 « *Adapting to climate change : Lessons for London* » du London Climate Change Partnership.

Conclusion

Les villes françaises ont mis en place une gestion des événements climatiques extrêmes (inondations, canicules, tempêtes) faisant peu (pas) cas de la particularité climatique importante de certaines d'entre elles : le climat urbain. Ce dernier a pourtant une influence non négligeable dans la gestion notamment des vagues de chaleur puisqu'il ne permet pas de repos nocturne réparateur aux organismes humains. L'aspect actuellement exceptionnel de ce type d'évènement pourrait excuser l'attentisme des politiques sur la question de la prise en compte de la présence des îlots de chaleur. Cependant, la communauté scientifique s'accorde aujourd'hui pour annoncer que le changement climatique accentuera la fréquence d'un des événements climatiques pour lequel la synergie avec le climat urbain peut être particulièrement meurtrière ou inconfortable : la canicule.

Prendre en considération l'îlot de chaleur urbain, essayer d'en tenir compte pour gérer au mieux ces événements caniculaires est du domaine de l'adaptation au changement climatique et, nous l'avons vu, ce thème n'est pas encore très populaire auprès des collectivités territoriales françaises. Contrairement à la lutte contre le changement climatique, qui permet aux collectivités qui s'y engagent de bénéficier d'une image de ville dynamique, l'adaptation est associée au défaitisme, à l'échec et ne permet pas encore une valorisation auprès des citoyens. Pourtant des solutions existent telles que l'institutionnalisation d'un planning sur le long terme pour anticiper les problèmes et y apporter des réponses adéquates ; les stratégies « sans regret », qui réduisent la vulnérabilité à un coût négatif, nul ou négligeable ; le choix de stratégies réversibles ; etc. Manque d'anticipation et d'intérêt, forts conflits d'intérêts locaux, ou encore incapacité à s'approprier la responsabilité du problème de la part des politiques freinent la réflexion autour de la problématique de l'adaptation et l'intégration, par conséquence, de l'enjeu du climat urbain dans cette problématique.

Annexe 3 Modifications climatiques engendrées par la présence d'un milieu urbain

Si la recherche sur le climat urbain a réellement démarré à partir des années 1960 (Changnon, 1992) permettant ainsi une avancée significative des connaissances sur le sujet, sa présence a été notée bien avant. Le climat urbain est en effet tout d'abord un phénomène qui s'observe, se mesure. Un des pionniers en ce domaine est Luke Howard, un pharmacien anglais, qui publie en 1818-19 « The climate of London », premier ouvrage qui présente les modifications météorologiques engendrées par une ville. Les données météorologiques recueillies depuis de nombreuses années permettent aujourd'hui de confirmer les premières observations faites par Luke Howard telles que la présence d'un îlot de chaleur urbain.

L'utilisation de données météorologiques nécessite quelques précautions, que ce soit du point de vue des données en elles-mêmes que du point de vue de leur interprétation. En effet, les sources d'erreurs sont multiples et ceci notamment pour l'étude de longues séries temporelles de paramètres climatiques. Cela peut concerner autant l'appareil qui vieillit et est modifié au fil du temps, que l'évolution du cadre dans lequel se trouve l'appareil de mesures (urbanisation, arbres, etc.) (Dettwiller, 1978). Ainsi, les stations météorologiques installées en zone urbanisée mesurent des données représentatives d'un lieu particulier et unique. Elles ne « voient » qu'une portion de l'espace qui les entoure. Les différentes stations permettent ainsi de refléter la complexité et la diversité des environnements urbains. Le climat urbain et plus particulièrement l'îlot de chaleur urbain s'apparente ainsi beaucoup plus à un archipel avec différents quartiers chauds plus qu'à une couche uniforme (Rosenzweig *et al.*, 2005). Chaque ensemble de rues et de bâtiments forme 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. La généralisation de mesures d'un site urbain à l'ensemble de la ville et les interprétations qui en découlent doivent donc être faites avec précaution.

L'étude du climat urbain nécessite de ce fait de distinguer différentes échelles horizontales et verticales (Oke, 2004, 1978) : la micro-échelle, l'échelle locale et la méso-échelle.

La micro-échelle (10^{-2} à 10^3 m)¹⁸² 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. Dans l'idéal, les stations urbaines devraient éviter ces influences microclimatiques mais, en réalité, ceci est difficilement réalisable.

L'échelle locale (10^2 à 5×10^4 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 2×10^5 m) correspond à la zone influencée par exemple par la présence d'une agglomération. Une unique station ne peut pas représenter cette échelle.

Le climat urbain observé aujourd'hui sur des agglomérations comme Paris est le résultat d'une longue urbanisation. La température élevée, et ce particulièrement la nuit, est la manifestation la plus connue, mais ce n'est pas la seule. La pluviométrie, l'humidité, le vent, l'insolation sont également modifiés (Oke, 1978. Escourrou, 1981, 1991).

Nous pouvons constater les effets des agglomérations sur le climat « local » en observant l'évolution dans le temps des données climatiques grâce aux mesures effectuées parfois dès le début des années 1800. Les données plus actuelles, recueillies sur plusieurs stations de l'agglomération urbaine ou lors de campagne de mesures, permettent, pour leur part, une étude spatiale et de mettre en évidence cet archipel climatique formé par la ville, pour reprendre le terme de Rosenzweig *et al.* (2005).

Evolution dans le temps des paramètres climatiques

La corrélation entre l'urbanisation croissante et l'évolution de paramètres climatiques tels que la température et l'humidité a été constatée dans de nombreuses villes du monde. Dettwiller (1978) ou encore Escourrou (1990) se sont penchés sur le cas de l'agglomération parisienne mettant ainsi en avant l'évolution des températures aux XIX^e et XX^e siècles.

¹⁸² 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.

La figure A 16 représente l'évolution des températures moyennes à la station de Montsouris à Paris entre 1800 et 1970.

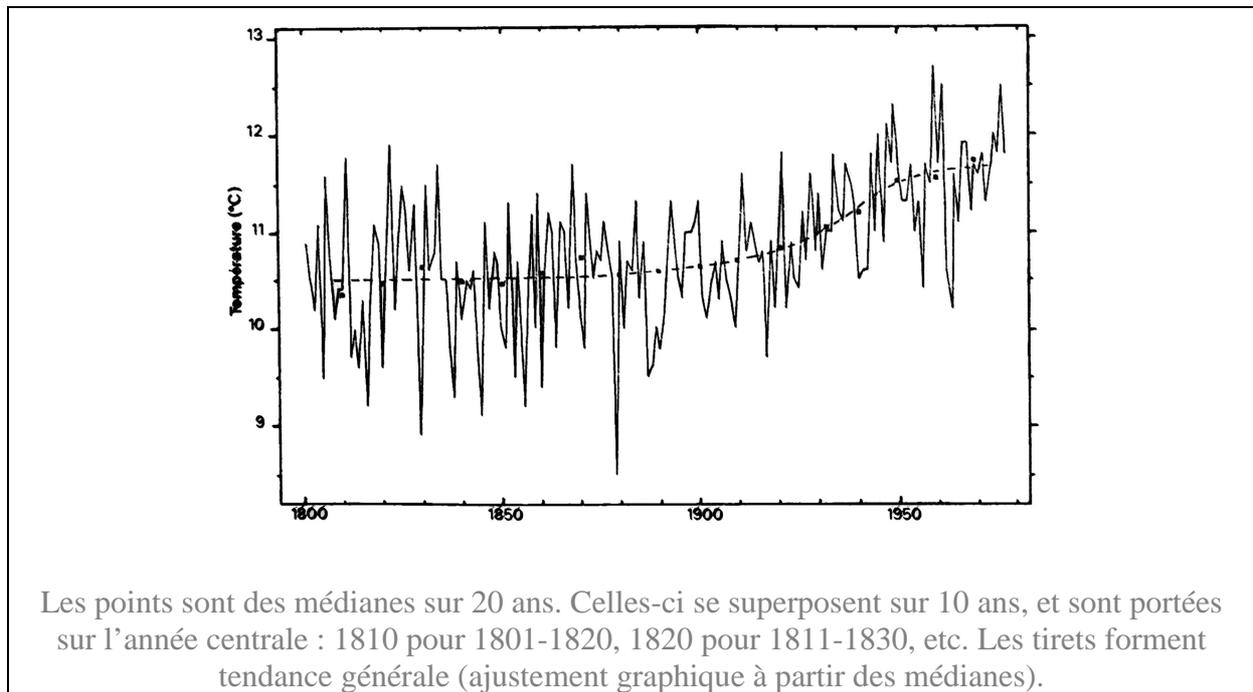


Figure A 16 : Série des températures moyennes annuelles à la station de Montsouris à Paris (Dettwiller, 1978).

L'étude de la figure A 16 montre la relative stabilité des températures au XIX^e siècle suivie d'une hausse très nette dans la première moitié du XX^e siècle (période durant laquelle fut observée une industrialisation croissante et polluante). L'élévation plus mesurée durant la deuxième moitié du XX^e siècle est confirmée par les données plus récentes de Météo-France. Cependant c'est au niveau des températures minimales absolues observées la nuit que l'évolution est la plus importante : la ville ou, plus précisément, les constructions urbaines stockent la chaleur le jour et la rejettent durant la nuit freinant ainsi, contrairement au milieu rural, la baisse des températures nocturnes.

L'augmentation des minima relevés à la tour Saint-Jacques (figure A 17), au centre de Paris, a été l'une des plus importantes en comparaison avec celle des minima à Paris (station de Montsouris), Orly, Villacoublay ou encore Melun (Escourrou, 1991). En à peine plus de vingt ans, on observe ainsi une augmentation d'environ 3°C des minima de températures relevées à la tour Saint-Jacques.

Une des conséquences directes de la hausse des températures minimales a été la baisse du nombre de jours de gel ainsi qu'un raccourcissement de la durée moyenne pendant laquelle on

peut observer des gelées. Elle a aussi influé sur les chutes de neige et la congélation de la Seine.

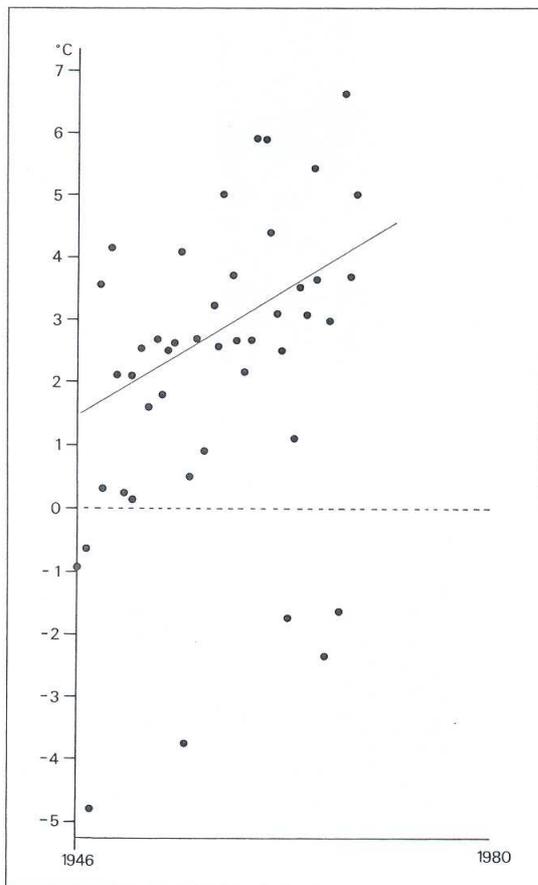


Figure A 17 : Evolution des minima de température depuis 1946 au centre de Paris, station de la tour Saint-Jacques (Escourrou, 1991).

Une diminution des brouillards¹⁸³ a également été observée au sein de la capitale française. Cette diminution est directement liée à la présence de l'îlot de chaleur et à la baisse de l'humidité relative¹⁸⁴. De plus, la pollution atmosphérique n'est plus le facteur déclenchant de la formation des brouillards contrairement au début du XX^e siècle où la forte pollution due aux industries engendrait souvent une sorte de brouillard appelé *smog* en anglais (pour *smoke*, la fumée, et *fog*, le brouillard). On peut ainsi observer à la station de Montsouris (Paris) que le nombre de jours de brouillard est passé de 107 jours (1921-1925) à 11 jours (1976-1980)

¹⁸³ Le brouillard est une forme nuageuse qui se constitue très près du sol. Sa formation est due soit au mélange d'air chaud et humide avec de l'air plus froid, soit au contact d'air chaud et humide avec le sol refroidi. Il se produit alors un processus de refroidissement de l'air chaud et humide qui fait condenser la vapeur d'eau. Pour se former, le brouillard nécessite donc que l'air est un taux d'humidité élevé, permettant alors la condensation de la vapeur d'eau suite à un refroidissement.

¹⁸⁴ L'humidité relative de l'air (ou degré d'hygrométrie) correspond au rapport de la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air, P_{vap} , sur la pression de vapeur saturante ou tension de vapeur à la même température P_{sat} .

(Escourrou, 1990). Les diminutions de la fréquence et de l'intensité des brouillards ont eu pour conséquence une augmentation de la durée d'insolation¹⁸⁵.

L'étude de Landsberg (1979) sur Columbia (Etats-Unis) entre 1968 et 1975 va également permettre de mettre en évidence le rôle de l'urbanisation dans les modifications climatiques. En 1968, Columbia, qui se trouve à l'ouest de Baltimore et au nord de Washington, est encore une zone rurale et compte 200 habitants sur son territoire de 54 km². Son aménagement étant programmé, une équipe de chercheurs de l'Université du Maryland, dont Landsberg, décide de mesurer les évolutions climatiques générées par l'urbanisation croissante de Columbia. En effet, dans la plupart des études mettant en avant des modifications climatiques générées par la présence d'une ville, il est impossible de connaître la part liée à la position géographique de la ville de celle de l'urbanisation pure. L'expérience de Columbia va ainsi permettre de confirmer le rôle de l'urbanisation dans l'apparition de l'îlot de chaleur ainsi que dans la diminution de la vitesse et l'augmentation de la turbulence du vent¹⁸⁶. Elle ne permettra cependant pas de statuer sur l'influence de la ville sur la pluviométrie.

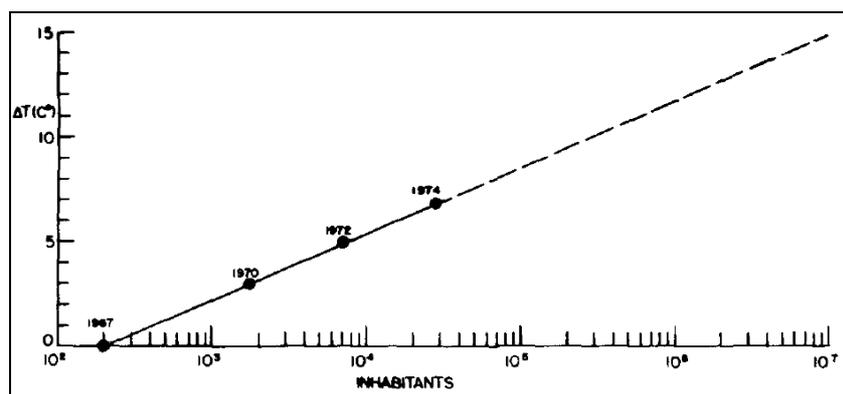


Figure A 18 : Valeur de l'îlot de chaleur maximum à Columbia en 1967, 1970, 1972 et 1974 en fonction de la population, avec une extrapolation pour anticiper la taille « finale » (Landsberg, 1979).

En 1975, la population de Columbia atteint 20 000 habitants. L'évolution de la différence de températures entre le centre urbain et la zone rurale voisine (figure A 18) s'accorde avec la

¹⁸⁵ La durée d'insolation désigne la somme des intervalles de temps durant lesquels un objet, un lieu est soumis à une insolation au cours d'une période donnée que l'on choisit, sauf indication contraire, comme égalant un jour entier, soit 24 heures à partir de minuit. Il ne faut pas la confondre avec la durée géographique d'insolation appelée également durée topographique d'insolation qui correspond aux lever et coucher de soleil. (Source : site de Météo-France)

¹⁸⁶ Mills (2007) souligne dans son article la pertinence des observations et mesures sur site avant l'urbanisation, car sans cela, l'effet de la ville ne peut être qu'estimé du fait des possibles influences géographiques.

relation logarithmique, développée de façon empirique par Oke (1973) pour Montréal¹⁸⁷, entre la population et la différence de température entre le centre ville de l'agglomération et la zone rurale voisine.

Jauregui (2005) s'est inspiré des travaux de Landsberg et Oke pour étudier le cas des villes mexicaines et a également pu constater la relation entre une urbanisation croissante et le réchauffement de l'atmosphère urbaine. Malgré la variabilité des résultats¹⁸⁸ en fonction des villes, l'augmentation des températures a été en moyenne de 0,57°C par décennie pour les agglomérations mexicaines étudiées de plus d'un million d'habitants et de 0,37°C par décennie pour les villes de taille moyenne (de 125 000 à 700 000 habitants pour cette étude).

Landsberg (1981) cite une étude effectuée au Japon, à Tokyo, montrant que dans la période suivant la deuxième guerre mondiale, durant laquelle Tokyo fut largement détruite, la reconstruction rapide de la ville a conduit à une augmentation de la température urbaine de près de 1°C. Durant le temps de la reconstruction (1946-1963), l'augmentation des maxima journaliers fut de 0,036°C par an et pour les minima de 0,047 °C par an.

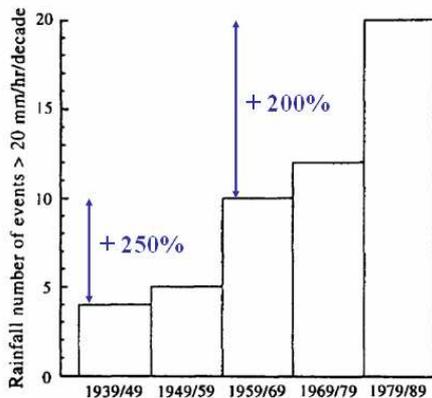


Figure A 19 : Nombre d'évènements de pluie intense (>20mm.h⁻¹) au sein de Mexico de juillet à septembre pour la période 1939-1989 (D'après Jauregui et Romales (1996)).

Jauregui et Romales (1996) ont également constaté les influences urbaines sur les précipitations convectives¹⁸⁹ pour la ville de Mexico (figure A 19). La fréquence des fortes

¹⁸⁷ $\Delta T_{u-r} = 2,01 \log P - 4,06$ (°C) où P est la population de l'agglomération et ΔT_{u-r} la différence de température entre le centre de l'agglomération et la zone rurale.

¹⁸⁸ L'augmentation des températures va de 0,02°C à 1,2°C par décennie pour les agglomérations mexicaines étudiées de plus d'un million d'habitants et de 0,18°C à 0,85°C par décennie pour les villes de taille moyenne (de 125 000 à 700 000 habitants).

¹⁸⁹ Les précipitations de convection, qui sont liées à des nuages convectifs de type « cumulonimbus » ou « cumulus congestus », résultent de l'élévation rapide de masses d'air chargée d'humidité du fait de l'instabilité

précipitations a augmenté durant les dernières décennies de façon conséquente : entre les périodes 1939/49 et 1979/89, on peut constater une augmentation de 500% du nombre de fortes précipitations (> 20mm/h).

Une étude sur l'évolution de la pluviométrie à Ankara (Turquie) de 1926 à 1996 (Cicek et Turkoglu, 2005) a permis de montrer la relation entre l'urbanisation croissante d'Ankara et l'augmentation des précipitations modérées ($\geq 6,25$ mm/jour) et fortes ($\geq 12,5$ mm/jour), précipitations principalement d'origine convective.

Les tendances, concernant l'évolution temporelle des caractéristiques climatiques des villes et observables de manière générale dans de nombreuses villes dans le monde, sont selon Yoshino (1990-91) :

- Une augmentation de la température de l'air,
- Une pression de vapeur identique ou faiblement diminuée,
- Une diminution de l'humidité relative,
- Une augmentation du nombre de jours avec brouillard ou avec de la bruine dans un premier temps (qui s'explique par une augmentation de la pollution atmosphérique¹⁹⁰) puis une diminution,
- Une diminution du nombre de jours avec une bonne visibilité (pour cause de pollution atmosphérique) puis une augmentation,

Ces diminutions et augmentations sont en lien avec l'évolution de la ville (nombres de voitures, taille de la ville, densité de population et de bâtiments, etc.) et les activités plus ou moins polluantes qui s'y installent. La pollution atmosphérique est pour sa part souvent régulée par les différentes lois ou réglementations qui se mettent en place plus ou moins tôt au sein des pays ou des villes (en Angleterre, le Clean Air Act a été adopté en 1956 ; Au Japon, plusieurs lois ont été promulguées durant les années soixante ; en France, en 1961, la loi

convective de l'air. Elles couvrent plutôt des petites surfaces et sont très localisées. Elles ne durent pas longtemps mais sont intenses.

¹⁹⁰ La diminution de l'humidité relative, souvent à l'origine d'une diminution du nombre de jours avec brouillard, est dans ce cas contrebalancée par l'augmentation de la pollution atmosphérique, qui implique la formation de *smog*.

relative à la lutte contre les pollutions atmosphériques et les mauvaises odeurs est votée ; en République Fédérale Allemande, en 1965, la loi sur l'épuration de l'air est votée ; etc.).

Evolution spatiale des paramètres climatiques

L'évolution spatiale des paramètres climatiques est sans aucun doute l'angle d'analyse le plus utilisé par les chercheurs au regard de la bibliographie sur le sujet. Les différences climatiques entre un centre urbain et ses proche et lointaine banlieues sont nombreuses. L'influence d'une ville peut ainsi s'observer sur les paramètres climatiques suivants : la température, l'insolation, l'humidité, la pluviométrie et le vent.

Température

De nombreuses études ont permis de montrer la présence d'un îlot de chaleur sur les grandes villes et de dessiner un profil moyen de cet îlot faisant ressortir les différents types de quartiers : commercial, résidentiel, parc, etc. (figure A 20).

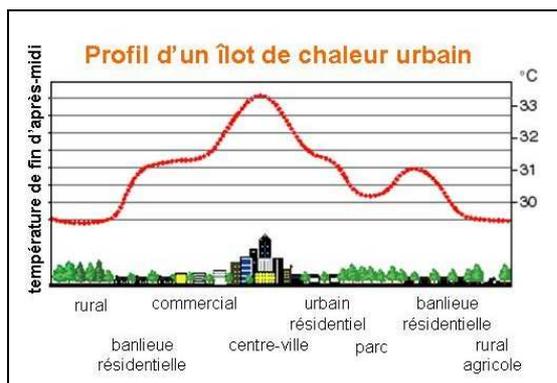


Figure A 20 : Profil d'un îlot de chaleur (<http://www.espere.net>, mars 2006).

Pour Paris, cette particularité thermique est surtout observable sur les températures minimales durant l'été du fait de l'apport important d'énergie solaire et donc d'une restitution de chaleur plus conséquente par le substratum durant la nuit (figure A 21). De plus, en été, la stabilité des conditions météorologiques et la stagnation des masses d'air sont favorables à la mise en place d'un îlot de chaleur.

L'écart de températures entre le centre de l'agglomération parisienne et sa proche ou lointaine banlieue influe sur le nombre de jours de gel, qui augmente du centre vers la périphérie : Le nombre de jours de gel par an sur la période 1951-1980 fût par exemple de 23 jours à la station Saint-Jacques de Paris, de 32 jours à la station Montsouris de Paris, de 52 jours au Bourget, de 56 jours à Trappes ou encore de 61 jours à Melun (Escourrou, 1986).

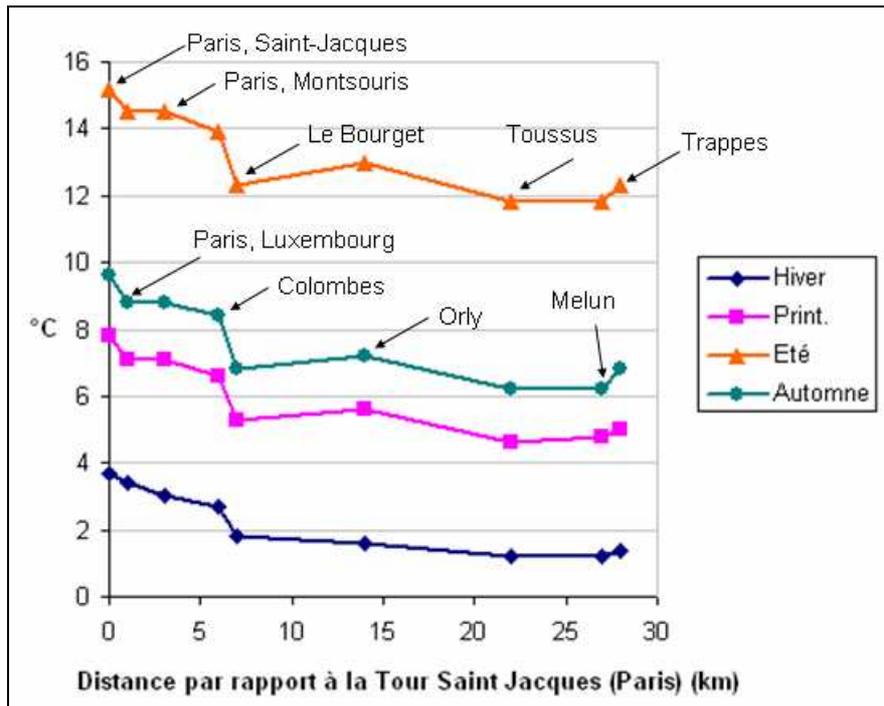


Figure A 21 : Températures saisonnières minimales en région parisienne (1971-1980) (D'après Cantat (1986)).

Les mesures physiques sur le terrain ne sont pas les seuls outils à disposition pour observer l'îlot de chaleur urbain. La télédétection (Cantat, 1989) permet de connaître les températures de surface en observant le rayonnement électromagnétique, et plus précisément le rayonnement infrarouge, émis par les différentes surfaces.

L'image satellite de New-York (Etats-Unis) (figure A 22) permet de comprendre pourquoi Rosenzweig *et al.* (2005) apparentent l'îlot de chaleur urbain à un archipel avec des quartiers plus ou moins chauds. En effet, l'image satellite fait apparaître les différences thermiques qui existent entre les quartiers. Les zones très végétalisées comme Staten Island ou l'est du Queens sont globalement plus fraîches que les zones très minéralisées comme le Bronx, Brooklyn ou encore l'ouest du Queens. Le comportement particulier du sud de Manhattan peut s'expliquer par les grandes hauteurs des bâtiments et par conséquent des zones d'ombres très nombreuses influant directement sur la température de surface. Au sein de Manhattan, il est également possible de distinguer Central Park.

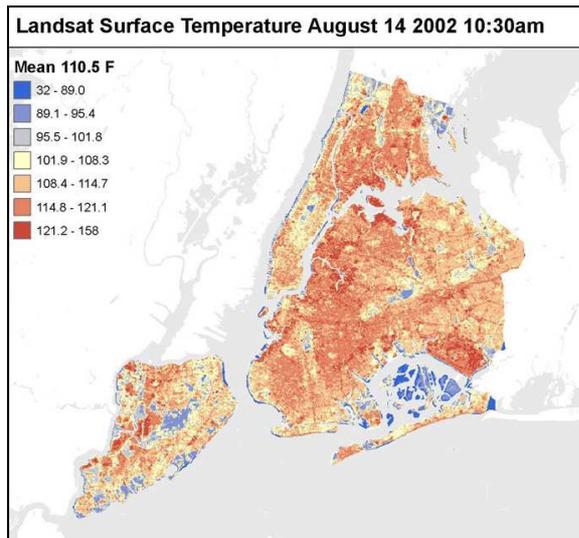


Image satellite de la ville de New-York (Etats-Unis) prise par le satellite Landsat de la NASA le 14 août 2002 à 10h30 du matin (NASA, Goddard Space Flight Center). Les températures sont en en degré Fahrenheit¹⁹¹.

Les températures les plus élevées apparaissent en rouge (49,6 à 70°C) et le bleu (0 à 32 °C) indique les surfaces où la température est la plus faible.

Photo satellite de new-York City (Etats-Unis) (A partir de : <http://geology.com/satellite/cities/new-york-city-satellite-image.shtml>).

Figure A 22 : Thermographie infrarouge de New-York.

Contrairement à la température de l'air, qui est déjà légèrement unifiée de part les mouvements de la masse d'air, la température de surface reste fortement représentative des caractéristiques de la surface.

Humidité et brouillards

Généralement, l'air de la ville est plus sec que celui des zones rurales voisines, cependant, de façon occasionnelle, il peut-être plus humide (Chandler, 1967) du fait de la présence des nombreux processus de combustion, qui rejettent de la vapeur d'eau, ou encore du fait de la présence de sols gelés en zone rurale et non en milieu urbain.

Pour Sacré (1983), la différence est moins nette que les températures : « *Contrairement à la température, l'effet d'une zone urbaine sur l'humidité atmosphérique est plus difficile à préciser. Les écarts obtenus avec ce qui est mesuré dans la campagne environnante sont souvent faibles. En général, l'air des villes est souvent plus sec le jour et un peu plus humide*

¹⁹¹ °F = °C x 9/5 + 32 ou °C = 5/9 x °F - 32

la nuit : ce phénomène apparaît le plus nettement en été, par beau temps. Un « îlot d'humidité » nocturne se crée dans la ville, son intensité diminuant avec l'augmentation de la vitesse du vent ; [la différence d'humidité entre la ville et la campagne environnante] est de l'ordre de 2 à 3 mmb¹⁹². »

Hage (1975) constate également la même chose lors de son étude sur Edmonton (Canada). Pour tous les mois sauf ceux d'hiver, la ville s'avère en terme d'humidité relative être plus sèche que la zone rurale voisine à toute heures (avec des différences moyennes mensuelles de plus de 10% la nuit en été), mais en terme d'humidité absolue¹⁹³ la ville est plus sèche le jour et plus humide la nuit (figure A 23). En hiver, les humidités relative et absolue sont, à toute heure, plus élevées au sein de la ville du fait des mouvements verticaux et des sources de combustion. En mars et en août, Hage (1975) constate les plus grandes différences d'humidité absolue durant la nuit. Le pic de mars est attribué à la fonte de la neige qui agit comme une source de vapeur d'eau durant la nuit alors qu'en milieu rural les températures encore fraîches provoquent le gel. Les différences moyennes mensuelles en humidité absolue dépassent les 0,5 g.m⁻³.

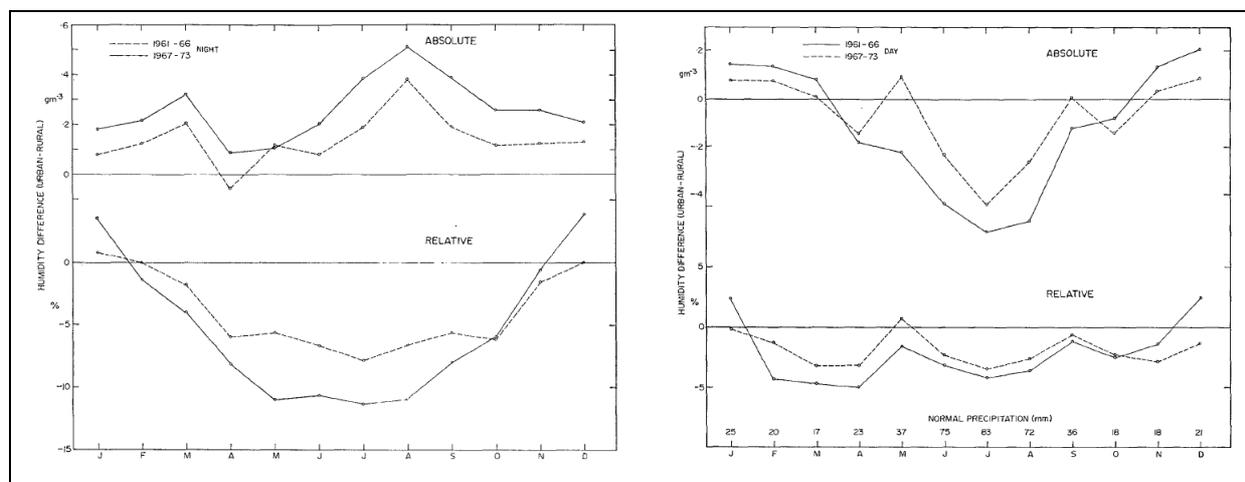


Figure A 23 : Différences moyennes des humidités absolue et relative entre la zone urbaine et la zone rurale à Edmonton (Canada) en fonction du mois pour les années 1961-66 et 1967-73. A gauche durant la nuit (23h à 5h) et à droite en journée (11h à 17h) (Hage, 1975).

¹⁹² 1mmb = 1 millibar = 1 hPa = 1 hectopascal

¹⁹³ L'humidité absolue est définie pour l'air humide (ou d'autres gaz) comme sa teneur en vapeur d'eau. Il s'exprime couramment comme la masse de vapeur d'eau en kg par kg d'air sec (l'air sec correspondant à l'air débarrassé de toute son eau).

Insolation

L'insolation d'un lieu peut être caractérisée à la fois par la durée d'insolation et la quantité de rayonnement solaire reçu.

Le développement urbain, et plus particulièrement la pollution atmosphérique qui l'accompagne, se traduit par une réduction du rayonnement solaire (Cantat, 1986). De fait, l'interaction entre le rayonnement solaire et la pollution atmosphérique est réciproque ; le rayonnement solaire modifie les polluants de l'air (réactions chimiques) et les polluants influencent la part de rayonnement solaire qui atteint la surface (Peterson et Flowers, 1977). Ainsi, les mesures effectuées à Saint-Louis (Etats-Unis) (tableau A 3) ou Los-Angeles montrent bien que le rayonnement solaire, et plus particulièrement ultra-violet, diminue au sein de l'agglomération. A Los-Angeles, les mesures effectuées durant l'automne 1973 les jours sans nuage ont montré qu'il y a en moyenne une diminution de 11% du rayonnement solaire et de 29 % pour le rayonnement UV (et, respectivement, au maximum : 20% et 44%, au minimum : 4% et 15%) (Peterson et Flowers, 1977).

Tableau A 3 : Diminution en pourcentage du rayonnement solaire global et UV d'un site urbain par rapport à un site rural proche à Saint-Louis (Missouri, Etats-Unis) (Peterson et Flowers, 1977).

| Date | Total | UV |
|-------------------|-------|-----|
| 29/07/1972 | 2% | 7% |
| 30/07/1972 | 2% | 7% |
| 31/07/1972* | 12% | 24% |
| 05/08/1972 | 4% | 10% |
| 10/08/1972 | 2% | 5% |
| 11/08/1972 | 1% | 3% |
| 13/08/1972 | 2% | 5% |
| 14/08/1972 | 3% | 10% |
| 15/08/1972 | 2% | 9% |
| 16/08/1972 | 4% | 6% |
| 17/08/1972 | 1% | 3% |
| 18/08/1972 | 3% | 7% |
| Average | 3% | 8% |
| (Excluding 31/07) | 2% | 7% |

* Influence possible des nuages

En ce qui concerne la durée d'insolation, l'évolution est opposée : celle-ci augmente au sein de l'agglomération. Ainsi, dans le cas de l'agglomération parisienne, si une partie des différences entre les zones rurales et urbaines peut s'expliquer par la position géographique de la ville (à l'abri, dans la vallée de la Seine), la réduction de l'humidité relative (les brouillards sont quasi inexistantes ainsi que les nuages bas type stratus) directement liée à l'urbanisation

est aussi une des explications. Il est parfois possible d’observer en banlieue la formation de nuit par temps calme de brouillards d’inversion¹⁹⁴ qui subsistent en début de matinée alors qu’au même moment le ciel est dégagé au-dessus de Paris.

Ainsi d’une manière générale, la durée d’insolation diminue du centre urbain vers le milieu rural (tableau A 4).

Tableau A 4 : Durée d’insolation par an (moyenne 1971-1980) (Cantat, 1986).

| | | |
|------------------|--------|------------|
| Paris Montsouris | 1803 h | |
| Villacoublay | 1729 h | Centre |
| Versailles | 1713 h | |
| Trappes | 1691 h | |
| Gometz-la-Ville | 1695 h | Périphérie |

Cependant le déficit en heures d’insolation du milieu rural est largement compensé par un rayonnement global supérieur et ceci grâce à une transparence de l’atmosphère plus importante (moins de pollution).

Pluviométrie

Plusieurs études montrent que les agglomérations modifient la distribution spatiale et l’intensité des épisodes de pluie, à l’intérieur des villes mais également sous le vent de ces dernières (Atkinson, 1971. Rozoff *et al.*, 2003. Changnon *et al.*, 1977. Ackerman *et al.*, 1978. Bornstein et Lin, 2000. Jauregui et Romales, 1996. Guo *et al.*, 2006. Shepherd *et al.*, 2002).

Les mesures effectuées sur la région Ile-de-France illustrent bien le rôle que peut jouer une zone urbaine sur les précipitations. Il est à noter que le relief de l’Ile-de-France influence la pluviométrie et il est important de ne pas confondre l’action de ce relief et celle de l’urbanisation. Le relief permet en effet d’expliquer en partie les pluies plus importantes sur les collines au sud de Paris ou au contraire les légers déficits de la partie amont de la vallée de la Seine. Cependant, on constate que Paris et sa banlieue nord sont, de façon relativement conséquente, plus sèches que les collines avoisinantes et ceci ne peut être dû uniquement à la géographie (tableau A 5).

¹⁹⁴ Le brouillard d’inversion, ou brouillard radiatif apparaît lorsque le ciel est dégagé et les vents faibles et qu’alors la température près du sol diminue plus rapidement qu’en altitude. Ceci forme une inversion de température (la température croît avec l’altitude au sein de la couche d’air) qui garde la vapeur d’eau dans une couche près du sol. Lorsque l’air devient saturé dans cette couche, on a formation de brouillard.

Tableau A 5 : Moyennes des durées des précipitations durant la période 1961-1980 (Escourrou, 1990).

| | hiver | Année |
|---------------------------|-------|-------|
| Orly, sud de Paris | 288 h | 840 h |
| Montsouris, Paris | 176 h | 529 h |
| Le Bourget, nord de Paris | 278 h | 818 h |

De mai à août, on a pu observer en moyenne sur la période 1951-1980 12,7 jours d'orages à Orly, au sud de Paris, et 15,6 jours au Bourget, au nord de Paris (Escourrou, 1990).

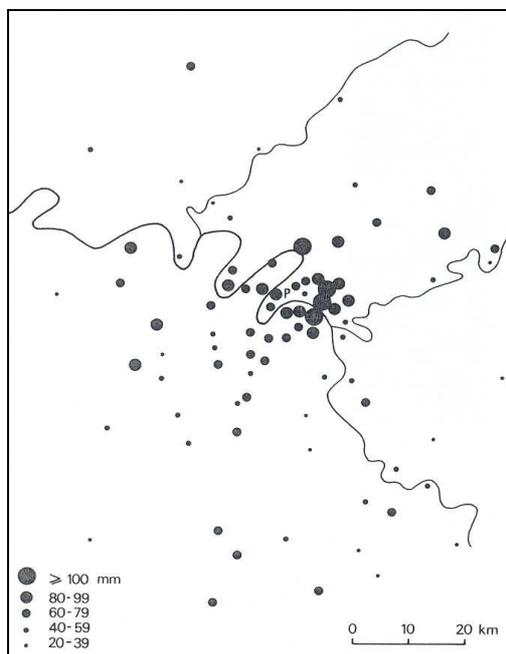


Figure A 24 : Précipitations par masses d'air instable dans l'agglomération parisienne en juin 1983 (Escourrou, 1991).

Selon Escourrou (1991), « *la variabilité spatiale des précipitations est très grande au cours de ce mois [juin] où les masses d'air instables de sud-ouest ont été très fréquentes. Les parties les plus arrosées correspondent à Paris et à la banlieue sous le vent de l'agglomération, c'est-à-dire au nord de la Seine. Dans le sud de l'agglomération, seules les collines comptent des hauteurs de pluie élevées* ».

D'autres études présentent également des observations similaires.

L'étude de Shepherd *et al.* (2002) s'est intéressée aux villes américaines d'Atlanta (Georgie), de Montgomery (Alabama) et de San Antonio, Waco et Dallas (Texas). Elle révèle qu'entre la

région située sous le vent de la ville et celle située au vent, l'augmentation moyenne de la pluviométrie est de 28,4% (de 14,6% à 51% selon la ville). Au-dessus de la ville, l'augmentation est plus faible (5,8% en moyenne) mais la variation entre les cinq agglomérations va de -27,7% à +24,7%. Cette étude a également permis de montrer que les précipitations les plus importantes au niveau de la zone la plus touchée excèdent de 48% à 116% les précipitations qui sont observées en moyenne au sein de la région située avant la ville. Cette zone se trouve en moyenne à une distance de 39 km de la zone urbaine (ou encore à 64km du centre exact de la zone urbaine). L'intervalle va de 20 à 60 km par rapport à la limite de la zone urbaine.

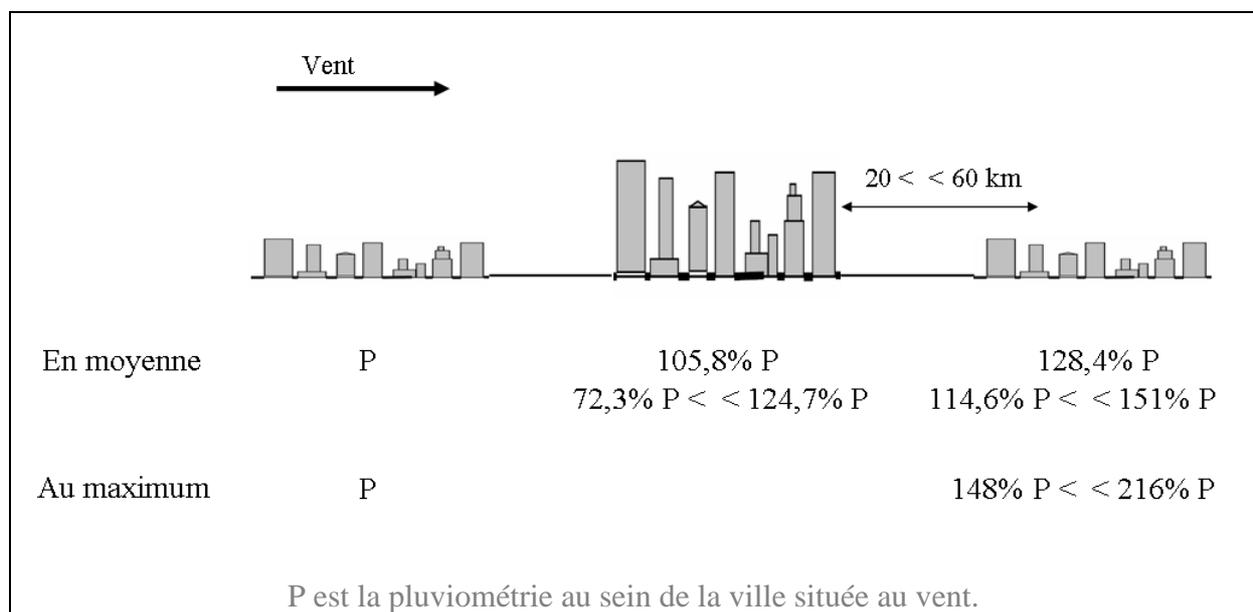


Figure A 25 : Résultats de l'étude de Shepherd *et al.* (2002) sur les villes américaines d'Atlanta (Georgie), de Montgomery (Alabama) et de San Antonio, Waco et Dallas (Texas).

Jauregui et Romales (1996) montrent qu'à Mexico (Mexique), l'urbanisation progressive entre 1939 et 1989 a modifié le régime saisonnier et journalier des pluies et plus particulièrement augmenté les précipitations convectives. Durant la saison humide (de mai à octobre), une augmentation significative des précipitations a pu être observée au sein de la ville. Les grosses pluies ($> 20 \text{ mm.h}^{-1}$) ont accru leur fréquence - de quatre événements en 10 ans entre 1939 et 1949, ils sont passés à 20 pour la période 1979-1989 - et de manière générale, les événements pluvieux ($> 1 \text{ mm.h}^{-1}$) sont devenus plus fréquents en fin d'après-midi et la nuit durant les dernières années.

Cicek et Turkoglu (2005) constate également une augmentation du nombre de fortes précipitations ($\geq 12,5 \text{ mm/jour}$) avec l'urbanisation d'Ankara (Turquie), avec aujourd'hui une

différence de 50% entre le nombre de fortes précipitations dans la zone urbaine et dans la zone rurale.

Vent et « brises de campagne »

La forme urbaine, avec ses immeubles et l'importante rugosité du sol, a un impact sur la vitesse du vent et sa turbulence en augmentant le frottement pour l'écoulement d'air. Ainsi, pour une même hauteur d'environ 20m au-dessus du sol, on observe une vitesse moyenne d'environ 20 à 30% moins importante en ville qu'en milieu rural. En revanche, la turbulence est accrue de l'ordre de 50 à 100% (Sacré, 1983).

La ville est également génératrice de vent. Largement explicitées dans divers ouvrages de Gisèle Escourrou, les « brises de campagne » sont dues à la forte différence de température entre le centre de l'agglomération et sa périphérie. Ce sont des vents locaux dont la formation est assez semblable à celle des brises de mer ou de terre. Les masses d'air se déplacent des parties les plus froides vers les parties les plus chaudes de l'agglomération créant ainsi un vent de faible vitesse (entre 1 et 4 m/s). Ces brises peuvent être de plus ou moins grande intensité et être ressenties sur une part importante de l'Ile-de-France ou au contraire être limitées à des vents locaux de faible amplitude. Ces « brises de campagnes » sont relativement fréquentes en région parisienne et se produisent par vent faible (dans ce cas, le gradient thermique horizontal s'accroît). On a ainsi pu noter que sur Paris pour la période 1979-1981, elles se produisent un jour sur cinq en hiver, un sur six au printemps, un sur neuf en été et un sur trois en automne (Escourrou, 1990). La convergence de ces vents se fait surtout vers le nord-ouest de Paris (43% des cas), partie la plus chaude. Cela provoque dans ces quartiers une accumulation de polluants.

La ventilation naturelle en milieu urbain est fortement diminuée et une réduction importante de la vitesse du vent est observée dans les canyons¹⁹⁵ urbains. Il semblerait que le flux d'air soit réduit au 1/10 dans les canyons urbains par rapport à une situation sans obstacle (Santamouris *et al.*, 2001). L'orientation du canyon a également une influence sur l'importance de la diminution.

¹⁹⁵ Le concept de canyon urbain a été introduit dans les années 1970 (Nunez et Oke, 1977) pour représenter la forme de base du milieu urbain. Le canyon urbain est ainsi constitué d'une rue d'une certaine largeur encadrée de deux bâtiments.

Annexe 4 Conséquences économiques, environnementales et humaines du climat urbain

Souvent abordé dans le cadre d'un climat chaud et humide, le climat urbain ne présente pas les mêmes conséquences dans le cadre d'un climat tempéré comme c'est le cas pour les villes françaises de la métropole. Ainsi, comme le signale Givoni (1998), « *au sein des régions avec un climat froid, l'élévation des températures en milieu urbain est un effet positif du point de vue du confort des habitants et de la consommation énergétique pour le chauffage ; alors qu'en climat chaud, les températures plus élevées augmentent l'inconfort et les besoins en air conditionné* ».

Pour Escourrou (1991) « *la pollution atmosphérique représente l'aspect le plus néfaste [parmi les points les plus défavorables du climat urbain]. Une ville non polluée n'offre pas de conditions défavorables, sauf en été ou dans les climats tropicaux chauds. Les avantages du climat urbain ne sont pas négligeables : amplitude plus faible des températures, températures plus élevées de la ville dans les pays froids ou tempérés, moins d'humidité, moins de vent. Les désavantages sont essentiellement constitués par l'élévation des températures lors des périodes chaudes rendues plus pénibles encore par la faiblesse des vents et la réduction de l'évaporation. J'ajouterai personnellement à ce défaut une perte complète de la notion de climat et par suite une diminution de l'adaptation au stress causé par les vagues de froid [...] ou au contraire par les fortes chaleurs.* »

Nous présentons au sein de cette annexe les effets du climat urbain sur la pollution atmosphérique, la consommation d'énergie, la climatisation naturelle, le confort en extérieur, la faune et la flore, et la santé.

Pollution atmosphérique

Les activités humaines sont à l'origine de rejets de polluants atmosphériques en concentration importante au niveau des zones industrielles ou urbaines. Si cette pollution est une des causes de la formation du climat urbain, et plus particulièrement de l'îlot de chaleur urbain – nous en parlerons plus précisément dans la partie suivante –, la distribution spatiale et l'évolution temporelle de cette pollution est largement dépendante des processus dynamiques et thermodynamiques que la ville entraîne (Sarrat *et al.*, 2006).

Des études menées à Paris (Sarrat *et al.*, 2006) comme à Athènes (Martilli *et al.*, 2003) ont démontré l'influence des flux turbulents générés par la présence de la ville sur les distributions des polluants primaires et secondaires. Comme le souligne Oke (1978) : « *Le vent et la turbulence sont vitaux pour la dispersion des polluants atmosphériques* », or le milieu urbain a plutôt tendance à réduire la vitesse du vent et empêcher ainsi la dispersion des polluants.

A cela s'ajoute l'effet de la température sur la formation de l'ozone troposphérique.

Stone (2005) présente un lien empirique évident entre des fluctuations de températures régionales et la formation de l'ozone. Pour une de ses études, il a travaillé sur cinquante grandes régions métropolitaines des Etats-Unis avec pour objectif de mettre en évidence l'éventuelle corrélation entre la température et la formation de l'ozone durant les années 1990 tout en analysant également l'évolution des concentrations des précurseurs de l'ozone¹⁹⁶.

Dans le cadre de son étude, Stone (2005) montre qu'à l'exception de quelques années, les jours avec des concentrations excessives d'ozone observées ne correspondent pas aux émissions métropolitaines de composés volatiles organiques. Les émissions métropolitaines d'oxydes nitreux correspondent également difficilement aux fluctuations les plus significatives des concentrations excessives d'ozone. Il en conclut qu'il n'existe pas de relation significative du point de vue de la statistique entre les émissions anthropogéniques des précurseurs de l'ozone et la formation de ce dernier dans les régions métropolitaines étudiées.

En ce qui concerne les températures métropolitaines, Stone (2005) montre que celles-ci présentent une forte corrélation avec le nombre de jours avec une concentration excessive d'ozone. Durant la décennie des années 1990, les trois années les plus chaudes correspondent aux trois années où le plus grand nombre de journées avec une concentration excessive d'ozone a pu être observé.

Consommation d'énergie

Une étude effectuée à Athènes entre 1996 et 1999 (Santamouris *et al.*, 2004) a montré que l'intensité maximale de l'îlot de chaleur urbain peut atteindre en moyenne pour le centre ville

¹⁹⁶ L'ozone est un gaz, sans couleur ni odeur, qui se forme en présence du soleil par le biais d'une réaction entre les oxydes nitreux et les composés volatiles organiques, deux polluants produits par la combustion d'énergie fossile.

d'Athènes près de 12°C, et même 16°C pour l'hyper centre. Ces situations extrêmes arrivent plus particulièrement en été et la situation de l'hyper centre s'explique notamment par un fort trafic automobile, cause de rejets importants de chaleur. Cela a un effet direct sur les consommations d'énergie liées au chauffage comme à la climatisation. Il a ainsi été estimé que « *les degrés heures de climatisation [...] dans la zone centrale de la ville sont environ 350% des besoins des secteurs périphériques* » et que « *les degrés heures de chauffage dans l'hyper centre d'Athènes sont environ 40 à 60% inférieurs à ceux des secteurs environnants.* » Pour une ville telle que Athènes, l'urbanisation provoque globalement une augmentation nette des consommations énergétiques et ce malgré la baisse observée pour le chauffage en hiver.

Ce qui est observé à Athènes se retrouve également dans d'autres villes, et plus particulièrement dans celles ayant un climat chaud. En été, pour les grandes villes américaines, il est observé une augmentation de 3 à 5% des consommations électriques quand la température augmente de 1°C (Santamouris *et al.*, 2004).

En été, le climat urbain a un impact à la fois sur la demande en air conditionné et également sur le rafraîchissement par ventilation naturelle et ce pour les raisons suivantes (Santamouris *et al.*, 2004) :

- L'augmentation de la température extérieure implique une augmentation de la demande en énergie pour la climatisation ;
- Le potentiel de refroidissement nocturne est diminué ;
- Les périodes exceptionnelles de grande chaleur peuvent provoquer une brusque et importante augmentation de la demande en air conditionné, accroissant ainsi le pic de demande en électricité ;
- Les systèmes d'air conditionné sont moins efficaces lorsqu'ils fonctionnent avec des différences de températures importantes et ont alors besoin d'une capacité supplémentaire, de plus d'énergie ;
- Le profil de température et du vent au sein de l'environnement urbain est modifié et cela affecte l'efficacité des systèmes de climatisation naturelle.

Le tableau suivant présente la diminution du nombre de degrés.jours pendant la période de chauffage (heating degree-days) et l'augmentation du nombre de degrés.jours pendant la

période de climatisation (cooling degree-days) (base de 18,3°C) du fait de l'urbanisation et des effets d'îlot de chaleur. Les moyennes pour une sélection de villes américaines ont été effectuées sur la période 1941-1970.

Tableau A 6 : Diminution du nombre de degrés.jours chauffage et augmentation du nombre de degrés.jours climatisation du fait de l'urbanisation et des effets d'îlot de chaleur (Taha, 1997).

| Ville | Degrés.jours chauffage | | | Degrés.jours climatisation | | |
|---------------|------------------------|----------|-----|----------------------------|----------|-----|
| | Ville | Aéroport | Δ% | Ville | Aéroport | Δ% |
| Los Angeles | 384 | 562 | -32 | 368 | 191 | +92 |
| Washington DC | 1300 | 1370 | -6 | 440 | 361 | +21 |
| St. Louis | 1384 | 1466 | -6 | 510 | 459 | +11 |
| New York | 1496 | 1600 | -7 | 333 | 268 | +24 |
| Baltimore | 1266 | 1459 | -14 | 464 | 344 | +35 |
| Seattle | 2493 | 2881 | -13 | 111 | 72 | +54 |
| Detroit | 3460 | 3556 | -3 | 416 | 366 | +14 |
| Chicago | 3371 | 3609 | -7 | 463 | 372 | +24 |
| Denver | 3058 | 3342 | -8 | 416 | 350 | +19 |

Selon Akbari *et al.* (2001), l'analyse de l'évolution des températures dans plusieurs grandes villes des Etats-Unis indique que depuis environ 1940, les températures des zones urbaines ont augmenté entre 0,5 et 3,0°C. Ils estiment que ces augmentations de températures sont à l'origine de 5-10% de la consommation énergétique pour la climatisation dans les villes. Par exemple, le centre de Los-Angeles est aujourd'hui plus chaud de 2,5°C par rapport à 1920 et pour les températures minimales, celles-ci sont plus élevées d'environ 4°C par rapport à 1880. Cela augmente la demande en énergie mais accroît également le smog (augmentation des concentrations en ozone). Par exemple à Los-Angeles, les épisodes de smog deviennent insupportables quand la température dépasse les 32°C.

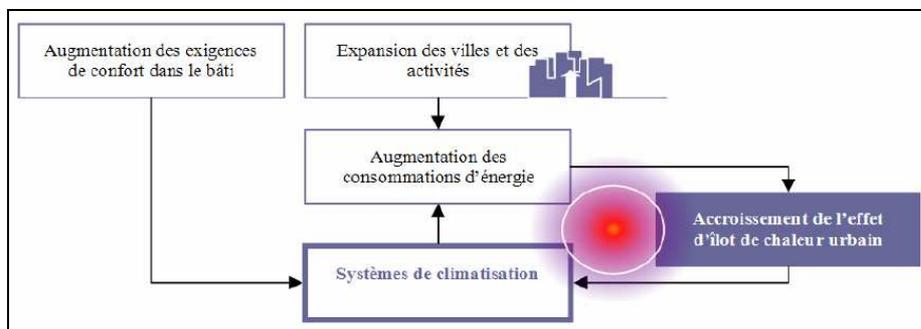


Figure A 26 : Phénomène d'amplification de l'îlot de chaleur urbain et système de climatisation (Bozonnet, 2005).

Bozonnet (2005) fait apparaître également le cercle vicieux lié aux influences mutuelles des systèmes de climatisation et de l'îlot de chaleur urbain (figure A 26) : « *Les dissipations thermiques des bâtiments participent alors de façon importante à l'amplification du réchauffement urbain. La densification des villes et l'accroissement général des consommations énergétiques font augmenter l'énergie dissipée, et les systèmes de climatisation peuvent représenter une part significative d'autant plus que leur charge augmente avec le réchauffement* ».

Ce cercle vicieux entre également dans la problématique de l'incompatibilité qui existe parfois entre solutions d'adaptation et de lutte contre le changement climatique.

Climatisation naturelle

Le climat urbain a une forte influence sur la performance des techniques de climatisation naturelle (Geros *et al.*, 2005. Santamouris *et al.*, 2004). En effet, ces techniques s'appuient sur la ventilation naturelle et sur le fait que la température nocturne estivale extérieure est plus fraîche que celle à l'intérieur des bâtiments, l'objectif étant d'introduire de l'air frais au sein du bâtiment et de rejeter la chaleur stockée en journée.

L'efficacité de ce refroidissement nocturne dépend principalement de la température extérieure et du flux d'air introduit au sein du bâtiment durant la nuit. Du fait de l'augmentation de la température de l'air et la diminution de la vitesse du vent au sein des canyons urbains, l'efficacité de ces techniques est réduite de façon significative (Geros *et al.*, 2005).

Confort extérieur

Les principaux paramètres physiques externes qui interviennent dans le confort thermique sont la température de l'air, l'humidité, le rayonnement solaire et infrarouge reçu, et les mouvements de l'air ou influences convectives (vent). Tous ces éléments sont influencés par la forme, la structure urbaine¹⁹⁷ (Steemers, 2006a).

Cependant une approche purement physiologique et quantitative est inadéquate pour caractériser le confort en extérieur. En plus des paramètres micro-climatiques qui influencent fortement la sensation de confort, il y a une évaluation subjective du confort qui dépend de la

¹⁹⁷ Forme urbaine, structure urbaine, morphologie urbaine sont des termes dont la définition varient souvent d'un auteur à l'autre, et dont la notion est relativement voisine. Par ces termes, nous faisons référence ici à la géométrie du cadre bâti, à l'orientation, la taille, la forme et l'agencement des bâtiments, des rues et des places.

personne, et cette adaptation psychologique à l'extérieure semble être importante (Nikolopoulou et Steemers, 2003). Cette adaptation psychologique (caractère naturel du lieu, attentes de l'individu, expérience/histoire thermique de l'individu à court et long termes, durée de l'exposition, choix disponible en termes de lieu, stimulation environnementale, effet de la mémoire) permet d'expliquer les différences entre, par exemple, les pourcentages attendus d'insatisfaction en un lieu (à partir de paramètres physiologiques) et ce qui est réellement observé en interrogeant les personnes (Nikolopoulou *et al.*, 2001. Nikolopoulou et Steemers, 2003).

La satisfaction et le confort sont également corrélés à la diversité des microclimats au sein d'un même lieu (à l'ombre, au soleil, venté, etc.) (Steemers, 2006a. Steemers, 2006b), diversité qui permet à l'individu de savoir qu'il peut être dans une condition thermique différente. Cette corrélation entre désirabilité, plaisir d'être dans un lieu, et diversité des microclimats d'un même lieu est même plus importante que celle qui peut exister avec une variable physique telle que la température (Steemers, 2006b).

Le confort extérieur, comme intérieur, est donc fonction à la fois des paramètres physiques et micro-climatiques du lieu, de l'activité de l'individu et de sa psychologie.

Lors de son intervention à la 6^e conférence internationale sur le climat urbain en 2006 à Göteborg (Suède), Brandt (2006) pose la question « existe-t-il un climat urbain « idéal » ? - *Does an « ideal » urban climate exist ?* ». Il est vrai que peu de scientifiques abordent la question du climat urbain sous cet angle préférant opposer le climat urbain au climat des zones rurales environnantes et présenter des solutions pour réduire l'îlot de chaleur urbain et réduire ainsi ses impacts négatifs au sein des villes (Brandt, 2006).

Un sondage mené auprès d'environ 8000 citoyens en Allemagne (Brandt, 2006) a montré que la majorité des habitants ne perçoivent pas le climat urbain et les fortes chaleurs estivales qui peuvent l'accompagner comme un problème et ce même pour les personnes âgées (plus de 90% sont de cet avis). Ainsi pour des villes situées à moyenne latitude, l'aménagement urbain doit plus se focaliser sur les questions de qualité de l'air que sur celles du climat urbain (Brandt, 2006). Les citoyens perçoivent en effet les avantages du climat urbain (88% des allemands interrogés disent que des températures plus élevées en ville offrent plus de possibilités pour des activités de loisirs et en extérieur) et ne veulent pas que ce dernier soit modifié (97% des allemands interrogés disent qu'ils ne veulent pas que les politiques

modifient le climat urbain) (Brandt, 2006). Landsberg (1981) note également que Linke (1940) considère positivement le climat urbain : « *le climat des villes est un bon phénomène climatique qui montre son plus grand développement par temps calme et sans nuage* ».

Faune et flore

Le climat urbain n'est pas le seul facteur à l'origine de l'évolution des espèces végétales et animales peuplant les milieux urbains et il est sans doute bien difficile de le distinguer des autres (changements climatiques, « nouveaux » écosystèmes, introduction d'espèces végétales non-natives par l'homme, etc.). Cependant, plusieurs auteurs ont montré que les modifications climatiques en zones urbaines favorisent l'implantation d'espèces végétales originaires de régions plus chaudes et affectent la distribution géographique des espèces, le comportement des animaux et la phénologie des plantes (Sukopp, 2004. Kuhn et Klotz, 2006. Parris et Hazell, 2006. Roetzer *et al.*, 2000)

Comme le signalent les auteurs d'une étude menée à Rennes (France) et à Québec (Canada) (Clergeau *et al.*, 1998), les villes créent leur propre écosystème avec des processus biologiques spécifiques et des espèces particulières. Cependant cette évolution n'est pas sans risque pour la biodiversité de la région. Typiquement, la perturbation des écosystèmes urbains mène à une décroissance du nombre des espèces natives de la région et à une augmentation des espèces non-natives (Sukopp, 2004). Ainsi, alors qu'individuellement les villes peuvent apparaître comme des oasis de biodiversité, beaucoup de cette biodiversité est exotique par nature et existe aux dépens des espèces locales. De plus, les villes produisent des environnements urbains similaires et de ce fait la diversité urbaine est commune à de nombreuses villes ; les villes diminuent donc globalement la biodiversité (Mills, 2007). Clergeau et Croci (2006) s'accorde sur ce point et signalent que « *l'urbanisation apparaît bien comme une cause d'homogénéisation taxonomique de l'avifaune.* »

Ainsi, si les milieux urbains ne diminuent pas localement le nombre des espèces végétales et abritent plus d'espèces qu'en zone rurale, l'uniformisation des espèces entre ces milieux a pour conséquence d'appauvrir globalement la biodiversité.

Santé

Ilot de chaleur urbain, pollution atmosphérique et vague de chaleur peuvent provoquer des surmortalités conséquentes. Buechley *et al.* (1972) associe même l'îlot de chaleur à un îlot « de la mort ».

De manière plus générale, la chaleur est souvent à l'origine d'un coup de soleil, d'une fatigue jusqu'à l'épuisement, d'un coup de chaleur, de crampes et de syncope. Elle peut également conduire à une exacerbation d'un état chronique comme les affections cardiovasculaires, cérébrovasculaires, respiratoires, neurologiques et rénales. En concomitance avec de plus fortes concentrations d'ozone troposphérique, cela peut nuire à la faculté de respirer et causer de l'essoufflement, des douleurs thoraciques, des sifflements et des quintes de toux.

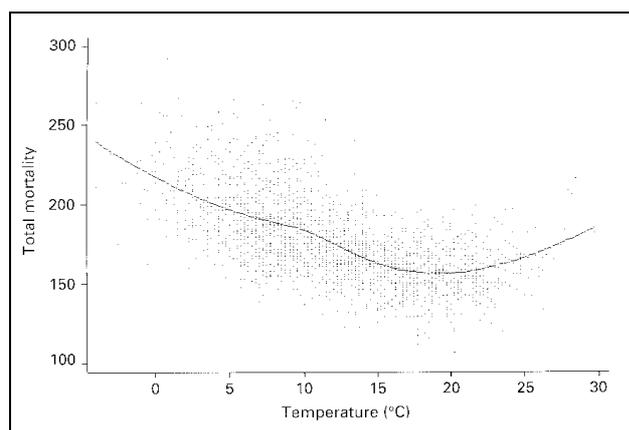


Figure A 27 : Relation entre la température et la mortalité journalière dans le Grand Londres entre 1991 et 1996 (Roaf *et al.* (2005) d'après San Kovats).

Il ne faut cependant pas oublier que sous nos latitudes, nous mourrons plus de froid que de chaud comme l'illustre la figure A 27 représentant la relation entre la mortalité journalière et la température dans le Grand Londres¹⁹⁸.

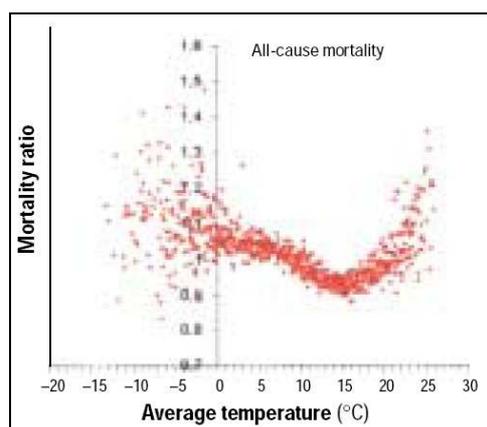


Figure A 28 : Relation entre la mortalité et la température moyenne (le ratio de mortalité correspond au nombre de morts observés un jour *i* divisé par le nombre moyen de morts sur toute la période étudiée) (Huynen *et al.*, 2001).

¹⁹⁸ Le Grand Londres (*Greater London* en anglais) est la plus grande subdivision administrative englobant Londres en Angleterre. Elle regroupe la Cité de Londres ainsi que 32 districts londoniens. Son territoire correspond également à la région de Londres et à la circonscription de Londres au Parlement européen.

Huynen *et al.* (2001) ont conduit une étude sur l'impact de la température ambiante sur la mortalité aux Pays-Bas entre 1979 et 1997, et plus particulièrement l'impact des vagues de chaleur et des périodes de froid sur la mortalité et sur la possibilité que les vagues de chaleur et les périodes de froid induisent un déplacement de mortalité, c'est-à-dire qu'elles emportent plus tôt des personnes qui devaient mourir de toute façon dans les semaines suivantes. Huynen *et al.* (2001) ont mis en évidence une courbe en V pour représenter la relation entre la mortalité et la température (figure A 28), avec une valeur de température optimale (c'est-à-dire la température moyenne avec le taux de mortalité le plus faible) de 16,5°C pour la mortalité totale, la mortalité cardiovasculaire, la mortalité respiratoire, et la mortalité parmi les personnes de plus de 65 ans. Pour la mortalité due à des néoplasmes malins¹⁹⁹ et la mortalité pour les personnes jeunes, la température optimale est de 15,5°C et 14,5°C respectivement. Des températures au-dessus ou en-dessous de l'optimum entraînent alors une augmentation de la mortalité²⁰⁰. La mortalité augmente significativement durant toutes les vagues de chaleur étudiées, et les personnes âgées sont les plus affectées par ces chaleurs extrêmes. Les vagues de chaleur provoquent une augmentation de la mortalité pour toutes les causes présentées ci-dessus, et plus particulièrement pour les maladies respiratoires. L'excès moyen de mortalité durant les vagues de chaleur étudiées a été de 12,1%, ou encore de 39,8 morts par jour. L'excès moyen de mortalité durant les périodes de froid a été de 12,8% ou encore 46,6 morts par jour, et a été principalement dû à une augmentation de la mortalité cardiovasculaire et de la mortalité chez les personnes âgées. Les résultats concernant le décalage dans le temps de la mort du fait des canicules n'ont pas été concluants, tout comme pour les périodes de froid, c'est-à-dire que les canicules et les périodes de froid tuent des personnes qui sans cela auraient vécu encore « longtemps ».

Le bruit, et plus précisément l'excès de bruit, peut également perturber l'organisme et agir sur la santé. Landsberg (1981) souligne dans son ouvrage que la propagation du bruit au sein de l'atmosphère est contrôlée entre autres par la densité de l'air, elle-même dépendante de la température²⁰¹. Il note cependant que la propagation du bruit est sujet à de nombreuses

¹⁹⁹ On appelle néoplasme ou néoplasie (qui signifie nouvelle croissance) toute masse de tissu excessive issue d'une division cellulaire anormale. Les néoplasmes malins correspondent aux tumeurs malignes ou cancers proprement dits.

²⁰⁰ Pour les températures au-dessus de l'optimum, la mortalité augmente respectivement de 0,47, 1,86, 12,82, et 2,72% pour les néoplasmes malins, les maladies cardiovasculaires, les maladies respiratoires, et la mortalité totale, pour chaque degré supplémentaire au-dessus de l'optimum du mois précédent. Pour les températures en-dessous de l'optimum, la mortalité augmente de 0,22, 1,69, 5,15, et 1,37%, respectivement, pour chaque degré en moins en dessous de l'optimum du mois précédent.

²⁰¹ A pression constante, la densité augmente avec une diminution de la température. D'après la loi des gaz parfaits, la masse volumique de l'air s'écrit : $\rho = p/RT$ en kg/m³, avec p la pression de l'air (Pa), R la constante

réflexions et diffractions, est influencée par le vent, et que les lois physiques n'ont qu'une aide limitée pour expliquer les problèmes de bruit en milieu urbain.

La question du climat urbain a donc un intérêt non pas uniquement parce qu'elle signifie modification locale par la ville du climat, c'est-à-dire de la température, du vent, de la pluviométrie, etc., mais également parce que le climat urbain est le résultat d'une interaction de la ville avec son climat, et qu'il implique lui-même des modifications de la vie en ville par le biais de ses influences sur l'augmentation de la pollution atmosphérique, l'augmentation des consommations des consommations énergétiques, la variation de la faune et de la flore, etc.

spécifique de l'air ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) et T la température (K). La constante spécifique de l'air sec vaut : $R = 287,05 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$.

Annexe 5 Proposition de Golany (1996) pour prendre en compte les particularités de certains climats dans l'architecture et l'urbanisme

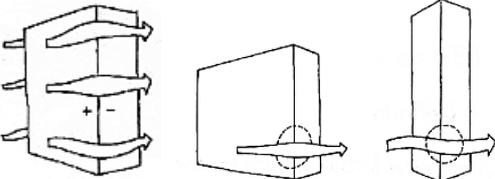
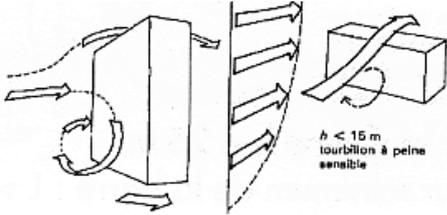
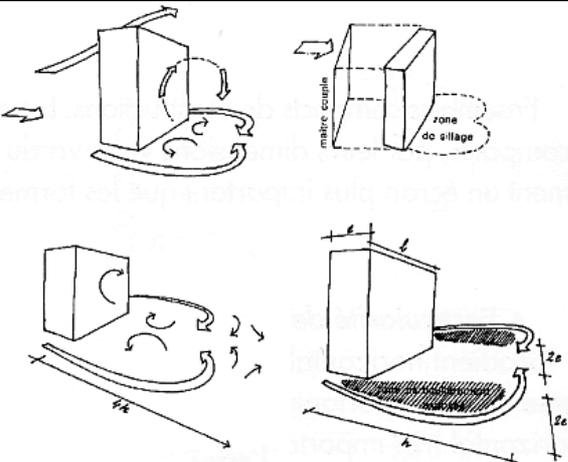
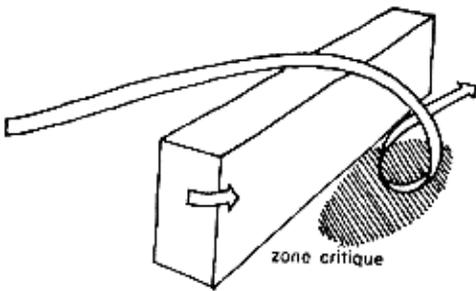
Tableau A 7 : Profils climatiques des principaux climats, problèmes associés, et réponses architecturales ou urbaines offertes conseillées (Golany, 1996).

| Principaux climats, exemple | Profils basiques | Problèmes majeurs | Réponse basique architecturale ou urbaine | Forme urbaine préférée |
|--|---|--|---|--|
| Chaud et humide (zone équatoriale) | Chaud toute la journée et pour toutes les saisons avec une amplitude thermique faible Forte pluie Plus de confort à une altitude élevée | Chaleur excessive Humidité élevée | Ventilation : extrémités ouvertes et forme dispersée Rues largement ouvertes pour favoriser les mouvements du vent Dispersion des grands bâtiments pour favoriser la ventilation Variation des hauteurs de bâtiments Espaces larges et cependant ombragés Zones d'arbres permettant d'avoir de l'ombre | Forme dispersée avec des extrémités ouvertes pour favoriser la ventilation |
| Froid et humide (nord des Etats-Unis et sud du Canada) | Neigeux Venteux, conditions de blizzard Nuits très fraîches | Basse température Précipitation importante en hiver et en été Venteux | Chauffage (passif et actif) : Mélange des formes ouvertes et fermée Façades protégées du côté du vent d'hiver (avec des structures ou des arbres) Hauteur uniforme des bâtiments Espace ouvert moyennement dispersé Bandes d'arbres en circonférence et se croisant | Mélange de formes ouvertes et fermées |
| Chaud et sec (milieu est et nord de l'Afrique) | Radiation solaire intense Amplitude thermique importante entre le jour et la nuit Tempête de poussière Pluie torrentielle Peu de jours avec nuages Déshydratation intense Salinisation élevée Excès d'évaporation Précipitation | Sécheresse excessive combinée avec des températures élevées en journée Poussiéreux et orageux | Formes compactes Ombrages Refroidissement par évaporation Protection des façades urbaines des vents chauds Localisation au vent proche d'un plan d'eau Rues et allées peu venteuses en banlieue Mélange de hauteurs de bâtiment pour ombrager la ville Espaces publics ouverts petits, dispersés, et protégés Zones d'arbres en circonférence et se croisant Utilisation du concept de ville Geo-space | Forme compacte |

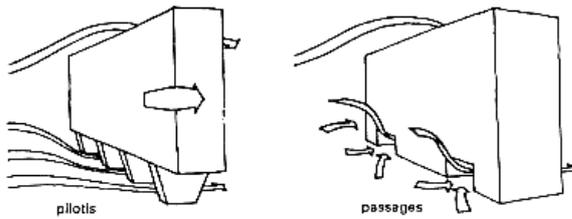
| Principaux climats, exemple | Profils basiques | Problèmes majeurs | Réponse basique architecturale ou urbaine | Forme urbaine préférée |
|---|--|---|---|---|
| Froid et sec | Contraignant (stressant) et inconfortable Fort vent froid et sec | Température excessivement froide et vent sec et désagréable | Formes compactes et agrégées, formes en grappe Extérieurs de la ville protégés Rues et allées peu venteuses en banlieue Hauteur uniforme des bâtiments Espaces publics ouverts petits, dispersés, et protégés Zones d'arbres en circonférence et se croisant Utilisation du concept de ville Geo-space | Forme compacte et agrégée, formes en grappe |
| Bande en bord de mer (cotes désertiques) | Venteux et orageux Système de brise Forte humidité Erosion | Forte humidité Venteux | <i>Dans les régions humides :</i> Forme modérément dispersée Extérieurs de la ville ouverts Larges rues perpendiculaire au bord de mer pour recevoir la brise Hauts bâtiments dispersés pour recevoir la ventilation Variété de hauteurs de bâtiments Grands espaces publics ouverts Zones d'arbres plantés faisant de l'ombre | <i>Dans les régions sèches :</i> Ouverture sur la mer, et forme compacte et protectrice vers l'intérieure des terres Bâtiments de grande hauteur mélangés avec des hauteurs faibles Petits espaces publics ouverts protégés dispersés Zones d'arbres plantés faisant de l'ombre |
| Pentes de montagne (faible, moyenne et forte pente) | Venteux et circulation intense d'air Humidité relative élevée Permet un climat sain et modéré Permet une vue attrayante | Venteux | Forme semi-compacte : Mélange de compact et de dispersé Rues horizontales pour profiter de la vue Bâtiments peu élevés Petits espaces publics ouverts dispersés Zones protectrices d'arbres non obstruantes Utilisation du concept de ville Geo-space | Forme semi-compacte : Mélange des formes compacte et en grappe |

Annexe 6 Ecoulement de l'air autour d'un ou plusieurs bâtiments

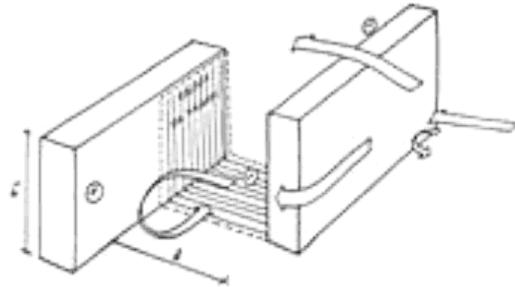
Plusieurs effets du cadre bâti peuvent être distingués dont voici une liste non exhaustive (Guyot. Sacré, 1983) (Les illustrations proviennent de l'ouvrage de Chatelet *et al.* (1998)) :

| Ecoulement de l'air autour d'un bâtiment isolé | |
|---|---|
|  <p>L'effet de coin amplifie la vitesse du vent à l'angle du bâtiment. Cette accélération dépend de la hauteur de la construction et la vitesse peut doubler dans le cas de tours de 30 étages et plus.</p> |  <p>L'effet de tourbillon amont (ou rouleau tourbillonnaire) constitue un mouvement vertical d'air tourbillonnaire qui se constitue sur la façade exposée au vent. L'effet se perçoit surtout sur les constructions de plus de cinq étages.</p> |
|  <p>L'effet de sillage (ou de rouleau aval) correspond à un mouvement d'air tourbillonnaire et plongeant qui se forme sur la façade sous le vent. L'importance du phénomène dépend particulièrement de la surface de la façade et diminue avec la densité du bâti. L'extension de cet effet est d'environ 4 fois la hauteur h de l'immeuble.</p> |  <p>L'effet de barre est un phénomène de tourbillon plongeant qui dévie en vrille un vent qui arrive à environ 45 degrés. Ce tourbillon subit une rotation en rejoignant le sol. Il se produit lorsque le bâtiment de hauteur h et d'extension horizontale l est particulièrement large ($l > 8h$) et pas très haut ($h < 25m$), ou que plusieurs bâtiments alignés sont séparés par une distance qui ne dépasse par leur hauteur.</p> |

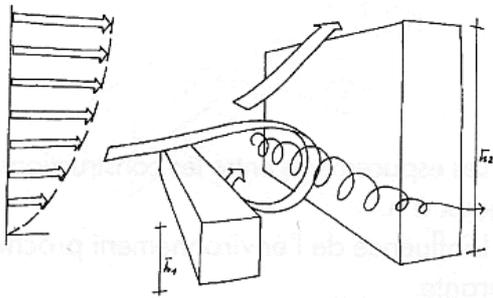
Ecoulement de l'air entre plusieurs bâtiments



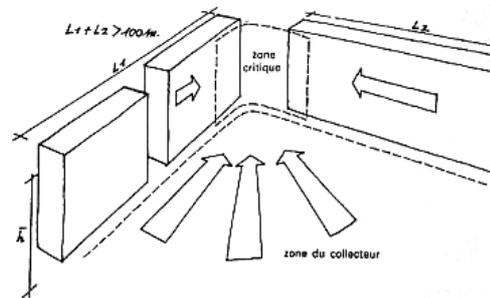
L'effet de trou (ou de passage sous immeuble) correspond à une accélération localisée du vent entre deux façades. L'effet sera d'autant plus limité que le vent est perpendiculaire à l'axe du passage.



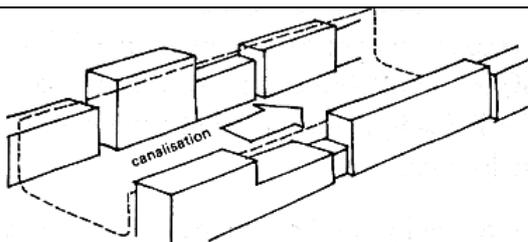
L'effet de liaison des zones de pression différentielle entre immeubles a lieu entre deux bâtiments qui sont décalés, créant ainsi un couloir de liaison. L'importance du phénomène dépend de la hauteur des constructions. Il se met en place quand les immeubles ont une hauteur supérieure à 15m, un écartement pas trop important ($d < h$) et un décrochage latéral face au vent suffisant ($> h$).



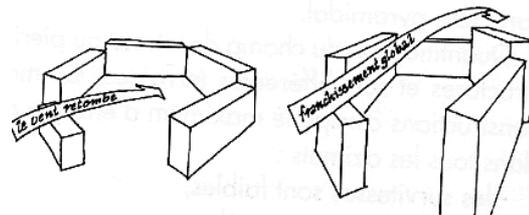
L'effet Wise est un rouleau tourbillonnaire qui se crée au pied du bâtiment sous le vent. Il est essentiellement dû à l'association de bâtiments de tailles différentes et implantés en parallèle.



L'effet Venturi est un effet d'entonnoir (ou de collecteur) dû à la disposition des bâtiments formant un rétrécissement du passage. Cela provoque une augmentation de la vitesse du vent. L'accélération est d'autant plus importante que la zone de convergence est vaste ($L1 + L2 > 100m$), que la hauteur moyenne des immeubles est supérieur à 15 m et que la largeur effective de la sortie est comprise entre $h/2$ et $4h$.



L'effet de canalisation se produit dans des rues délimitées par des constructions en continue des deux cotés et prolonge tout phénomène ayant eu lieu au début de la rue. Cet effet a lieu si la hauteur moyenne des bâtiments est supérieure à 6m et que la largeur du couloir est inférieure à $2h$.



L'effet de maille (ou de cour) améliore en règle générale les conditions locales du vent (effet de protection). Il a eu lieu quand la disposition des bâtiments forme une sorte d'alvéole. Si la hauteur des bâtiments est suffisante ($h > 15m$) et que le rapport de la surface libre s sur le carré de la hauteur (s/h^2) est inférieur à 10, alors un effet de protection est observé.

Annexe 7 Classification en zone climatique

Oke (2004(a), 2004(b)) propose une classification en zone climatique de différentes catégories d'aménagement, qui s'inspire des schémas de Ellefsen (1990/91) (tableau A 9) et de Auer (1978) (tableau A 10). Oke s'appuie sur trois critères que sont :

- La classe de rugosité : cette dernière s'appuie sur la classification de Davenport publiée en 2000 (Davenport *et al.*, 2000).
- Le prospect du canyon : celui-ci est égal à Z_H/W et correspond à la hauteur moyenne des éléments de rugosité (bâtiments, arbres) divisé par leur espacement moyen. Au centre de la ville, le prospect du canyon correspond à la hauteur des bâtiments du canyon divisée par la largeur de la rue. Cette valeur influence les flux et les échanges thermiques ayant lieu au sein de la ville.
- La fraction de surface bâtie : Elle correspond à la proportion moyenne de surface couverte par des constructions (bâtiments, routes, zones pavées ou recouvertes de façon imperméable, étanche), le reste de la surface est occupé par des zones perméables (espace vert, eau et autres surfaces naturelles). La perméabilité modifie l'humidité et les potentiels d'humidification et de refroidissement lié à l'évaporation.

Tableau A 8 : Classification en zone climatique de différentes formes urbaines triées de façon décroissante selon leur capacité à influencer le vent local, la température et l'humidité (Oke, 2004(a), 2004(b))

| Zone climatique urbaine (<i>Urban Climate Zone, UCZ</i>) | Image | Classe de rugosité | Prospect du canyon | Fraction bâtie (imperméable) en % |
|--|-------|--------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 1. <i>Intensely developed urban with detached close-set high-rise buildings with cladding, e.g. downtown towers</i> | | 8 | > 2 | > 90 |
| 2. <i>Intensely developed high density urban with 2 – 5 storey, attached or very close-set buildings often of brick or stone, e.g. old city core</i> | | 7 | 1.0 – 2.5 | > 85 |
| 3. <i>Highly developed, medium density urban with row or detached but close-set houses, stores & apartments e.g. urban housing</i> | | 7 | 0.5 – 1.5 | 70 – 85 |
| 4. <i>Highly developed, low or medium density urban with large low buildings & paved parking, e.g. shopping mall, warehouses</i> | | 5 | 0.05 – 0.2 | 70 – 95 |
| 5. <i>Medium development, low density suburban with 1 or 2 storey houses, e.g. suburban housing</i> | | 6 | 0.2 – 0.6 jusqu'à >1 avec arbres | 35 – 65 |
| 6. <i>Mixed use with large buildings in open landscape, e.g. institutions such as hospital, university, airport</i> | | 5 | 0.1 – 0.5 dépend des arbres | < 40 |
| 7. <i>Semi-rural development, scattered houses in natural or agricultural area, e.g. farms, estates</i> | | 4 | > 0.05 dépend des arbres | < 10 |

Légende des symboles:



Bâtiments;



Végétation;



Sol imperméable



Sol perméable

Tableau A 9 : Formes distinctes des zones urbaines (Ellefsen, 1990/91)

| Attached Urban Terrain Zones | |
|---|---|
| A1 — Attached buildings; commercial offices, retail, etc; core area; low to high rise; mass and framed construction; constructed from earliest times through the present | Dc5 — Detached (close-set) buildings; older commercial ribbons; along pre-WWII string streets; limited off-street parking; low-rise (less than 5 stories) |
| A2 — Attached buildings; apartments/hotels; near core area; complete filling of block frontage; 4 and more stories high; built mostly in the pre WWII period | Dc5 — Detached (close-set) buildings; commercial (Outer City); at metropolitan area periphery; high-rise; light-clad framed; built early 1950's through present |
| A3 — Attached buildings; apartments and abutted-wall houses; adjacent to core area; less than 4 stories; mostly pre-WWII period | Detached Building (Open-Set) Urban Terrain Zones |
| A4 — Attached buildings; industrial/storage; near core area; on ordered blocks with little or no setback; medium rise; mass and framed construction; built mostly pre-WWII | Do1 — Detached (open-set) buildings; Shopping Centers; beyond core; low-rise; mass and framed construction; post WWII |
| A5 - Attached buildings; commercial ribbon development; on some arterials outward from core area and elsewhere; virtually complete filling of block frontage along street; low to medium rise; built mostly pre-WWII | Do2 — Detached (open-set) buildings; residential apartments and row housing; less than 75% block frontage; low to medium rise; widely distributed locations; low to high rise; built largely since the end of WWII |
| Detached Building (Close-Set) Urban Terrain Zones | Do3 — Detached (open-set) buildings; houses; less than 75% frontage; low rise; widely distributed locations; built through the present |
| Dc1 — Detached (close-set) buildings; commercial office; high-rise; light-clad framed; built since 1950 | Do4 — Detached (open-set) buildings; industrial/storage; truck-related; widely distributed locations; ordered pattern (buildings fairly evenly spaced, separated by parking lots, storage areas); low-rise; post 1920's |
| Dc2 — Detached (close-set) buildings; residential apartments/row houses; 75% and more block frontage; widely distributed locations; built through the present | Do5 — Detached (open-set) buildings; modern commercial ribbon development; along major new arterials; open pattern (buildings separated by intervening parking lots and open storage areas); low-rise (less than 5 stories); post early 1950's |
| Dc3 — Detached (close-set) buildings; residential houses; 75% and more block frontage; widely distributed locations; built through the present | Do6 — Detached (open-set) buildings; administrative/cultural (e.g. government, schools, hospital complexes); low to medium rise; widely distributed locations; ordered building pattern; built through the present |
| Dc4 — Detached (close-set) buildings; industrial/storage; linear building pattern; railroad or dock related; low rise; built through the present | |

Tableau A 10 : Identification et classification des différents types de zones urbaines trouvées à Saint-Louis –Etats-Unis) (Auer, 1978).

| TABLE 1. Identification and classification of land use types found in Metropolitan St. Louis | | | |
|--|--|-------------|---|
| Type | Use and structures | Description | Vegetation |
| I1 | Heavy industrial Major chemical, steel and fabrication industries; generally 3-5 story buildings, flat roofs | | Grass and tree growth extremely rare; <5% vegetation |
| I2 | Light-moderate industrial Rail yards, truck depots, warehouses, industrial parks, minor fabrications; generally 1-3 story buildings, flat roofs | | Very limited grass, trees almost total absent; <5% vegetation |
| C1 | Commercial Office and apartment buildings, hotels; >10 story heights, flat roofs | | Limited grass and trees; <15% vegetation |
| R1 | Common residential Single family dwelling with normal easements; generally one story, pitched roof structures; frequent driveways | | Abundant grass lawns and light-moderately wooded; >70% vegetation |
| R2 | Compact residential Single, some multiple, family dwelling with close spacing; generally <2 story, pitched roof structures; garages (via alley), no driveways | | Limited lawn sizes and shade trees; <30% vegetation |
| R3 | Compact residential Old multi-family dwellings with close (<2 m) lateral separation; generally 2 story, flat roof structures; garages (via alley) and ashpits, no driveways | | Limited lawn sizes, old established shade trees; <35% vegetation |
| R4 | Estate residential Expansive family dwelling on multi-acre tracts | | Abundant grass lawns and lightly wooded; >80% vegetation |
| A1 | Metropolitan natural Major municipal, state, or federal parks, golf courses, cemeteries, campuses; occasional single story structures | | Nearly total grass and lightly wooded; >95% vegetation |
| A2 | Agricultural rural | | Local crops (e.g., corn, soybean); >95% vegetation |
| A3 | Undeveloped Uncultivated; wasteland | | Mostly wild grasses and weeds, lightly wooded; >90% vegetation |
| A4 | Undeveloped rural | | Heavily wooded; >95% vegetation |
| A5 | Water surfaces Rivers, lakes | | |

Annexe 8 Graphe arborescent : Diminution de la température en milieu urbain

Le graphe arborescent (inspiré des travaux menés par Adolphe *et al.* (2002)) est issu du tableau du chapitre II de la troisième partie présentant le domaine d'action, les leviers d'actions et critères d'évaluation de ces leviers. La figure A 29 suivante présente en partie les données présentes au sein de ce tableau.

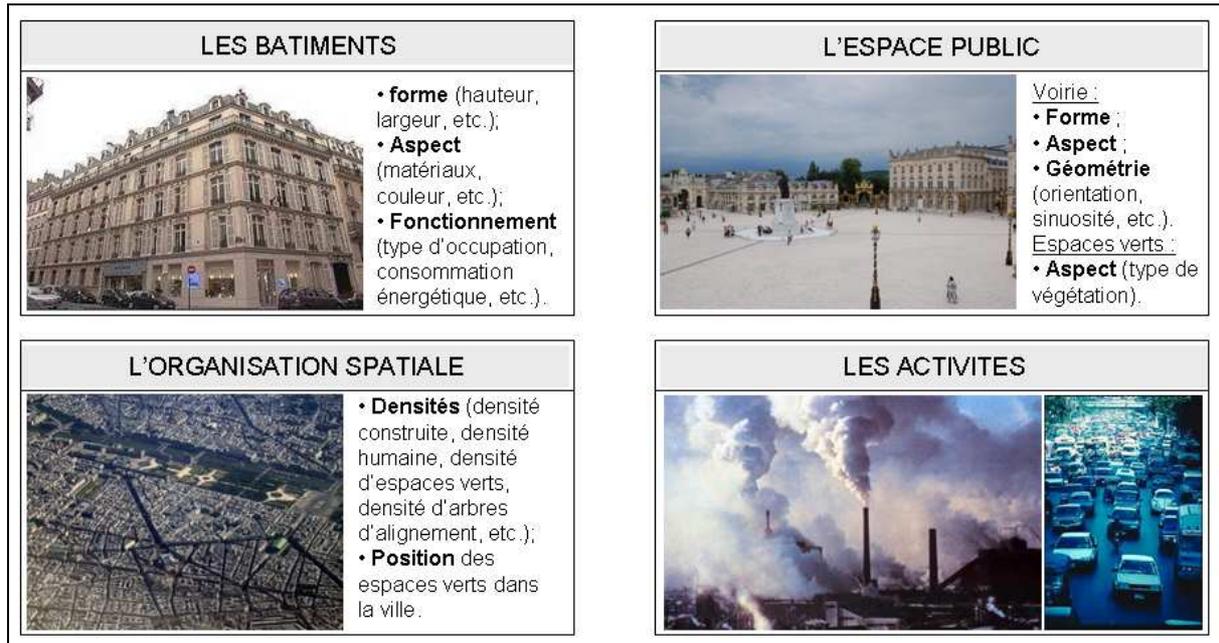


Figure A 29 : Les domaines d'action pour influencer sur le climat urbain.

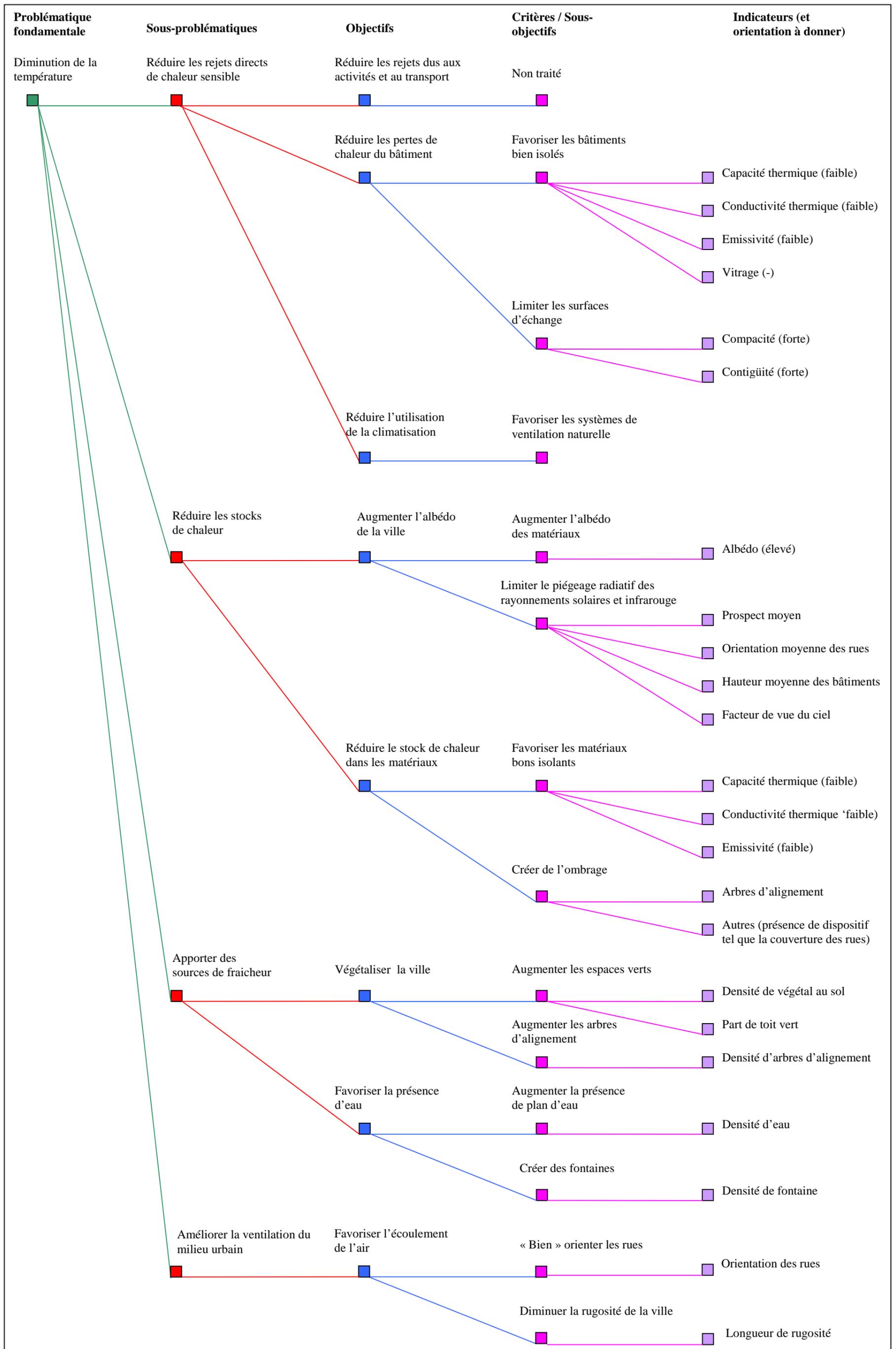


Figure A 30 : Graphe arborescent.

Annexe 9 Présentation du schéma de ville TEB

La présentation du schéma TEB s'appuie en grande partie sur l'article de Valéry Masson (2000) et la description effectuée par Aude Lemonsu (2003).

La morphologie urbaine

La surface urbaine est découpée uniquement selon un maillage horizontal. Chaque maille possède ses propres caractéristiques qui s'appuient sur le concept du canyon urbain (figure A 31). Ce canyon est constitué de trois types de surfaces : une route, deux murs et un toit.

Le toit et la route sont des surfaces planes horizontales et les murs des surfaces verticales de même hauteur.

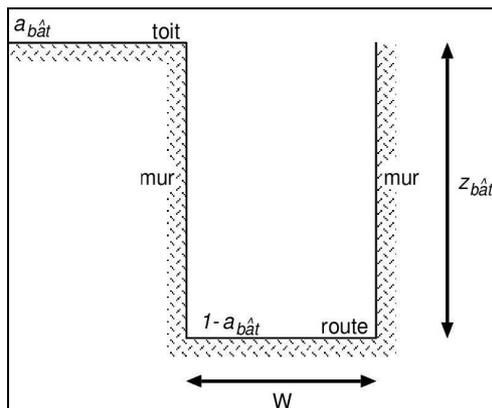


Figure A 31 : Schématisation du canyon urbain dans TEB - avec W la largeur moyenne des rues, $a_{bât}$ la fraction de bâtiment et $z_{bât}$ la hauteur moyenne des bâtiments (Lemonsu, 2003).

Les hypothèses suivantes sont également imposées par TEB :

- Les bâtiments sont localisés le long de routes identiques, dont la longueur est considérée comme étant plus importante que la largeur ;
- Toutes les orientations de rue sont possibles et elles existent avec la même probabilité. Cette hypothèse permet de calculer un forçage moyen pour les routes et les murs et lorsque l'orientation du canyon apparaît au sein des formules de calcul, une moyenne est effectuée en intégrant à 360° .

Tableau A 11 : Paramètres descriptifs du cadre bâti dans TEB.

| Désignation | Unité | Symbole SURFEX |
|---|-------------------|-------------------|
| STRUCTURE URBAINE ET TISSU CONSTRUCTIF | | |
| longueur de rugosité dynamique du couvert urbain - z_{0ville} | m | XUNIF_Z0_TOWN |
| la fraction occupée par les bâtiments (= surface de toit/surface de toit et route) - $a_{bât}$ | - | XUNIF_BLD |
| la hauteur des bâtiments - $z_{bât}$ | m | XUNIF_BLD_HEIGHT |
| le facteur de forme du bâti (= surface des 2 murs/surface de route et toit = $2(z_{bât}/W)*(1-a_{bât})$) | - | XUNIF_WALL_O_HOR |
| PARAMETRES RADIATIFS ET THERMIQUES DES MATERIAUX URBAINS (TEB) | | |
| Toit | | |
| nombre de couches pour le toit | - | NROOF_LAYER |
| albédo du toit - α_t | - | XUNIF_ALB_ROOF |
| émissivité du toit - ϵ_r | - | XUNIF_EMIS_ROOF |
| capacité thermique des i couche de toit (de l'extérieur vers l'intérieur) - C_{t_i} | $J.m^{-3}.K^{-1}$ | XUNIF_HC_ROOF(i) |
| conductivité thermique des i couche de toit - λ_{t_i} | $W.m^{-1}.K^{-1}$ | XUNIF_TC_ROOF(i) |
| épaisseur des n couche de toit - d_{t_i} | m | XUNIF_D_ROOF(i) |
| Route | | |
| nombre de couches pour la route (j) | - | NROAD_LAYER |
| albédos de la route - α_r | - | XUNIF_ALB_ROAD |
| émissivité de la route - ϵ_r | - | XUNIF_EMIS_ROAD |
| capacité thermique des j couche de route - C_{r_j} | $J.m^{-3}.K^{-1}$ | XUNIF_HC_ROAD(j) |
| conductivité thermique des j couche de route - λ_{r_j} | $W.m^{-1}.K^{-1}$ | XUNIF_TC_ROAD(j) |
| épaisseur des j couche de route - d_{r_j} | m | XUNIF_D_ROAD(j) |
| Murs | | |
| nombre de couches pour les murs (k) | - | NWALL_LAYER |
| albédos des murs - α_m | - | XUNIF_ALB_WALL |
| émissivité des murs - ϵ_m | - | XUNIF_EMIS_WALL |
| capacité thermique des k couche des murs - C_{m_k} | $J.m^{-3}.K^{-1}$ | XUNIF_HC_WALL(k) |
| conductivité thermique des k couche des murs - λ_{r_k} | $W.m^{-1}.K^{-1}$ | XUNIF_TC_WALL(k) |
| épaisseur des k couche des murs - d_{m_k} | m | XUNIF_D_WALL(k) |
| ACTIVITES HUMAINES : LES FLUX D'ORIGINE ANTHROPIQUE | | |
| Le flux de chaleur sensible dû au trafic - $Q_{Htrafic}$ | $W.m^{-2}$ | XUNIF_H_TRAFFIC |
| Le flux de chaleur latente dû au trafic- $Q_{Etrafic}$ | $W.m^{-2}$ | XUNIF_LE_TRAFFIC |
| Le flux de chaleur sensible d'origine industrielle - Q_{Hindus} | $W.m^{-2}$ | XUNIF_H_INDUSTRY |
| Le flux de chaleur latente d'origine industrielle. Q_{Eindus} | $W.m^{-2}$ | XUNIF_LE_INDUSTRY |

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

- la longueur de rugosité dynamique du couvert urbain (z_{0ville}),
- 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.

Le toit, la route et les murs sont constitués de plusieurs couches (au maximum neuf) et pour chacune d'elle il est nécessaire de déterminer son épaisseur, sa conductivité thermique et sa capacité thermique.

L'albédo et l'émissivité sont également donnés pour chacune des surfaces.

L'ensemble de ces paramètres (tableau A 11), associé à des données climatiques, permet le calcul du bilan radiatif qui comprend l'estimation du rayonnement infrarouge et du rayonnement solaire direct, diffus et réfléchi.

Equations d'évolution des températures

Chaque surface urbaine est constituée de plusieurs couches et l'évolution des températures est calculée pour chacune d'elles.

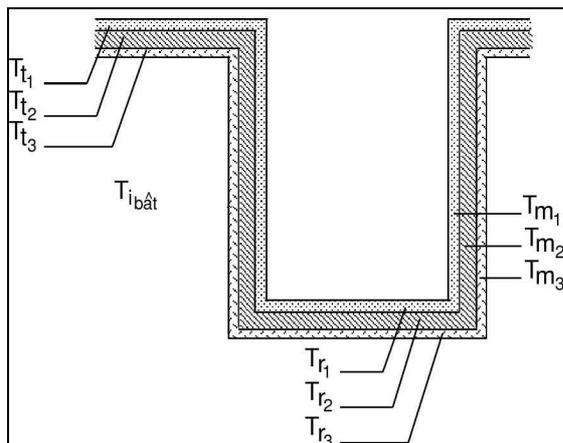


Figure A 32 : Représentation des couches de matériaux constituant les surfaces du canyon (Lemonsu, 2003)

Deux types d'équations sont résolus pour cela :

Une première équation permet de calculer l'évolution de la température de surface (température de surface = température au centre de la première couche, cette dernière étant considérée comme étant suffisamment mince) :

$$C_{x1} \frac{\partial T_{x1}}{\partial t} = \frac{1}{d_{x1}} (S_x^* + L_x^* - Q_{Hx} - Q_{Ex} - \Delta Q_{Sx1,2}) \quad [W] \quad (\text{Formule 17})$$

Les températures des autres couches évoluent selon une équation simple de conduction de la chaleur. Pour la k^{ième} couche, voici l'équation :

$$C_{xk} \frac{\partial T_{xk}}{\partial t} = \frac{1}{d_{xk}} (\Delta Q_{S_{xk-1,k}} - \Delta Q_{S_{xk,k+1}}) \quad [\text{W}] \quad (\text{Formule 18})$$

k correspond donc à l'indice de la couche, sachant que la numération débute de la surface pour aller vers l'intérieur et x fait référence à t, r et m pour, respectivement, le toit, la route et le mur.

Les flux S_x^* , L_x^* , Q_{Hx} , Q_{Ex} , $\Delta Q_{S_{xk,k+1}}$ correspondent respectivement au rayonnement solaire net, au rayonnement infrarouge net, au flux turbulent de chaleur sensible, au flux turbulent de chaleur latente, au flux de chaleur par conduction entre les couches k et k+1.

C_{xk} correspond pour sa part à la capacité thermique et d_{xk} à l'épaisseur de la k^{ième} couche.

Le flux de chaleur par conduction entre les couches k et k+1 se calcule par le biais de l'équation suivante :

$$\Delta Q_{S_{xk,k+1}} = \bar{\lambda}_{xk,k+1} \frac{T_{xk} - T_{xk+1}}{\frac{1}{2}(d_{xk} + d_{xk+1})} \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (\text{Formule 19})$$

$$\text{Avec : } \bar{\lambda}_{xk,k+1} = \frac{d_{xk} + d_{xk+1}}{(d_{xk} / \lambda_{xk}) + (d_{xk+1} / \lambda_{xk+1})} \quad (\text{Formule 20})$$

Les conditions aux limites inférieures sont obtenues pour les toits et les murs par la température intérieure du bâtiment ($T_{ibât}$)²⁰² et, pour la route, en supposant que le flux est nul au bas de la dernière couche de matériau représentée. Les flux entre la Nième (la couche intérieure) et la limite sont alors :

$$\Delta Q_{tN,N+1} = \lambda_N \frac{T_{tN} - T_{ibât}}{\frac{1}{2}(d_{tN})} \quad (\text{Formule 21})$$

²⁰² La température intérieure du bâtiment varie en fonction des températures des surfaces à l'intérieur du bâtiment (murs et toit). Si ce chiffre passe en dessous de 19°C alors il est supposé que le chauffage est mis en marche pour maintenir la température à 19°C (Pigeon *et al.*, 2006).

$$\Delta Q_{mN, N+1} = \lambda_N \frac{T_{mN} - T_{ibât}}{\frac{1}{2}(d_{mN})} \quad (\text{Formule 22})$$

$$\Delta Q_{rN, N+1} = 0$$

Bilan en eau

Les précipitations sont interceptées par les toits et les routes, qui constituent ainsi une forme de réservoir, et sont ensuite rejetées vers les égouts. Les routes et les toits peuvent être recouverts par une certaine quantité d'eau w_x qui évolue en fonction des apports et des pertes. Il existe une capacité maximale d'interception w_{xma} fixé habituellement à 1 kg.m^{-2} pour la route comme pour le toit.

Les surfaces bâties sont considérées comme étant imperméables. Par conséquent, les mécanismes d'échange en eau se limitent à des échanges en surface. Les réservoirs se remplissent sous l'effet des précipitations (P) ou de l'éventuelle condensation. Ensuite, dès lors que le réservoir n'est plus vide, le mécanisme de l'évaporation (E_x) intervient et en cas de dépassement de la capacité maximale d'interception alors un ruissellement de surface (R_x) se déclenche.

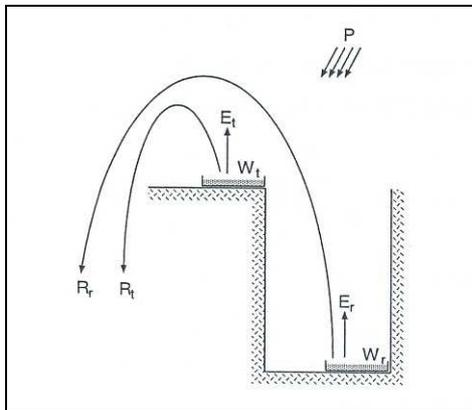


Figure A 33 : Représentation des échanges en eau dans le canyon urbain (Lemonsu, 2003).

Comme pour les températures, l'équation d'évolution du contenu en eau des réservoirs est résolue séparément pour la route et pour le toit, sans interaction entre les deux. Elle s'exprime sous la forme :

$$\frac{\partial W_x}{\partial t} = P_x - Q_{Ex} / L_v \quad (\text{Formule 23})$$

P_x est le taux de précipitation (exprimé en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) et L_v la chaleur latente de vaporisation (le rapport Q_{E_x}/L_v correspondant à l'évaporation E_x). Le terme de ruissellement de surface R_x , produit lorsque $w_x > w_{x\text{max}}$ quitte le système instantanément. Il est admis qu'il rejoint le réseau d'eaux pluviales.

Effet de la neige

TEB permet de prendre en compte les chutes de neige. Nous ne rentrerons pas dans les détails disponible au sein de l'article de Masson (1999) mais retiendrons que la neige a des effets sur :

- Le bilan d'énergie des surfaces,
- Les flux de chaleur de la route en direction des murs, ou encore du toit en direction de l'atmosphère,
- Les calculs radiatifs pour les surfaces du canyon, du fait de l'albédo de la neige, de son émissivité et de sa température.

Le rayonnement infrarouge

L'absorption du rayonnement infrarouge par les surfaces du canyon est calculée en tenant compte d'une seule réflexion. Au-delà, la quantité d'énergie devient en effet très faible et peut-être négligée dans les calculs (Lemonsu, 2003).

Pour effectuer ces calculs, le facteur de vue du ciel est nécessaire. Les facteurs de vue du ciel relatifs à la route (ψ_r) et aux murs (ψ_m) estiment la fraction du ciel vue par la surface considérée. Il se calcule comme une fonction de $z_{bât}$ et de W .

$$\psi_r = \sqrt{(z_{bât}/W)^2 + 1} - z_{bât}/W$$

$$\psi_m = \frac{1}{2} \frac{z_{bât}/W + 1 - \sqrt{(z_{bât}/W)^2 + 1}}{z_{bât}/W} \quad (\text{Formules 24 et 25})$$

Le facteur de vue du ciel du toit est égal pour sa part à 1.

Si les bâtiments sont très bas, c'est-à-dire que la rue est ouverte sur le ciel, alors ψ_r tend vers 1 et ψ_m vers 0,5 (un mur ne voit que la moitié du ciel). Dans ce cas les flux du rayonnement infrarouge venant des routes ne seront pas piégés par les murs. Au contraire, si les bâtiments

sont très hauts, les deux facteurs de vue du ciel tendent vers zéro et il y aura un piégeage important des rayonnements infrarouges et peu d'énergie s'échappera vers le ciel.

Le calcul rayonnement infrarouge (IR) absorbé par les toits (L_t^*) est relativement simple et dépend de la température de surface (T_{t1}) et du rayonnement IR incident (L^\downarrow) :

$$L_t^* = \varepsilon L^\downarrow - \varepsilon \sigma T_{t1}^4 \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (\text{Formule 26})$$

Où ε_t est l'émissivité du toit et σ est la constante de Boltzmann.

Pour les routes et les murs, le rayonnement IR absorbé est donné par les formules suivantes :

$$\begin{aligned} L_r^* = & \varepsilon_r \Psi_r L^\downarrow - \varepsilon_r \varepsilon_m (1 - \Psi_r) \sigma T_{m1}^4 \\ & + \varepsilon_r (1 - \varepsilon_m) (1 - \Psi_r) \Psi_m L^\downarrow + \varepsilon_r \varepsilon_m (1 - \varepsilon_m) (1 - \Psi_r) (1 - 2\Psi_m) \sigma T_{m1}^4 \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (\text{Formule 27}) \\ & + \varepsilon_r (1 - \varepsilon_m) (1 - \Psi_r) \Psi_m \sigma \varepsilon_r T_{r1}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_m^* = & \varepsilon_m \Psi_m L^\downarrow - \varepsilon_m \sigma T_{m1}^4 + \varepsilon_m \Psi_m \sigma \varepsilon_r T_{r1}^4 \\ & + \varepsilon_m^2 (1 - 2\Psi_m) \sigma T_{m1}^4 + \varepsilon_m (1 - \varepsilon_r) \Psi_m \Psi_r L^\downarrow \\ & + \varepsilon_m (1 - \varepsilon_m) \Psi_m (1 - 2\Psi_m) L^\downarrow + \varepsilon_m^2 (1 - \varepsilon_m) (1 - 2\Psi_m)^2 \sigma T_{m1}^4 \\ & + \varepsilon_m^2 (1 - \varepsilon_r) \Psi_m (1 - \Psi_r) \sigma T_{m1}^4 + \varepsilon_m (1 - \varepsilon_m) \Psi_m (1 - 2\Psi_m) \sigma \varepsilon_r T_{r1}^4 \end{aligned} \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (\text{Formule 28})$$

Où ε_r et ε_m sont les émissivités respectivement de la route et des murs, et T_{r1} et T_{m1} leurs températures de surface.

Le rayonnement solaire

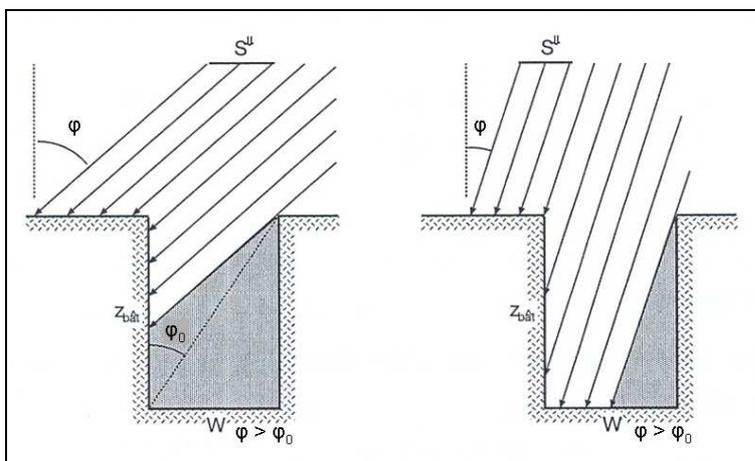


Figure A 34 : Rayonnement solaire incident (Lemonsu, 2003).

Le rayonnement solaire incident se décompose en deux termes : le rayonnement solaire direct et le rayonnement solaire diffus (dû aux multiples réflexions).

Le rayonnement solaire direct

Du fait des effets d'ombre, des calculs particuliers sont nécessaires pour estimer le flux solaire reçu par les murs ou les routes.

On note S_x^\downarrow le rayonnement solaire direct reçu sans réflexion préalable par les différentes surfaces ; θ , l'angle entre la direction du soleil et l'axe du canyon (avec θ_0 l'angle critique d'orientation du canyon au-delà duquel la rue passe dans l'ombre) ; φ , l'angle zénithal limite des rayons du soleil (avec φ_0 l'angle zénithal au-deçà duquel la rue est illuminée). L'expression du rayonnement solaire direct reçu par la route, les murs et le toit est la suivante :

$$\begin{aligned}
 S_r^\downarrow &= S^\downarrow \left[\frac{2\theta_0}{\pi} - \frac{2}{\pi} \frac{z_{bât}}{W} \tan(\varphi) [1 - \cos(\theta_0)] \right] \\
 S_m^\downarrow &= S^\downarrow \left[\frac{z_{bât}}{W} \left(\frac{1}{2} - \frac{\theta_0}{\pi} \right) + \frac{1}{\pi} \tan(\varphi) [1 - \cos(\theta_0)] \right] \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (\text{Formules 29, 30 et 31}) \\
 S_t^\downarrow &= S^\downarrow \\
 &\text{avec } \theta_0 = \arcsin\left(\min\left(\frac{z_{bât}}{W} \frac{1}{\tan(\varphi)}, 1\right)\right)
 \end{aligned}$$

Le rayonnement solaire diffus

Le rayonnement solaire diffus reçu par les différentes surfaces s'exprime directement à partir des facteurs de vue du ciel :

$$\begin{aligned}
 S_r^\downarrow &= \psi_r S^\downarrow \\
 S_m^\downarrow &= \psi_m S^\downarrow \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (\text{Formules 32, 33 et 34}) \\
 S_t^\downarrow &= S^\downarrow
 \end{aligned}$$

Du fait de la forme du canyon et de la possibilité d'avoir des surfaces avec un albédo élevé, le bilan d'énergie solaire est calculé en supposant une infinité de réflexions. $M_x^{S_\uparrow}$ correspond au rayonnement solaire total réfléchi par les surfaces lors des réflexions sur la route et les murs :

$$M_r^{S^\uparrow} = \frac{S_r^\uparrow(0) + (1 - \psi_f)\alpha_r(S_m^\uparrow(0) + \psi_m\alpha_m S_r^\uparrow(0))}{1 - (1 - 2\psi_m)\alpha_m - (1 - \psi_f)\psi_m\alpha_r\alpha_m} \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (\text{Formules 35 et 36})$$

$$M_m^{S^\uparrow} = \frac{S_m^\uparrow(0) + \psi_m\alpha_m S_r^\uparrow(0)}{1 - (1 - 2\psi_m)\alpha_m - (1 - \psi_f)\psi_m\alpha_r\alpha_m}$$

Les termes $S_r^\uparrow(0)$ et $S_m^\uparrow(0)$ représentent le rayonnement réfléchi à la première réflexion, soit :

$$S_r^\uparrow(0) = \alpha_r S_r^\downarrow + \alpha_r S_r^\downarrow \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (\text{Formules 37 et 38})$$

$$S_m^\uparrow(0) = \alpha_m S_m^\downarrow + \alpha_m S_m^\downarrow$$

Ainsi, d'après MASSON (2000), le rayonnement solaire total absorbé par les différentes surfaces (S_x^*) s'exprime de la façon suivante :

$$S_r^* = (1 - \alpha_r)S_r^\downarrow + (1 - \alpha_r)S_r^\downarrow + (1 - \alpha_r)(1 - \psi_f)M_m^{S^\uparrow}$$

$$S_m^* = (1 - \alpha_m)S_m^\downarrow + (1 - \alpha_m)S_m^\downarrow + (1 - \alpha_m)(1 - 2\psi_m)M_r^{S^\uparrow} \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (\text{Formules 39, 40 et 41})$$

$$S_t^* = (1 - \alpha_t)S_t^\downarrow + (1 - \alpha_t)S_t^\downarrow$$

S_x^\downarrow et S_x^\downarrow sont les rayonnements solaire direct et solaire diffus reçus sans réflexions préalable par les surfaces, $M_x^{S^\uparrow}$ correspond au rayonnement solaire total absorbé par les surfaces lors des réflexions sur la route et les murs, et α_x sont les albédos des surfaces.

Les flux anthropogéniques

Les activités ayant lieu au sein des villes génèrent également des rejets de vapeur d'eau ou de chaleur au sein de l'atmosphère.

Si la chaleur produite par le chauffage est prise en compte au sein de TEB par le biais d'une température intérieure minimale des bâtiments, les contributions de l'industrie et du trafic de véhicules sont introduit par les termes suivants :

- $Q_{Htrafic}$, le flux de chaleur sensible anthropique dû au trafic,
- $Q_{Etrafic}$, le flux de chaleur latente anthropique dû au trafic,
- Q_{Hindus} , le flux de chaleur sensible anthropique d'origine industrielle,

- $Q_{E_{indus}}$, le flux de chaleur latente anthropique d'origine industrielle.

Les flux dus au trafic sont supposés être émis dans les rues et ceux d'origine industrielle sont rejetés directement dans l'atmosphère (figure A 37). Ces derniers n'interviennent donc pas dans les échanges internes au canyon mais uniquement dans le bilan d'énergie global.

Les flux turbulents

L'approche du schéma TEB est de supposer qu'il y a deux sources majeures de chaleur issues de la couverture artificielle et allant vers l'atmosphère, ce qui mène à deux flux de chaleur turbulents. Ces deux surfaces différentes sont les toits et le système canyon (figure A 35). Les deux contributions sont moyennées en fonction de leur surface horizontale ; c'est un moyen de représenter le mélange au sein de la sous-couche de rugosité urbaine. A noter qu'au sein de

TEB, la longueur de rugosité est égale à $z_{omville} = \frac{z_{bât}}{10}$, et ce avec une limite arbitraire de 5m.

Les résistances aérodynamiques (RES_x) sont définies à partir de formules aérodynamiques issues de mesures in-situ. Pour simplifier, la même valeur est choisie pour la route et les murs. La résistance aérodynamique est indépendante de la stabilité à l'intérieur ou au-dessus du canyon.

$$RES_t = f(R_{i_{top}}, z_{ref}, U_a, z_{0m}, z_{0h})$$

$$RES_m = (11,8 + 4,2U_{eff})^{-1}$$

$$RES_r = f(R_{i_{can}}, z_{bât}/2, U_{eff}, z_{0m}, z_{0h}),$$

$$[s.m^{-1}] \quad (\text{Formules 42, 43 et 44})$$

$$\text{avec } U_{eff} = \sqrt{U_{can}^2 + W_{can}^2}$$

$R_{i_{top}}$ et $R_{i_{can}}$ sont les nombres de Richardson calculés respectivement entre le toit et l'atmosphère et entre les parois et l'air dans le canyon. U_a est la vitesse du vent au premier niveau atmosphérique (z_{ref}), et U_{eff} est le vent effectif dans le canyon, qui dépend de la composante horizontale de la vitesse du vent dans le canyon (U_{can}) et de la vitesse de frottement (u_*). z_{0m} et z_{0h} sont les longueurs de rugosité dynamiques et thermiques associées aux surfaces.

Elles traduisent l'efficacité avec laquelle la chaleur emmagasinée dans les surfaces bâties est extraite et restituée à l'air. Elles sont inversement proportionnelles à l'intensité du vent : plus le vent est fort, plus les échanges sont amplifiés.

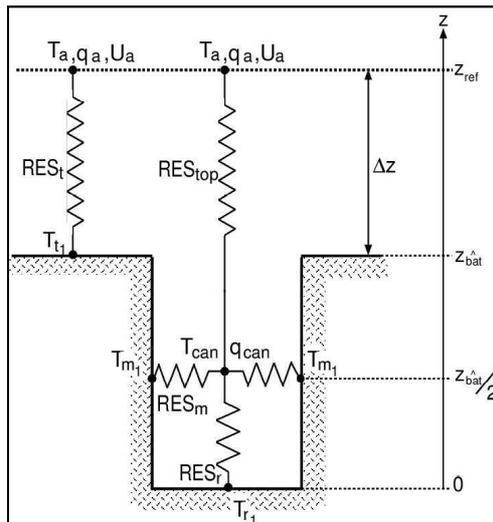


Figure A 35 : Représentation du système de résistances aérodynamiques associées au canyon urbain (Lemonsu, 2003).

Une résistance aérodynamique RES_{top} est également définie entre l'air à l'intérieur et au sommet du canyon. Elle traduit l'efficacité du transfert de chaleur de l'air à l'intérieur du canyon vers l'air au premier niveau atmosphérique. Elle est calculée en fonction de l'intensité du vent au premier niveau atmosphérique U_a , de la longueur de rugosité du couvert urbain $z_{0mville}$ et de la longueur de rugosité thermique du canyon z_{0hcan} :

$$RES_{top} = f(R_{iop}, z_{ref}, U_a, z_{0mville}, z_{0hcan}) \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (\text{Formule 45})$$

Le vent dans le canyon

Le calcul du vent à l'intérieur du canyon est nécessaire pour pouvoir estimer les flux de chaleur entre les surfaces et le canyon. La composante verticale de la vitesse du vent le long des murs, W_{can} , tout comme la composante horizontale au sein du canyon, U_{can} , doivent être définies.

Une approximation du vent au sommet du canyon peut être donnée par un profil logarithmique (figure A 36). La hauteur de déplacement z_d est alors supposée égale à $2z_{bât}/3$. Après intégration sur 360 degrés, pour pouvoir prendre en compte toutes les directions, le vent à l'altitude $z_{bât}$ s'exprime sous la forme :

$$U_{top} = \frac{2}{\pi} \frac{\ln\left(\frac{z_{bât}/3}{z_{0mville}}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta z + z_{bât}/3}{z_{0mville}}\right)} \left\| \vec{U}_a \right\| \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (\text{Formule 46})$$

Δz est la différence de hauteur entre le premier niveau atmosphérique z_{ref} et le niveau des toits $z_{bât}$.

A l'intérieur du canyon, il est supposé que la composante horizontale du vent suit un profil exponentiel. A la hauteur $z = z_{bât}/2$, cette composante est donc égale à :

$$U_{can} = U_{top} \exp\left(-\frac{z_{bât}}{4W}\right) = \frac{2}{\pi} \exp\left(-\frac{z_{bât}}{4W}\right) \frac{\ln\left(\frac{z_{bât}/3}{z_{0mville}}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta z + z_{bât}/3}{z_{0mville}}\right)} \left\| \vec{U}_a \right\| \quad [\text{m.s}^{-1}] \quad (\text{Formule 47})$$

La vitesse verticale W_{can} le long des murs est supposée égale à la vitesse de frottement u_* :

$$W_{can} = u_* = \sqrt{C_d} \left\| \vec{U}_a \right\| \quad [\text{m.s}^{-1}] \quad (\text{Formule 48})$$

Où U_a est la vitesse du vent au premier niveau atmosphérique du modèle et C_d , le coefficient de traînée fonction à la fois des températures et humidités à l'intérieur et au-dessus du canyon et de la longueur de rugosité $z_{0mville}$.

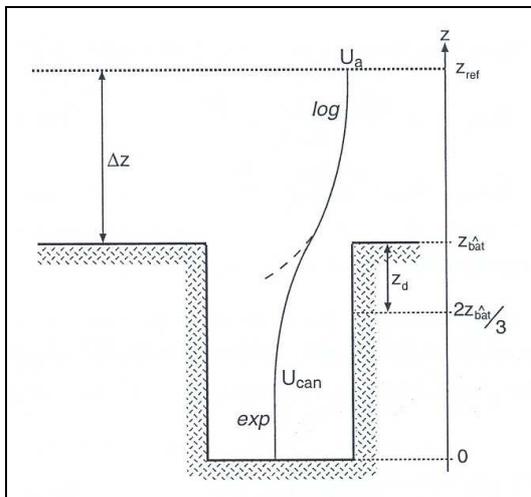


Figure A 36 : Représentation du vent au-dessus et à l'intérieur du canyon urbain (Lemonsu, 2003).

Les flux turbulents entre les parois et l'air du canyon

Les flux turbulents entre les surfaces du canyon et l'air du canyon sont déterminés à partir du système de résistances aérodynamiques et des différences de température et d'humidité entre les parois et l'air. Voici les formules :

$$Q_{Hr} = \frac{C_{pd}\rho_a(T_{r1}-T_{can})}{RES_r}$$

$$Q_{Hm} = \frac{C_{pd}\rho_a(T_{m1}-T_{can})}{RES_m} \quad [W.m^{-2}] \quad (\text{Formules 49, 50, 51, 52})$$

$$Q_{LEr} = \frac{L_v\rho_a(\delta_r q_{sat}(T_{r1}, p_s) - q_{can})}{RES_r}$$

$$Q_{LEm} = 0$$

T_{can} et q_{can} sont les températures sont la température et l'humidité spécifique²⁰³ de l'air à l'intérieur du canyon. Le flux de chaleur latente des murs est toujours nul parce que TEB fait l'hypothèse que ces surfaces n'interceptent pas les précipitations.

Le flux de stockage de chaleur est déterminé comme étant le terme résiduel du bilan d'énergie :

$$\Delta Q_{sx} = Q_x^* - (Q_{Hx} + Q_{LEx}) \quad [W.m^{-2}] \quad (\text{Formule 53})$$

Les flux turbulents entre l'air du canyon et l'atmosphère au-dessus de la canopée urbaine

Au-dessus du canyon, les flux sont estimés à partir des caractéristiques de l'air du canyon, c'est-à-dire la température T_{can} et l'humidité q_{can} . Les flux entre l'air du canyon et l'atmosphère s'expriment sous la forme :

$$Q_{Htop} = \frac{C_{pd}\rho_a(T_{can}-T_a)}{RES_{top}} \quad [W.m^{-2}] \quad (\text{Formules 54 et 55})$$

$$Q_{Etop} = \frac{L_v\rho_a(q_{can}-q_a)}{RES_{top}}$$

Les flux turbulents entre les toits et l'atmosphère

Le calcul de ces flux turbulents est également fonction ici de la résistance aérodynamique :

$$Q_{Ht} = \frac{C_{pd}\rho_a(T_{t1}-T_a)}{RES_t}$$

$$Q_{Et} = \frac{L_v\rho_a(\delta_t q_{sat}(T_{t1}, p_s) - q_a)}{RES_t} \quad [W.m^{-2}] \quad (\text{Formules 56 et 57})$$

Avec δ_t la fraction de toit humide.

²⁰³ L'humidité spécifique ou teneur en eau est définie comme le rapport de la masse d'eau dans l'air sur la masse d'air humide.

Les flux turbulents à l'échelle de la ville

Une fois calculés les différents flux ci-dessus, il est possible d'obtenir les flux moyens à l'échelle de la ville. Le mélange des différentes sources de flux turbulents de chaleur, est en quelque sorte imité et cela produit des flux qui sont représentatifs de la partie supérieure de la couche de surface, au-dessus de la sous-couche de rugosité. Les flux liés à l'activité industrielle sont ajoutés à cette étape.

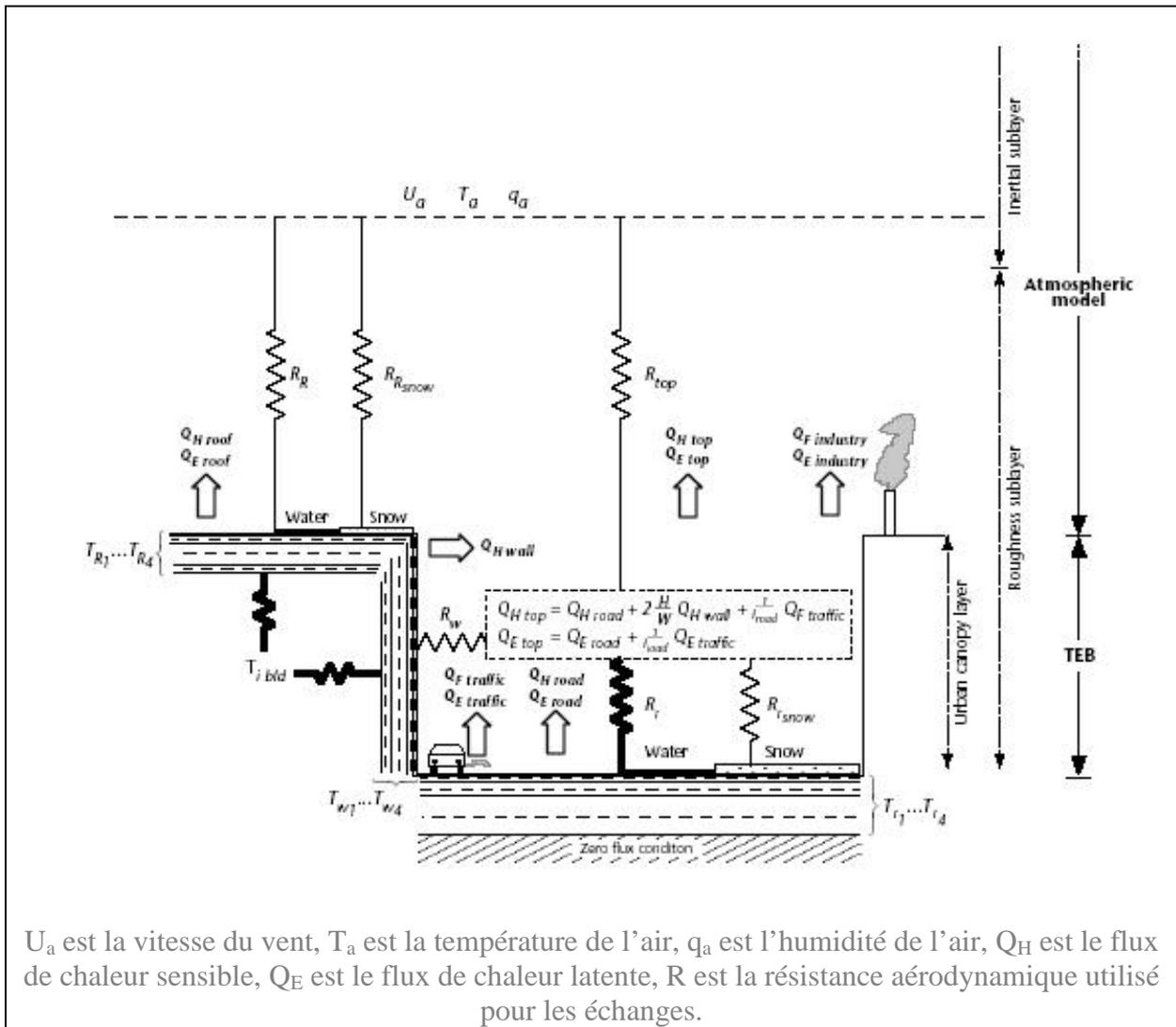


Figure A 37 : Les résistances aérodynamiques, les flux de chaleurs sensibles et latentes et les paramètres climatiques intervenant au sein de du schéma TEB. (Masson *et al.*, 2002)

Ainsi les flux de chaleurs globaux issus des zones urbaines (ici uniquement matériaux artificiels) vers l'atmosphère sont :

$$Q_{Hville} = (1 - abât) Q_{Htop} + abât Q_{Ht} + Q_{Hindus}$$

$$Q_{LEville} = (1 - abât) Q_{LEtop} + abât Q_{LEt} + Q_{LEindus} \quad [W.m^{-2}] \quad (\text{Formules 58 et 59})$$

La température et l'humidité dans le canyon

Ces valeurs peuvent être considérées comme des résultats, des sorties d'une prévision météorologique. Elles sont calculées en supposant un équilibre des flux thermodynamique à chaque pas de temps. Les flux d'origine anthropique liés au trafic sont pris en compte ici et supposé provenir de la surface de la route.

Ainsi la température de l'air au milieu du canyon correspond à des contributions en énergie des parois du canyon et de l'atmosphère au-dessus de la canopée urbaine et l'on obtient :

$$Q_{Htop} = Q_{Hr} + \frac{z_{bât}}{W} Q_{Hm} + a_{bât} Q_{Htrafic} \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (\text{Formule 60})$$

D'où l'expression de T_{can} :

$$T_{can} = \frac{\frac{T_{r1}}{RES_r} + \frac{2z_{bât}}{W} \frac{T_{m1}}{RES_m} + \frac{T_a}{RES_{top}} + \frac{Q_{Htrafic}}{C_{pd}\rho_a(1-a_{bât})}}{\frac{1}{RES_r} + \frac{2z_{bât}}{W} \frac{1}{RES_m} + \frac{1}{RES_{top}}} \quad [\text{K}] \quad (\text{Formule 61})$$

De même, pour q_{can} on obtient :

$$Q_{LEtop} = Q_{LEr} + a_{bât} Q_{LEtrafic} \quad [\text{W.m}^{-2}] \quad (\text{Formule 62})$$

$$\text{Soit : } q_{can} = \frac{\frac{\delta_r q_{sat}(T_{r1}, p_S)}{RES_r} + \frac{q_a}{RES_{top}} + \frac{Q_{LEtrafic}}{L_v \rho_a (1-a_{bât})}}{\frac{1}{RES_r} + \frac{1}{RES_{top}}} \quad [\text{kg.kg}^{-1}] \quad (\text{Formule 63})$$

L_v est la chaleur latente de vaporisation, C_{pd} est la capacité thermique de l'air sec et ρ_a est la densité de l'air au premier niveau atmosphérique. Δ_r est la fraction de route humide, q_{sat} est l'humidité spécifique de saturation et p_S est la pression près de la surface.

Le couplage de TEB avec ISBA

TEB traite exclusivement les surfaces bâties, c'est-à-dire des éléments urbains conçus par l'homme (immeubles, rues, maisons, etc.). Il peut fonctionner seul mais cela signifie que la surface modélisée ne comprend aucun couvert végétal et aucune étendue d'eau. Pour intégrer ces types de couverts, il est nécessaire de coupler TEB avec ISBA (Interaction Sol-Biosphère-

Atmosphère) qui modélise les échanges entre la végétation, les sols naturels, et l’atmosphère. Un traitement différent est appliqué aux étendus d’eau.

Ces deux schémas fonctionnent en parallèle et n’interagissent pas l’un avec l’autre.

Pour une maille, il est nécessaire de fixer la part de zone urbaine minérale (TEB), de végétation (ISBA), d’eau (WATFLX) et de mer (SEAFLX) (figure A 38). Pour chacune de ces fractions sont calculés des flux et des paramètres climatiques (température, humidité, etc.). Une valeur moyenne, tenant compte de la proportion de chacune des surfaces, est donnée.

Le code de surface incluant à la fois TEB, ISBA et les schémas concernant les étendus d’eau (mer et océan /lac) s’appelle SURFEX.

En cas de couplage avec un modèle atmosphérique tel que Méso-NH, ce sont les valeurs moyennes qui sont injectées, avec :

$$F_{moy} = a_{TEB}F_{TEB} + a_{ISBA}F_{ISBA} + a_{eau}F_{eau} + a_{mer}F_{mer} \quad [W.m^{-2}] \quad (\text{Formule 64})$$

a_{TEB} , a_{ISBA} , a_{eau} , et a_{mer} sont les fractions de la maille correspondant respectivement à des surfaces bâties, des couverts naturels, des étendues d’eau de type lac et à la mer ou l’océan.

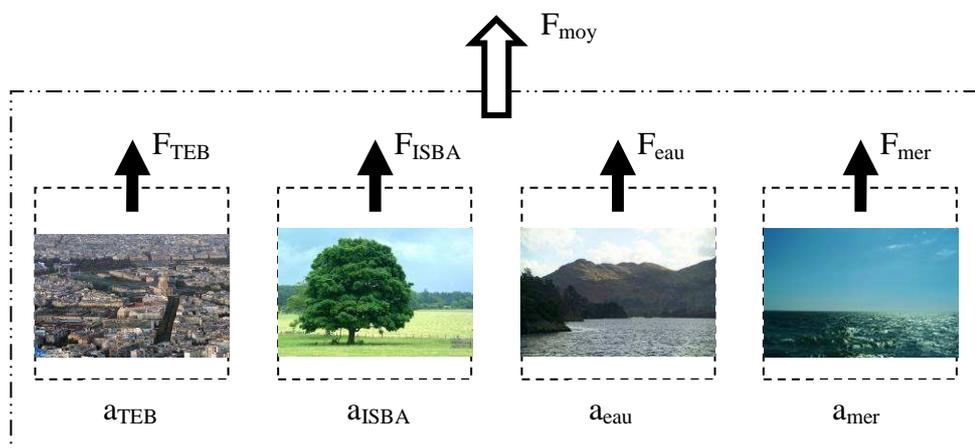


Figure A 38 : Représentation des flux de surfaces moyennes. D’après Lemonsu (2003).

Aucun échange horizontal n’a lieu entre les différents types de surface.

Le couplage et le forçage atmosphérique

TEB et ISBA peuvent être utilisés en mode forcé, c'est-à-dire en leur imposant à un niveau d'altitude de référence (z_{ref}) un jeu de paramètres atmosphériques (rayonnements incidents, température et humidité de l'air, vent, pression, précipitations...). Ils peuvent également fonctionner en couplage avec un modèle numérique atmosphérique, en particulier le modèle Méso-NH (modèle de recherche de Météo-France et du Laboratoire d'Aérodynamique) (Lafore *et al.*, 1998).

Dans le cas d'un forçage, on injecte au sein de la modélisation des paramètres climatiques selon un certain pas de temps. Ce forçage se fait régulièrement 10m au-dessus des toits.

Le forçage contient déjà des informations géographiques puisqu'il s'agit bien souvent de mesures ou d'observations issues des stations météorologiques. Ainsi ces données sont intimement liées au lieu où elles sont mesurées et comprennent déjà des informations sur la latitude (la position sur le globe terrestre), la situation géographique (montagne, zone côtière, etc.), la couverture du sol (ville, végétation, etc.) et l'activité installée dans la « région ».

Il est donc nécessaire pour une bonne interprétation des résultats de connaître l'origine du forçage appliqué à la modélisation effectuée.

Les données de forçage nécessaires sont d'une manière générale : la pluviométrie ; l'évapotranspiration potentielle (E.T.P.) ; la température de l'air (moyenne, minimum et maximum) ; la pression atmosphérique ; la force et la direction du vent ; la tension de vapeur d'eau et l'humidité ; la nébulosité.

Dans le cas d'un couplage avec un modèle atmosphérique de type Méso-NH, les flux générés par les surfaces sont injectés au premier niveau atmosphérique du modèle et ce dernier réagit donc au comportement de la surface. Cela permet, contrairement au forçage, de prendre en compte l'influence de la surface sur les conditions météorologiques. La difficulté du couplage tient à l'instabilité de ce système. En cas de modélisation d'un évènement connu et dont on connaît les données climatiques, il est possible de vérifier la véracité de la modélisation, mais ce n'est pas le cas d'une modélisation de ville fictive par exemple.

Les résultats

La validation

Le schéma de ville TEB a été validé en mode forcé sur plusieurs villes : Vancouver au Canada et Mexico au Mexique (Masson *et al.*, 2002), Marseille (Lemonsu, 2003), Bâle en Suisse (Hamdi et Masson, 2007), Toulouse (Pigeon *et al.*, 2008).

Les sorties et leur calcul

TEB et ISBA calculent un grand nombre de données auxquelles il est possible d'accéder. C'est le cas de toutes les variables nécessaires aux différents calculs au sein des deux schémas.

Parmi les données de sortie auxquelles il est possible d'accéder, nous pouvons citer la température moyenne à 2m (T_{2m}), l'humidité spécifique à 2m (q_{2m}), les flux de chaleurs sensible et latente moyens, etc. et ce par type de surface (TEB ou ISBA) ou pour l'ensemble de la maille modélisée.

Pour chaque pas de temps de sortie, SURFEX nécessite pour ses calculs un forçage atmosphérique. Si le pas de temps de sortie est inférieur à celui des données de forçage, une interpolation linéaire est effectuée entre les données connues.

Comportement de la température du milieu en fonction du forçage : cas du 30 juin 2006

Un grand nombre de paramètres climatiques sont modifiés par le milieu urbain et celui qui est le plus perceptible et le plus représentatif est la température. Nous avons donc regardé la façon dont celle-ci évolue durant la journée du 30 juin 2006 et nous l'avons comparée avec la température appliquée en forçage, pour évaluer l'importance de cette dernière sur l'évolution de la première.

La figure A 39(a) présente pour le cas de Paris la température du forçage ($T_{\text{forçage}}$) et la température moyenne à 2m (T_{2m}) le 30 juin 2006. La figure A 39(b) présente la différence entre les deux températures durant cette même journée.

La température moyenne à 2m (T_{2m}) suit de façon très proche la température donnée en forçage. Les différences n'excèdent pas $1,3^{\circ}\text{C}$ et sont maximales durant le jour, moment durant lequel le rayonnement solaire réchauffe les surfaces urbaines.

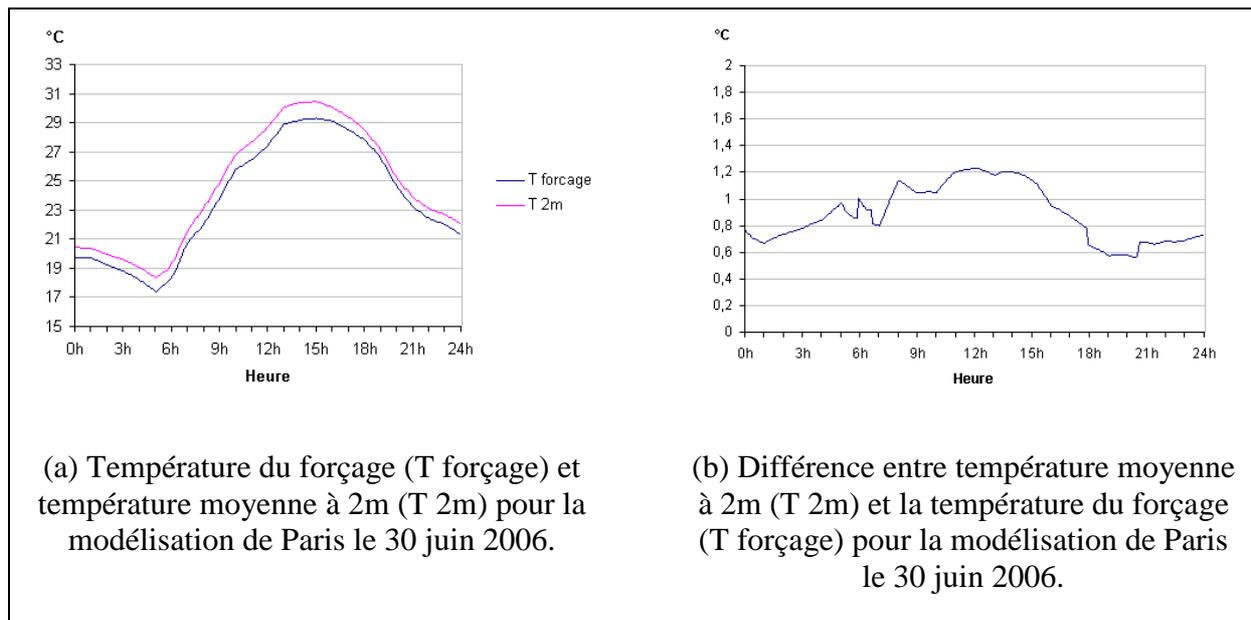
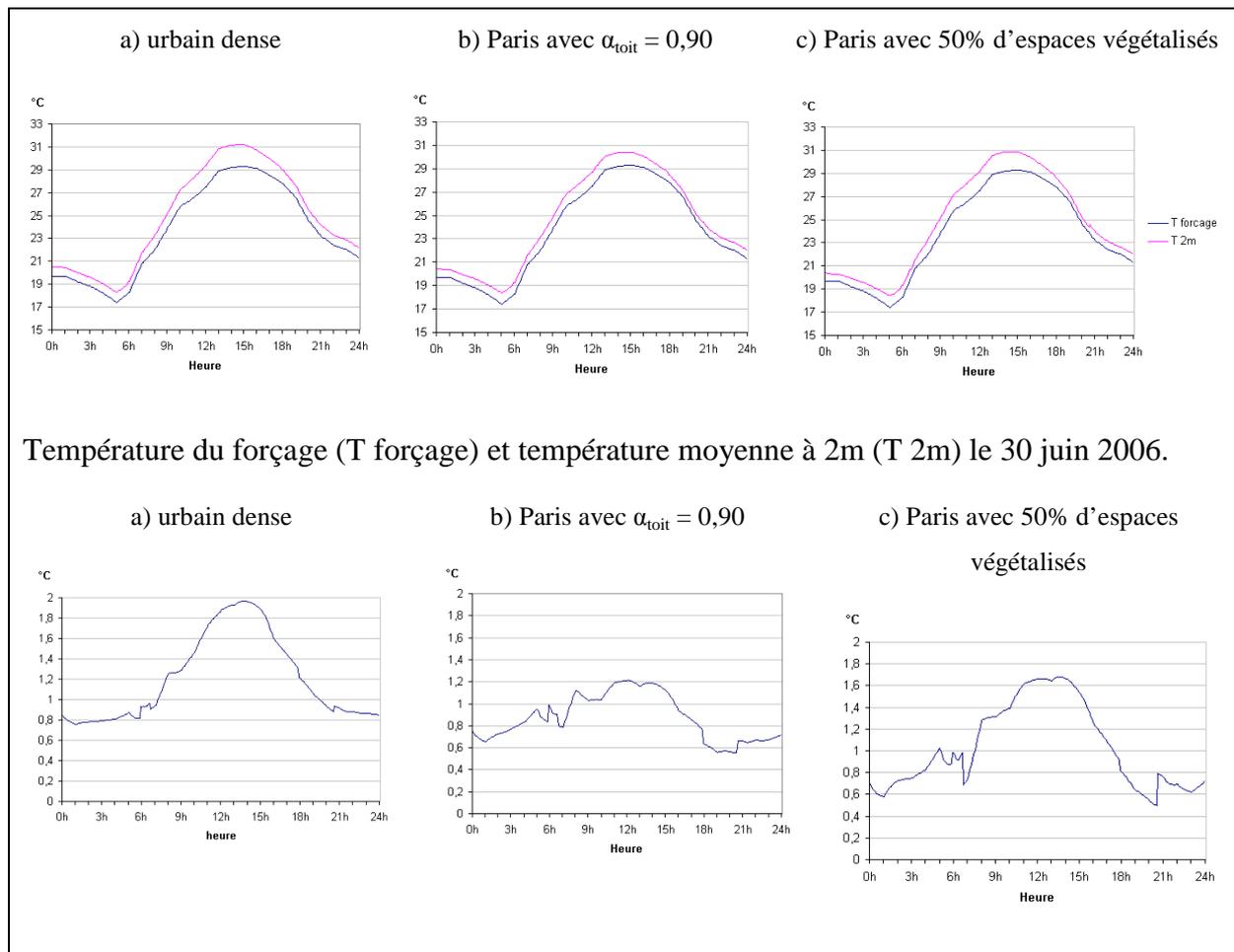


Figure A 39 : Comparaison entre la température du forçage et la température moyenne à 2m pour la modélisation de Paris le 30 juin 2006.

Nous avons également comparé l'évolution des températures pour différents milieux urbains. Trois situations ont été choisies, en plus de Paris : urbain dense, Paris avec un albédo de toit à 0,90 (au lieu de 0,60), Paris avec 50% d'espaces végétalisés (au lieu de 17%) (figure A 40).

Comme pour Paris, l'évolution de la température à 2m suit celle de la température de forçage. La température près du sol reste également plus élevée, et, d'une situation à l'autre, les écarts les plus conséquents ont lieu entre Paris et urbain dense. A 15h, urbain dense est plus chaud d'un peu moins de 0,8°C.



Température du forçage (T forçage) et température moyenne à 2m (T 2m) le 30 juin 2006.

Différence entre température moyenne à 2m (T 2m) et la température du forçage (T forçage) le 30 juin 2006.

Figure A 40 : Comparaison entre la température du forçage et la température moyenne à 2m pour la modélisation de Paris le 30 juin 2006 pour urbain dense, Paris avec un albédo de toit à 0,90 et Paris avec 50% d'espaces végétalisés.

Comme nous le signalions plus haut, pour chaque pas de temps de sortie, SURFEX nécessite pour ses calculs un forçage atmosphérique. Si le pas de temps de sortie est inférieur à celui des données de forçage, une interpolation linéaire est effectuée entre les données connues. Cela signifie que les données atmosphériques ne tiennent pas compte des évolutions potentielles liées à une modification de la surface et remettent en quelques sortes « à zéro les compteurs » à chaque pas de temps. Seules les caractéristiques climatiques de la surface conservent l'influence de pas de temps en pas de temps. Ainsi, l'influence de la surface, sur la température notamment, est diminuée du fait de l'absence de ce retour²⁰⁴. Nous avons comparé les températures à 2m des différentes surfaces présentes au sein de la ville de Paris à savoir l'eau, les espaces végétalisés et la surface minérale (figure A 41).

²⁰⁴ Le travail en couplage avec un modèle atmosphérique d'échelle régionale permet ce retour.

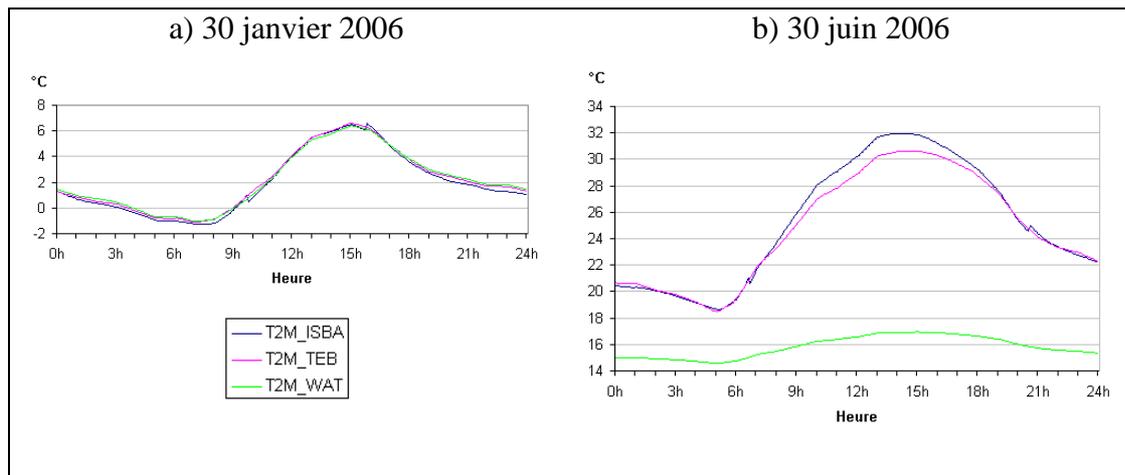


Figure A 41 : Comparaison entre les températures moyenne à 2m au-dessus de la végétation (T2M_ISBA), au-dessus de la surface minérale (T2M_TEB) et au-dessus de l'eau (T2M_WAT) pour Paris les 30 janvier et 30 juin 2006.

Comme nous le montre la figure A 41, les températures de la ville minérale, des espaces végétalisés et de la surface d'eau présentent très peu de différence durant la journée du 30 janvier 2006. Durant la journée du 30 juin 2006, la surface d'eau reste beaucoup plus fraîche que les deux autres surfaces. En revanche, ce qui peut sembler surprenant, la température au-dessus des espaces végétalisés reste plus élevée que celle au-dessus de la surface minérale presque toute la journée. Nos conditions initiales pourraient expliquer cela puisque nous avons considéré pour les espaces végétalisés des sols secs et déshydratés. Des simulations supplémentaires avec un sol ayant initialement une grande réserve d'eau ont été effectuées pour vérifier l'influence de ce paramètre.

Comme nous le montre la figure A 42, pour la journée du 30 janvier 2006, la température au-dessus de la surface minérale reste plus élevée que celle au-dessus des espaces végétalisés presque toute la journée. Pour la journée du 30 juin 2006, la température au-dessus des espaces végétalisés est plus élevée que celle au-dessus de la surface minérale d'environ 9h à 17h. La présence d'eau au sein du sol a donc permis de rafraîchir les espaces végétalisés mais pas au point de les rendre plus frais que les surfaces urbaines minérales.

Les températures T2M_ISBA et T2M_TEB ne sont pas calculées de la même façon (TEB et ISBA sont deux schémas indépendants). T2M_ISBA dépend des échanges ayant lieu à l'interface surface air, alors que T2M_TEB correspond à la température moyenne à 2m au sein du canyon et traduit l'équilibre thermodynamique dans le canyon.

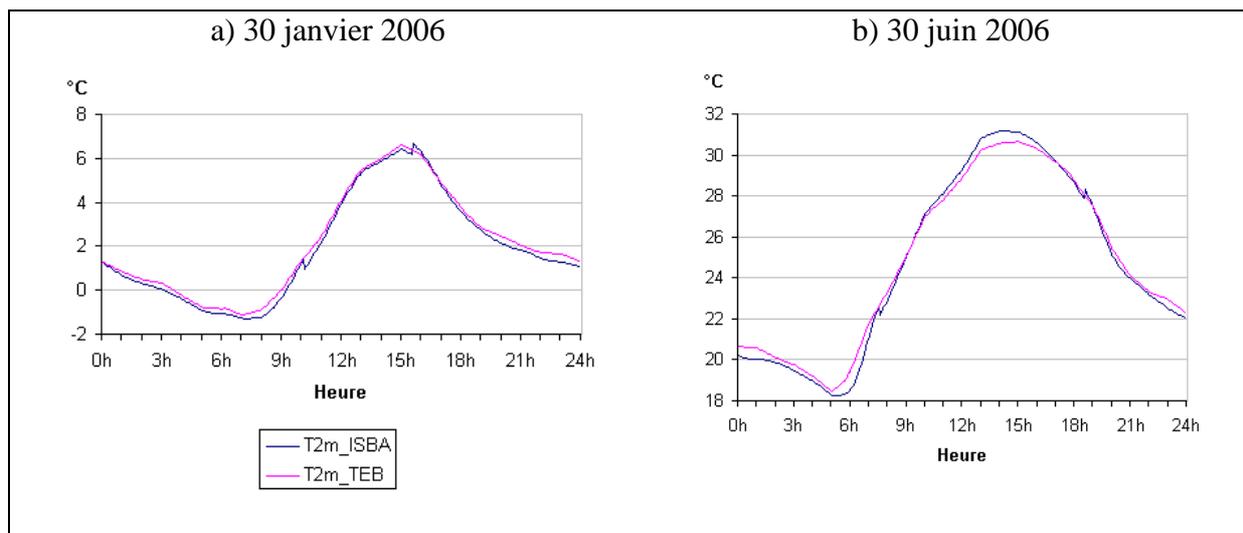


Figure A 42 : Comparaison entre les températures moyenne à 2m au-dessus de la végétation (T2M_ISBA) très arrosé, au-dessus de la surface minérale (T2M_TEB) pour Paris les 30 janvier et 30 juin 2006.

La température à 2m au sein du canyon est ainsi fonction des flux de chaleur issus des murs et de la route. Notre description de Paris a un profil avec des rues très encaissées (hauteur de bâti de 30m et largeur de rue de 15m), ce qui nous donne une grande partie de murs à l'ombre et donc au final un flux de chaleur issu des murs plus faible que celui issu des surfaces végétalisées, qui ont été tout le temps éclairées. La température à 2m au-dessus de la végétation peut ainsi être plus élevée que celle au sein du canyon à cause des effets d'ombre.

Les limites de TEB et de son utilisation en mode forcé

Pour notre étude, les limites de TEB sont sa simplification descriptive de la forme bâtie, la précision de sa description pour les toits, les murs et les rues mais également notre fonctionnement en mode forcé.

Concernant la simplification descriptive de la forme du bâti, si l'on peut regretter l'impossibilité de tenir compte de variations des hauteurs et profondeurs de bâtiments et des largeurs de rues, ce n'est pas le point le plus gênant. C'est en effet l'impossibilité de tenir compte d'une orientation prédominante des rues qui est la simplification la plus dommageable pour les tests de sensibilité que nous souhaitons effectuer. En effet, si nous prenons le cas de Paris, la création de percées ou de rues de direction identique aux vents dominants auraient un effet sensible sur son climat, effet que nous ne pouvons donc hélas pas mesurer.

La précision de la description des murs, des toits et des routes n'est pas un réel défaut mais cela ne permet pas forcément une description facile d'un milieu existant pourvu justement

d'une variété de murs, toits ou routes. On peut se demander si un fonctionnement avec une résistance thermique globale par exemple n'aurait pas été plus simple et suffisant.

Le fonctionnement en mode forcé apporte également quelques limites. En effet, TEB, ou plus généralement SURFEX, ne permet pas une communication entre les différentes mailles décrites du sol, nous ne pouvons donc pas regarder l'influence de différents quartiers les uns par rapport aux autres. De plus, nous l'avons déjà signalé plus haut, le forçage influence fortement l'évolution des paramètres au sol, ce qui est, en soi, normal mais diminue de ce fait les différences climatiques qu'il est possible d'observer entre les différentes situations modélisées avec un même forçage. Ainsi, les différences de températures modélisées ne correspondent pas à une réalité observée, et sont a priori moins importantes. Pour éviter toute confusion, nous avons donc privilégié une analyse des bilans 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.

Annexe 10 Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère (ISBA)

L'objectif ici n'est pas d'expliquer de façon aussi précise que pour TEB les équations physiques modélisées au sein d'ISBA mais de présenter succinctement le modèle et les deux catégories de végétation utilisées au sein de nos modélisations.

Cette présentation s'appuie en grande majorité sur la thèse d'Aaron Boone (2000), qui a participé à l'amélioration de ce schéma de surface, et celle d'Aude Lemonsu (2003).

Description générale

Le schéma de surface ISBA (Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère) a été développé par le groupe de modélisation à Méso-Echelle (GMME) du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM). Ce schéma paramètre les échanges en eau et en énergie entre les couverts naturels (sol et végétation) et la basse atmosphère (Noilhan et Planton, 1989. Noilhan et Mahfouf, 1996)

Initialement, la première version développée possédait une configuration à deux niveaux dans le sol. Des limitations concernant le traitement du ruissellement et de l'évapotranspiration ont conduit à distinguer une couche d'extraction racinaire et une couche sous-racinaire de recharge. L'objectif de Boone (2000) a été d'inclure un troisième réservoir sol dans ISBA en distinguant une couche racinaire et une couche de drainage. Ces améliorations ont été intégrées parmi d'autres à la version dite *force-restore* d'ISBA.

Le sol se décompose donc en trois couches : une couche de surface (w_g), une zone ou couche racinaire (w_2) et une couche profonde (ou encore zone sous-racinaire ou couche de drainage) (w_3). La couche de surface constitue le réservoir superficiel et les deux autres couches le réservoir en eau du sol (figure A 43).

Pour la couche de surface, le bilan d'énergie permet de calculer le flux de chaleur sensible (Q_H), le flux de chaleur latente (Q_E) dépendant des différents termes évaporatifs (évaporation de l'eau, sublimation²⁰⁵ de la glace du sol nu, évapotranspiration) et le flux de chaleur stockée dans le sol (ΔQ_S).

²⁰⁵ Passage de l'état solide à l'état gazeux.

Les évolutions des températures de la couche de surface (T_S) et de la température du sol profond (T_2) sont évaluées, ainsi que celles de l'humidité du sol. Cette dernière dépend de différents mécanismes qui sont :

- L'interception de l'eau par le sol (dans le réservoir de surface) et par la végétation (dans le réservoir d'interception W_r) ;
- La transpiration des plantes (E_{tr}) ;
- L'évaporation de la fraction du sol nu (E_g) et de l'eau interceptée par le feuillage (E_r) ;
- La sublimation de la glace du sol ;
- Les ruissellements, soit de surface (R_S), soit depuis la couche racinaire (R_{C2}) ou depuis la couche profonde (R_{C3}) ;
- La diffusion de l'eau entre les couches (D_1 et D_2) ;
- Le drainage gravitationnel depuis la couche racinaire vers la couche profonde (K_2) ou depuis la couche profonde vers l'extérieur du système (K_3).

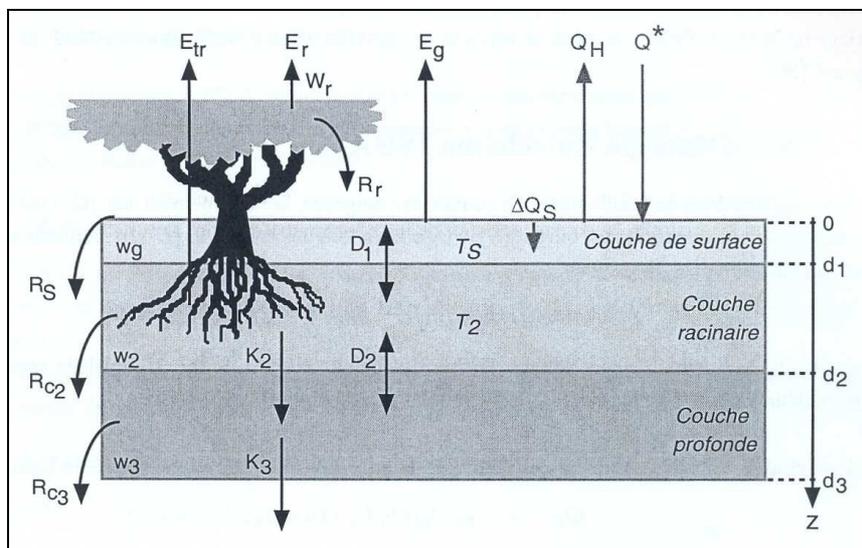


Figure A 43 : Représentation des échanges dans le schéma de surface ISBA (Lemonsu, 2003).

Douze types de sol peuvent être utilisés :

- Sol nu ;

- Rochers ;
- Neige permanente ;
- Forêt d'arbres à feuilles caduques ;
- Forêt de conifères ;
- Arbres toujours verts ;
- Champs cultivés (deux types) ;
- Champs cultivés irrigués :
- Prairies ;
- Prairies tropicales ;
- Jardins et parcs.

Différence entre deux types de végétation : arbres à feuilles caduques (*deciduous forest*) et jardin et parcs (*garden and parks*)

En cas de présence d'une base de données préconstituée, le schéma utilise peu de paramètres d'entrées :

- Les types de sols et de végétations ;
- La texture du sol (les fractions d'argile et de sable) ;
- Les profondeurs des couches (d_1 , d_2 , d_3)

En effet, la définition de la nature du sol et de la végétation permet d'accéder à la fraction de végétation dans la maille (le reste étant alors du sol nu), à l'indice foliaire ou foliaire²⁰⁶ (ou LAI pour *Leaf Area Index*), à la résistance stomatique minimale, à la longueur de rugosité dynamique, à l'albédo et à l'émissivité. Dans le cas d'études locales, ces paramètres peuvent être déterminés par l'utilisateur, en fonction des informations et des observations disponibles.

²⁰⁶ L'indice foliaire est égal à la surface de feuilles par unité de surface au sol (m^2/m^2). On peut estimer que pour un sol nu c'est inférieur à 2, pour une prairie entre 0,2 et 0,5 et pour une forêt entre 0,5 et 0,8.

Dans notre cas, nous disposons des chiffres utilisés par Météo-France pour la modélisation des zones urbaines denses dont les espaces nus ou de végétation sont composés à 50% de jardins et parcs et à 50% d'arbres à feuilles caduques.

Ces deux types de végétation se distinguent dans notre cas uniquement par l'épaisseur des trois couches. Le reste des critères est identique.

Annexe 11 Calcul du flux de chaleur dû au trafic pour Paris

Notre calcul des flux de chaleur sensible et latente dus au trafic pour Paris s'appuie sur la méthode développée par Sailor et Lu (2004).

Sailor et Lu (2004) proposent dans leur article une évaluation horaire du flux de chaleur lié au trafic par le biais de l'équation suivante :

$$Q_v(h) = pcDVD \cdot F_t(h) \cdot \rho_{pop}(h) \cdot EV \quad (\text{J.km}^{-2}) \quad (\text{Formule 65})$$

Où F_t correspond au profil horaire du trafic (c'est-à-dire la part du trafic pour chaque heure par rapport au trafic de la journée entière. Il est sans dimension), pcDVD le « *Per capita daily vehicle distance* » (c'est-à-dire le nombre de kilomètre parcourue en moyenne par une personne par jour) (km.personne⁻¹), $\rho_{pop}(h)$ la densité horaire de population (personne.km⁻²) et EV l'énergie rejeté par véhicule par kilomètre parcouru et donné par :

$$EV = \frac{NHC \cdot \rho_{fuel}}{FE} \quad (\text{J.km}^{-1}) \quad (\text{Formule 66})$$

Avec NHC la chaleur nette de combustion de l'essence (J.kg⁻¹), ρ_{fuel} est la densité du combustible (kg.l⁻¹) et FE est la consommation moyenne de combustible (km.l⁻¹)²⁰⁷.

Pour avoir la valeur pour une journée du flux de chaleur lié au trafic, l'équation se transforme :

$$Q_v(jour) = pcDVD \cdot F_t(jour) \cdot \rho_{pop}(jour) \cdot EV \quad (\text{J.km}^{-2}) \quad (\text{Formule 67})$$

Où F_t correspond au trafic de la journée entière, pcDVD le « *Per capita daily vehicle distance* » (c'est-à-dire le nombre de kilomètre parcourue en moyenne par une personne par jour) (km.personne⁻¹), $\rho_{pop}(jour)$ la densité de population (personne.km⁻²) pour une journée et EV l'énergie rejeté par véhicule par kilomètre parcouru.

²⁰⁷ "If one assumes a mean fuel economy of 8.5km^l (≈20 miles gal⁻¹), typical heat of combustion of 45*10⁶J.kg⁻¹, and a nominal fuel density of 0.75 kg l⁻¹, EV takes on a value of 3975 Jm⁻¹ of vehicle travel." (SAILOR et LU, 2004)

Il est possible de simplifier l'équation et le flux de chaleur lié au trafic au sein d'une ville se calcule de la façon suivante :

$$Q_v(\text{jour})(\text{ville}) = \frac{DVD}{\text{Surface de la ville}} \times EV \quad (\text{J.km}^{-2}) \quad (\text{Formule 68})$$

Où DVD est le « *daily vehicle distance* » (c'est-à-dire le nombre de kilomètre parcouru en moyenne par jour) (km), EV l'énergie rejetée par véhicule par kilomètre parcouru (J.km^{-1}). La surface s'exprime en km^2 .

Tableau A 12 : Les déplacements motorisés dans Paris, par mode, en 2000 (Prud'Homme *et al.*, 2005).

| | Millions de passagers.km/jour | % |
|---|-------------------------------|--------------|
| En site propre : | | |
| Métro | 17,71 ^a | 29,0 |
| RER RATP (Lignes A et B) | 6,04 ^b | 9,9 |
| SNCF (trains, autres RER) | 8,18 ^c | 13,4 |
| Total, déplacements en site propres | 31,93 | 52,3 |
| Sur le réseau viaire : | | |
| Autobus | 2,67 ^d | 4,4 |
| Voitures particulières | 19,37 ^e | 31,8 |
| VP sur périphérique | 5,33 ^f | 9,1 |
| Taxis | 0,56 ^f | 0,9 |
| Motos | 1,12 ^g | 1,8 |
| Total, déplacements sur réseau viaires | 29,04 | 47,6 |
| Total général | 60,97 | 100,0 |
| Sources et notes : ^a 1283 (voyages par an en millions) x 0,95 (pourcentage des voyages effectués dans Paris) x 4,8 (distance moyenne, en km) / 321 (jours par an) ; ^b 404 (voyages par an, en millions) x 0,8 (pourcentage des voyages intéressant Paris) x 6 (distance moyenne, en km) / 321 (jours par an) ; ^c 547 (voyages par an, en millions) x 0,8 (pourcentage des voyages intéressant Paris) x 6 (distance moyenne, en km) / 321 (jours par an) ; ^d 357 (voyages, en millions) x 2,4 (distance moyenne) / 321 (jours par an) ; ^e 2143 (nombre de véhicules par km par heure sur réseau instrumenté) x 190 (longueur du réseau instrumenté en km) x 14 (heures entre 7h et 21h) x (1,25 (pour inclure la circulation entre 21h et 7h) x 2,5 (pour tenir compte du trafic hors réseau instrumenté) x 0,87 (pour tenir compte du fait que 2% des véhicules sont des taxis, 7% des véhicules utilitaires et 4% des motos) x 1,25 (passagers par véhicule) ; ^f 6162 (nombre de véhicules par km par heure par sens) x 70 (longueur des voies du périphérique en km) x 14 x 1,25 x 0,87 (cf supra) x 0,65 (part du trafic intéressant Paris x 1,25 (passagers par véhicule) ; ^f Chiffre voitures x 2/87 (trafic taxis par rapport au trafic voitures) ; ^g chiffre voitures x 4/87 (trafic motos/voitures) | | |

Un article de Prud'Homme *et al.* (2005) présente le tableau A 12 sur les déplacements motorisés dans Paris et les méthodes de calcul utilisées. Ces dernières permettent de faire ressortir le nombre de km parcouru en voitures particulières, taxis, motos, etc. par jour en

divisant les millions de passagers.km/jour par le nombre de passagers moyens des véhicules (tableau A 13).

Un autre tableau sur l'offre de transports en commun à Paris (Prud'Homme *et al.*, 2005) donne également les kilomètres*voitures par an des autobus à Paris qui sont de 42,6 millions en 2000 et de 43,6 en 2004. Ces données, ainsi que celle du tableau A 12, permettent d'estimer les kilomètres parcourus à Paris par les différents modes de transports en surface (tableau A 13).

Tableau A 13 : Les déplacements sur le réseau viaire dans Paris, en 2000 (D'après les données de Prud'Homme *et al.* (2005)).

| | M. passagers.km/jour | M. km/jour | Part relative en fonction des voitures |
|------------------------|----------------------|------------|--|
| Autobus | 2,67 | 0,12 | 0,0059 |
| Voitures particulières | 19,37 | 15,50 | 1 |
| VP sur périphérique | 5,33 | 4,27 | |
| Taxis | 0,56 | 0,45 | |
| Motos | 1,12 | 1,12 | 0,0554 |

Ce tableau ne tient pas compte des transports de marchandises qui représentent cependant une part non négligeable des kilomètres parcourus.

Selon l'ADEME, en ville les véhicules dédiés au transport de marchandises représentent environ 30% de l'ensemble des véhicules circulant sur la voirie (transports en commun, voitures particulières, deux roues), et malgré leur nombre moins important, ces véhicules utilitaires représentent près de la moitié du gasoil consommé en ville.

Pour Routhier (2002), « *en première approximation [...] la part du trafic de véhicules dédiés au TMV [transport de marchandises en ville] dans la mobilité motorisée globale (transit non compris) s'élève sur un jour ordinaire, selon les villes à :*

- 9% à 15% des déplacements de véhicules réalisés dans l'agglomération,
- 13% à 20% des véhicules*km parcourus suivant la taille et la géographie de l'agglomération,

- 15 à 25% des véhicules*km EVP²⁰⁸ parcourus, c'est-à-dire en tenant compte de l'encombrement au sol des différents types de véhicules. »

Les chiffres de l'étude de Hugrel et Joumard (2004) permettent d'estimer pour le parc roulant urbain en France la part kilométrique dévouée aux différents types de véhicules (tableau A 14), et confirme les ordres de grandeur de Routhier (2002).

Tableau A 14 : Part de différents types de véhicules dans le parc roulant urbain (d'après Hugrel et Joumard (2004)).

| Type de véhicules | Part kilométrique dans le parc roulant urbain | | Part relative en fonction des voitures |
|--------------------------------------|---|-------|--|
| Voiture particulière Essence | 0,359 | 0,782 | 1 |
| Voiture particulière Diesel | 0,423 | | |
| Véhicule utilitaire léger Essence | 0,003 | 0,184 | 0,2353 |
| Véhicule utilitaire léger Diesel | 0,125 | | |
| Poids lourds marchandise | 0,056 | | |
| Poids lourds voyageur | 0,006 | 0,006 | 0,0077 |
| Cyclomoteurs | 0,014 | 0,028 | 0,0358 |
| Motocyclettes | 0,014 | | |

A partir des chiffres connus pour la ville de Paris et des données de Hugrel et Joumard (2004), il est possible de proposer la répartition et les kilométrages pour les différentes catégories de véhicules (tableau A 15).

Tableau A 15 : Répartition et kilométrages parcourus pour les différentes catégories de véhicules durant une journée sur le territoire de la Ville de Paris.

| | M. km/jour | Fraction |
|---|------------|----------|
| Autobus | 0,12 | 0,005 |
| Voitures particulières et taxis Essence | 9,281 | 0,354 |
| Voitures particulières et taxis Diesel | 10,939 | 0,417 |
| Véhicule utilitaire léger Essence | 0,078 | 0,003 |
| Véhicule utilitaire léger Diesel | 3,232 | 0,123 |
| Poids lourds marchandise (Diesel) | 1,448 | 0,055 |
| Motos (essence) | 1,12 | 0,043 |

Intéressons-nous maintenant à EV, l'énergie rejetée par véhicule par kilomètre parcouru :

$$EV = \frac{NHC \cdot \rho_{fuel}}{FE} \quad (\text{J.km}^{-1}) \quad (\text{Formule 66})$$

²⁰⁸ Km EVP : kilomètres par équivalent voiture particulière : unité de mesure de l'occupation de la voirie par le trafic, un véhicule utilitaire léger < 3,5T de PTAC représente 1,5 EVP, un camion porteur représente 2 EVP, un camion articulé 2,5 EVP.

Avec NHC la chaleur nette de combustion de l'essence (J.kg^{-1}), ρ_{fuel} est la densité du combustible (kg.l^{-1}) et FE est la consommation moyenne de combustible (km.l^{-1})

Cette énergie, EV, correspond à l'énergie thermique (E_{th}) produite par la combustion du carburant par kilomètre parcouru. Il est nécessaire dans notre cas de distinguer l'essence et le diesel.

La densité de l'essence est de $0,755 \text{ g.cm}^{-3}$ (soit $0,755 \text{ kg.l}^{-1}$) et la densité du gazole (diesel) est de $0,845 \text{ g.cm}^{-3}$ (soit $0,845 \text{ kg.l}^{-1}$) (ENCARTA). Pour l'essence le pouvoir calorifique (quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité de combustible considéré) massique est de $42\,700 \text{ kJ.kg}^{-1}$, et pour le diesel de $42\,600 \text{ kJ.kg}^{-1}$ (Guibet, 1998).

Selon le bilan des déplacements de 2006 de la Ville de Paris, la vitesse moyenne sur le réseau instrumenté de Paris est de $15,9 \text{ km/h}$. Pour le boulevard périphérique la vitesse moyenne est supérieure et a oscillé en 2006 entre $29,8 \text{ km/h}$ et $51,2 \text{ km/h}$ selon les heures de la journée. Les chiffres hors périphérique sont donc proches de la moyenne utilisée par Hugrel et Joumard (2004) qui est de $18,7 \text{ km/h}$. Ces derniers ont également estimé, dans leur étude sur les véhicules en France, la consommation des carburants pour les cycles urbains en y intégrant entre autres la surconsommation due à la climatisation ($3,11/100 \text{ km}$ pour les voitures essence en cycle urbain et $3,2/100 \text{ km}$ pour les voitures diesel).

En ce qui concerne les bus, l'union des Transports Publics et ferroviaires (UTP) (2007) estime à 4064 le nombre de bus de la RATP dont 3502 en bus standard, 435 en bus articulé, 59 en midibus et 68 en minibus. Le parc des autobus de la RATP fonctionne avec des technologies et des filières énergétiques très différentes : Gazole (506 bus soit 12,5% du parc), gazole plus filtre à particules (FAP) (3 017 bus soit 74,2% du parc), diester plus filtre à particule (72 bus soit 1,8% du parc), émulsion Eau-Gazole (310 bus soit 7,6% du parc), GNV (90 bus soit 2,2% du parc), GPL (57 bus soit 1,4% du parc) ou encore électrique (12 soit 0,3% du parc) (UTP, 2007). Pour simplifier les calculs, nous retiendrons uniquement les 86,7% du parc de bus fonctionnant avec un moteur gazole.

Tableau A 16 : Consommation de carburant en circulation urbaine et énergie rejetée par véhicule par kilomètre parcouru.

| | Consommation de carburant en circulation urbaine (18,7 km/h) en g/km (Hugrel et Joumard, 2004) | Consommation de carburant en circulation urbaine (18,7 km/h) en l/100km | Energie rejetée par véhicule par kilomètre parcouru (EV) (J.m ⁻¹) |
|--|--|---|---|
| Autobus (86,7% du parc fonctionnant au diesel) | 389,915 | 46,14 | 16 610,4 |
| Voitures particulières et taxis Essence | 105,336 | 13,95 | 4 497,8 |
| Voitures particulières et taxis Diesel | 76,723 | 9,08 | 3 268,4 |
| Véhicule utilitaire léger Essence | 186,525 | 24,71 | 7 964,6 |
| Véhicule utilitaire léger Diesel | 113,247 | 13,40 | 4 824,3 |
| Poids lourds marchandise (Diesel) | 376,323 | 44,54 | 16 031,4 |
| Motos (essence) | 27,946 | 3,70 | 1 193,3 |

La valeur moyenne pour les voitures particulières et taxis, en tenant compte des proportions (45,9% de voitures essence et 54,1% de voitures diesel), est de 3 832,7 J.m⁻¹. Ce chiffre est proche de celui proposé par Pigeon *et al.* (2007) qui est de 3 902 J.m⁻¹ et celui proposé par Sailor et Lu (2004) qui est de 3 975 J.m⁻¹.

Les différentes valeurs calculées précédemment nous permettent désormais d'approcher le flux de chaleur sensible lié au trafic de véhicules au sein de la ville de Paris (tableau A 17) :

$$Q_v(jour)(Paris) = \sum_{véhicules} \frac{DVD}{Surface\ de\ Paris} \times EV \quad (\text{J.km}^{-2}) \quad (\text{Formule 69})$$

Où DVD est donc le « *daily vehicle distance* » (c'est-à-dire le nombre de kilomètre parcouru en moyenne par jour) (km.jour⁻¹), EV l'énergie rejetée par véhicule par kilomètre parcouru (J.km⁻¹) et la surface s'exprime en km².

Nous rappelons ici que la surface de Paris est d'environ 87 km² sans les bois et de 105 km² en y intégrant les bois de Boulogne et Vincennes.

Tableau A 17 : Energie rejetée par véhicule par km parcouru et flux de chaleur rejetée.

| | | Energie rejetée par véhicule par km parcouru (EV) (J.m ⁻¹) | Nb de km parcourus en moyenne par jour (DVD) (M. km/jour) | Q _v (jour)(Paris) (10 ³ J.m ⁻²) | Flux de chaleur Q (W.m ⁻²) |
|---|--|--|---|---|--|
| Paris, Bois de Boulogne et de Vincennes non compris (87 km ²) | Autobus (86,7% du parc fonctionnant au diesel) | 16 610,4 | 0,104 (0,12*0.867) | 19,856 | |
| | Voitures particulières et taxis Essence | 4 497,8 | 9,281 | 479,817 | |
| | Voitures particulières et taxis Diesel | 3 268,4 | 10,939 | 410,954 | |
| | Véhicule utilitaire léger Essence | 7 964,6 | 0,078 | 7,141 | |
| | Véhicule utilitaire léger Diesel | 4 824,3 | 3,232 | 179,220 | |
| | Poids lourds marchandise (Diesel) | 16 031,4 | 1,448 | 266,821 | |
| | Motos (essence) | 1 193,3 | 1,12 | 15,362 | |
| | TOTAL | | | 1379,171 | 15,96 |
| Paris, Bois de Boulogne et de Vincennes compris (105 km ²) | Autobus (86,7% du parc fonctionnant au diesel) | 16 610,4 | | 16,452 | |
| | Voitures particulières et taxis Essence | 4 497,8 | | 397,563 | |
| | Voitures particulières et taxis Diesel | 3 268,4 | | 340,505 | |
| | Véhicule utilitaire léger Essence | 7 964,6 | | 5,917 | |
| | Véhicule utilitaire léger Diesel | 4 824,3 | | 148,497 | |
| | Poids lourds marchandise (Diesel) | 16 031,4 | | 221,081 | |
| | Motos (essence) | 1 193,3 | | 12,729 | |
| | TOTAL | | | 1142,742 | 13,23 |

Annexe 12 Paramètres de SURFEX modifiés pour chacune des modélisations réalisées

Etude de sensibilité du bilan d'énergie : variation simple des paramètres de SURFEX

Tableau A 18 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la fraction de végétation.

| Paramètres | Extrême inférieur (Exp 1.1) | Diminution modéré (Exp 1.2) | Paris | Augmentation modérée (Exp 1.3) | Augmentation importante (Exp 1.4) | Extrême supérieur (Exp1.5) |
|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| Fraction de villes (TEB) | 0,97 | 0,88 | 0,80 | 0,71 | 0,63 | 0,47 |
| Fraction de sol nu/végétation (ISBA) | 0 | 0,09 (-50%) | 0,17 | 0,26 (+50%) | 0,34 (+100%) | 0,50 |
| Fraction de lacs | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |

Tableau A 19 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la fraction d'eau.

| Paramètres | (Extrême inférieur (Exp 2.1) | Diminution modérée (Exp 2.2) | Paris | Augmentation modérée (Exp 2.3) | Augmentation importante (Exp 2.4) | Extrême supérieur (Exp 2.5) |
|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Fraction de villes (TEB) | 0,83 | 0,82 | 0,80 | 0,77 | 0,71 | 0,63 |
| Fraction de sol nu/végétation (ISBA) | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |
| Fraction de lacs | 0 | 0,01 | 0,03 | 0,06 (+100%) | 0,12 (+200%) | 0,2 |

Tableau A 20 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la largeur des rues.

| Paramètres | Extrême inférieur (Exp 3.1) | Paris | Augmentation modérée (Exp 3.2) | Augmentation importante (Exp 3.3) | Extrême supérieur (Exp 3.4) |
|------------------------------------|-----------------------------|-------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Largeur moyenne des rues (m) | 10 | 15 | 30 | 45 | 60 |
| Prospect du canyon (H/W) | 3 | 2 | 1 | 0,67 | 0,50 |
| Fraction occupée par les bâtiments | 0,60 | 0,50 | 0,33 | 0,25 | 0,20 |
| Facteur de forme du bâti | 2,4 | 2 | 1,33 | 1 | 0,80 |

Tableau A 21 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la hauteur des bâtiments.

| Paramètres | Extrême inférieur (Exp 4.1) | Diminution modérée (Exp 4.2) | Paris | Augmentation modérée (Exp 4.3) | Augmentation importante (Exp 4.4) | Extrême supérieur (Exp 4.5) |
|--|-----------------------------|------------------------------|-------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Hauteur des bâtiments (m) | 5 | 15 | 30 | 45 | 60 | 100 |
| Prospect du canyon (H/W) | 0,33 | 1 | 2 | 3 | 4 | 6,67 |
| longueur de rugosité dynamique du couvert urbain (m) | 0,5 | 1,5 | 3 | 4,5 | 5 | 5 |
| Facteur de forme du bâti | 0,33 | 1 | 2 | 3 | 4 | 6,67 |

Tableau A 22 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la profondeur des bâtiments.

| Paramètres | Extrême inférieur (Exp 5.1) | Paris | Augmentation modérée (Exp 5.2) | Augmentation importante (Exp 5.3) | Extrême supérieur (Exp 5.4) |
|------------------------------------|-----------------------------|-------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Profondeur des bâtiments (m) | 10 | 15 | 30 (+15 m) | 45 (+30 m) | 60 |
| Fraction occupée par les bâtiments | 0,4 | 0,5 | 0,67 | 0,75 | 0,8 |
| Facteur de forme du bâti | 2,4 | 2 | 1,33 | 1 | 0,8 |

Tableau A 23 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'isolation des toits.

| Paramètres | Extrême inférieur (Exp 6.1) | Diminution modérée (Exp 6.2) | Paris | Augmentation modérée (Exp 6.3) | Augmentation importante (Exp 6.4) | Extrême supérieur (Exp 6.5) |
|--|--|--|--|--|--|--|
| Conductivité thermique des i couches de toit (de l'extérieur vers l'intérieur) - λ_t ($W.m^{-1}.K^{-1}$) | 110 (zinc), 0.18 (bois), 0,18 (bois) | 110 (zinc), 0.18 (bois), 0.09 | 110 (zinc), 0.18 (bois), 0.04 (isolation) | 110 (zinc), 0.18 (bois), 0.04 (isolation) | 110 (zinc), 0.18 (bois), 0.03 (isolation) | 110 (zinc), 0.18 (bois), 0.02 (isolation) |
| Résistance thermique du toit ($K.m^2.W^{-1}$) | 0,28 | 1,39 ($\div 2$) | 2,78 | 5,28 ($\approx x2$) | 6,94 ($\approx x2,5$) | 10,28 ($\approx x3,5$) |
| Epaisseur des n couches de toit - dt_i (m) | 0.0007, 0.01, 0.01 | 0.0007, 0.02, 0.1 | 0.0007, 0.02, 0.1 | 0.0007, 0.02, 0.2 | 0.0007, 0.02, 0.2 | 0.0007, 0.02, 0.2 |
| Epaisseur totale du toit (m) | 0,0207 | 0,1207 | 0,1207 | 0,2207 | 0,2207 | 0,2207 |
| capacité thermique des i couches de toit (de l'extérieur vers l'intérieur) - Ct_i ($J.m^{-3}.K^{-1}$) | 2,74 10^6 (zinc), 1.12 10^6 (bois), 1.12 10^6 (bois) | 2,74 10^6 (zinc), 1.12 10^6 (bois), 0.1 10^6 | 2,74 10^6 (zinc), 1.12 10^6 (bois), 0.1 10^6 (isolation) | 2,74 10^6 (zinc), 1.12 10^6 (bois), 0.1 10^6 (isolation) | 2,74 10^6 (zinc), 1.12 10^6 (bois), 0.1 10^6 (isolation) | 2,74 10^6 (zinc), 1.12 10^6 (bois), 0.1 10^6 (isolation) |

Tableau A 24 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des toits.

| Paramètres | Extrême inférieur (Exp 7.1) | Diminution modérée (Exp 7.2) | Paris | Augmentation modérée (Exp 7.3) | Augmentation importante (Exp 7.4) | Extrême supérieur (Exp 7.5) |
|---|---|---|--|--|--|--|
| capacité thermique des i couches de toit (de l'extérieur vers l'intérieur) - Ct_i ($J.m^{-3}.K^{-1}$) | 2,74 10^6 (zinc), 1.12 10^6 (bois), 0.01 10^6 | 2,74 10^6 (zinc), 1.12 10^6 (bois), 0.05 10^6 | 2,74 10^6 (zinc), 1.12 10^6 (bois), 0.1 10^6 (isolation) | 2,74 10^6 (zinc), 1.12 10^6 (bois), 1 10^6 | 2,74 10^6 (zinc), 1.12 10^6 (bois), 2 10^6 | 2,74 10^6 (zinc), 1.12 10^6 (bois), 5 10^6 |
| Epaisseur des n couches de toit - dt_i (m) | 0.0007, 0.02, 0.1 | 0.0007, 0.02, 0.1 | 0.0007, 0.02, 0.1 | 0.0007, 0.02, 0.1 | 0.0007, 0.02, 0.1 | 0.0007, 0.02, 0.1 |
| Epaisseur totale du toit (m) | 0,1207 | 0,1207 | 0,1207 | 0,1207 | 0,1207 | 0,1207 |

Tableau A 25 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'albédo des toits.

| Paramètres | Extrême inférieur (Exp 8.1) | Diminution modérée (Exp 8.2) | Paris | Augmentation modérée (Exp 8.3) | Augmentation importante (Exp 8.4) | Extrême supérieur (Exp 8.5) |
|------------------|-----------------------------|------------------------------|-------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Albédo des toits | 0,05 | 0,45 (-0,15) | 0,60 | 0,75 (+0,15) | 0,90 (+0,30) | 0,95 |

Tableau A 26 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité des toits.

| Paramètres | Extrême inférieur (Exp 9.1) | Paris | Augmentation modérée (Exp 9.2) | Augmentation importante (Exp 9.3) | Extrême supérieur (Exp 9.4) |
|----------------------|-----------------------------|-------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Emissivité des toits | 0,05 | 0,1 | 0,3 | 0,7 | 1 |

Tableau A 27 : Expérience avec des toits tous en tuile (données de G. Pigeon, CNRM) ou en toiture terrasse (découpage de l'APUR et valeurs issues de la norme NF EN ISO 10456).

| Paramètres | Paris (100% des toits en zinc) | 100% des toits en tuile | 100% des toits sont des toitures terrasses |
|--|--|--|--|
| Conductivité thermique des couches de toit (de l'extérieur vers l'intérieur) - λ_i ($W.m^{-1}.K^{-1}$) | 110 (zinc), 0.18 (bois), 0.04 (isolation) | 1.15 (tuile), 1.15 (tuile), 0.18 (bois), 0.04 (isolation) | 2.0 (gravier), 0.23 (papier goudronné), 0.04 (isolation), 0.23 (feutre), 1.35 (béton) |
| Résistance thermique du toit ($K.m^2.W^{-1}$) | 2,78 | 2,83 | 2,17 |
| Epaisseur des n couches de toit - dt_i (m) | 0.0007, 0.02, 0.1 | 0.01, 0.05, 0.02, 0.1 | 0.03, 0.01, 0.07, 0.01, 0.2 |
| capacité thermique des couches de toit (de l'extérieur vers l'intérieur) - Ct_i ($J.m^{-3}.K^{-1}$) | $2.74 \cdot 10^6$ (zinc), $1.12 \cdot 10^6$ (bois), $0.1 \cdot 10^6$ (isolation) | $1.58 \cdot 10^6$ (tuile), $1.58 \cdot 10^6$ (tuile), $1.12 \cdot 10^6$ (bois), $0.1 \cdot 10^6$ (isolation) | $2.0 \cdot 10^6$ (gravier), $1.1 \cdot 10^6$ (papier goudronné), $0.1 \cdot 10^6$ (isolation), $1.1 \cdot 10^6$ (feutre), $2.0 \cdot 10^6$ (béton) |
| Albédo des toits | 0,60 | 0,15 | 0,25 |
| Emissivité des toits | 0,10 | 0,90 | 0,90 |

Tableau A 28 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'isolation des murs.

| Paramètres | Paris | Augmentation modérée (Exp 10.1) | Augmentation importante (Exp 10.2) | Extrême supérieur (Exp 10.3) |
|---|--|---|---|---|
| Conductivité thermique des k couches des murs (de l'extérieur vers l'intérieur) - λ_{m_k} ($W.m^{-1}.K^{-1}$) | 1.35, 1.35, 1.35 | 1.35, 1.35, 1.35, 0.06 | 1.35, 1.35, 1.35, 0.03 (isolation) | 1.35, 1.35, 1.35, 0.02 (isolation) |
| Résistance thermique du mur ($K.m^2.W^{-1}$) | 0,37 | 2,04 ($\approx x5$) | 3,70 (x10) | 5,37 |
| Epaisseur des k couches des murs (m) - dm_k | 0.02, 0.2, 0.05 | 0.02, 0.2, 0.05, 0.1 | 0.02, 0.2, 0.05, 0.1 | 0.02, 0.2, 0.05, 0.1 |
| Epaisseur totale du mur (m) | 0.27 | 0.37 | 0.37 | 0.37 |
| Capacité thermique des k couches des murs (de l'extérieur vers l'intérieur) ($J.m^{-3}.K^{-1}$) - Cm_k | $2 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^6$ | $2 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^6$, $0.1 \cdot 10^6$ (isolation) | $2 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^6$, $0.1 \cdot 10^6$ (isolation) | $2 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^6$, $0.1 \cdot 10^6$ (isolation) |

Tableau A 29 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des murs.

| Paramètres | Extrême inférieur (Exp 11.1) | Diminution modérée (Exp 11.2) | Paris | Augmentation modérée (Exp 11.3) | Augmentation importante (Exp 11.4) | Extrême supérieur (Exp 11.5) |
|--|---|--|--|--|--|--|
| Capacité thermique des k couches des murs (de l'extérieur vers l'intérieur) ($J.m^{-3}.K^{-1}$) - Cm_k | $2 \cdot 10^6$, $0.01 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^6$ | $2 \cdot 10^6$, $1 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^6$ | $2 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^6$ | $2 \cdot 10^6$, $3 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^6$ | $2 \cdot 10^6$, $4 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^6$ | $2 \cdot 10^6$, $5 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^6$ |
| Epaisseur des k couches des murs - dm_k | 0.02, 0.2, 0.05 | 0.02, 0.2, 0.05 | 0.02, 0.2, 0.05 | 0.02, 0.2, 0.05 | 0.02, 0.2, 0.05 | 0.02, 0.2, 0.05 |
| Epaisseur totale du mur (m) | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.27 |

Tableau A 30 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'albédo des murs.

| Paramètres | Extrême inférieur (Exp 12.1) | Diminution modérée (Exp 12.2) | Paris | Augmentation modérée (Exp 12.3) | Augmentation importante (Exp 12.4) | Extrême supérieur (Exp 12.5) |
|-----------------|------------------------------|-------------------------------|-------|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Albédo des murs | 0,05 | 0,25 (-0,15) | 0,40 | 0,55 (+0,15) | 0,7 (+0,30) | 0,95 |

Tableau A 31 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité des murs.

| Paramètres | Extrême inférieur (Exp 13.1) | Diminution importante (Exp 13.2) | Diminution modérée (Exp 13.3) | Paris | Extrême supérieur (Exp 13.4) |
|---------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------|------------------------------|
| Emissivité des murs | 0,05 | 0,3 | 0,6 | 0,90 | 1 |

Tableau A 32 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des rues.

| Paramètres | Extrême inférieur ²⁰⁹ (Exp 14.1) | Diminution modérée (Exp 14.2) | Paris | Augmentation modérée (Exp 14.3) | Augmentation importante (Exp 14.4) | Extrême supérieur (Exp 14.5) |
|--|---|--|---|--|--|--|
| Capacité thermique des k couches des rues (de l'extérieur vers l'intérieur) ($J.m^{-3}.K^{-1}$) - Cr_k | 0.1 10^6 , 0.1 10^6 , 1.28 10^6 (sol sec) | 1 10^6 , 1 10^6 , 1 10^6 , 1.28 10^6 (sol sec) | 2 10^6 (béton bitumineux), 2 10^6 (béton bitumineux), 2 10^6 (béton), 1.28 10^6 (sol sec) | 3 10^6 , 3 10^6 , 3 10^6 , 1.28 10^6 (sol sec) | 4 10^6 , 4 10^6 , 4 10^6 , 1.28 10^6 (sol sec) | 5 10^6 , 5 10^6 , 5 10^6 , 1.28 10^6 (sol sec) |
| Epaisseur des k couches des rues - dr_k | 0.01, 0.03, 0.37, 1.0 | 0.01, 0.03, 0.37, 1.0 | 0.01, 0.03, 0.37, 1.0 | 0.01, 0.03, 0.37, 1.0 | 0.01, 0.03, 0.37, 1.0 | 0.01, 0.03, 0.37, 1.0 |

Tableau A 33 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'albédo des rues.

| Paramètres | Extrême inférieur (Exp 15.1) | Paris | Augmentation modérée (Exp 15.2) | Augmentation importante (Exp 15.3) | Extrême supérieur (Exp 15.4) |
|-----------------|------------------------------|-------|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Albédo des rues | 0,05 | 0,10 | 0,25 (+0,15) | 0,4 (+0,30) | 0,95 |

Tableau A 34 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité des rues.

| Paramètres | Extrême inférieur (Exp 16.1) | Diminution importante (Exp 16.2) | Diminution modérée (Exp 16.3) | Paris | Extrême supérieur (Exp 16.4) |
|---------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------|------------------------------|
| Emissivité des rues | 0,05 | 0,3 | 0,6 | 0,94 | 1 |

²⁰⁹ Des tests effectués à 0.01 10^6 ont montré une modélisation anormale avec des flux ayant un ordre de grandeur mille fois plus élevé que ceux observés d'où un chiffre plus élevé que pour les murs et les toits.

Tableau A 35 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie au flux de chaleur sensible dû au trafic.

| Paramètres | Extrême inférieur (Exp 17.1) | Diminution importante (Exp 17.2) | Diminution modérée (Exp 17.3) | Paris | Augmentation modérée (Exp 17.4) | Extrême supérieur (Exp 17.5) |
|--|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------|---------------------------------|------------------------------|
| Flux de chaleur sensible dû au trafic ($W.m^{-2}$) | 0 | 10 | 20 ($\approx -50\%$) | 37 | 55 ($+50\%$) | 100 |

Tableau A 36 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie au flux de chaleur latente dû au trafic.

| Paramètres | Extrême inférieur (Exp 18.1) | Diminution modérée (Exp 18.2) | Paris | Augmentation modérée (Exp 18.3) | Extrême supérieur (Exp 18.4) |
|---|------------------------------|-------------------------------|-------|---------------------------------|------------------------------|
| Flux de chaleur latente dû au trafic ($W.m^{-2}$) | 0 | 1,5 ($\approx -50\%$) | 3 | 5 ($\approx +50\%$) | 15 |

Tableau A 37 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie au flux de chaleur sensible d'origine industrielle.

| Paramètres | Paris | Augmentation modérée (Exp 19.1) | Extrême supérieur (Exp 19.2) |
|--|-------|---------------------------------|------------------------------|
| Flux de chaleur sensible d'origine industrielle ($W.m^{-2}$) | 0 | 20 | 40 |

Tableau A 38 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie au flux de chaleur latente d'origine industrielle.

| Paramètres | Paris | Augmentation modérée (Exp 20.1) | Extrême supérieur (Exp 20.2) |
|---|-------|---------------------------------|------------------------------|
| Flux de chaleur latente d'origine industrielle ($W.m^{-2}$) | 0 | 20 | 40 |

Etude de sensibilité du bilan d'énergie à la variation de multiples paramètres en relation avec les leviers d'action identifiés

Tableau A 39 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à différentes améliorations thermiques.

| Désignation | Paris | RT 2005 | Standard Minergie (SM) | Minergie P (MP) | Bâtiments clairs (BC) | Bâtiments très clairs (BTC) | Bâtiments Minergie P et très clairs (MP + BTC) | Unité |
|--|---|---|--|--|---|---|--|------------------------------------|
| Toit | | | | | | | | |
| nombre de couches pour le toit | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | - |
| albédo du toit - α_t | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0,75 | 0,85 | 0,85 | - |
| émissivité du toit - ε_t | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | - |
| capacité thermique des i couches de toit (de l'extérieur vers l'intérieur) - C_{t_i} | 2.74 10 ⁶ (zinc), 1.12 10 ⁶ (bois), 0.1 10 ⁶ (isolation) | 2.74 10 ⁶ (zinc), 1.12 10 ⁶ (bois), 32 400 (laine de roche – AGEDEN (2008)) | 2.74 10 ⁶ (zinc), 1.12 10 ⁶ (bois), 32 400 (laine de roche – AGEDEN (2008)) | 2.74 10 ⁶ (zinc), 1.12 10 ⁶ (bois), 0.06 10 ⁶ (mousse de poly-uréthane – AGEDEN (2008)) | 2.74 10 ⁶ (zinc), 1.12 10 ⁶ (bois), 0.1 10 ⁶ (isolation) | 2.74 10 ⁶ (zinc), 1.12 10 ⁶ (bois), 0.1 10 ⁶ (isolation) | 2.74 10 ⁶ (zinc), 1.12 10 ⁶ (bois), 0.06 10 ⁶ (mousse de poly-uréthane – AGEDEN (2008)) | J.m ⁻³ .K ⁻¹ |
| conductivité thermique des i couches de toit - λ_{t_i} | 110, 0.18, 0.04 | 110, 0.18, 0.044 | 110, 0.18, 0.044 | 110, 0.18, 0.032 | 110, 0.18, 0.04 | 110, 0.18, 0.04 | 110, 0.18, 0.032 | W.m ⁻¹ .K ⁻¹ |
| Résistance thermique totale du toit (Ri et Re inclus) | 2,78 | 3,92 | 5,05 | 8,41 | 2,78 | 2,78 | 8,41 | K.m ² .W ⁻¹ |
| épaisseur des n couches de toit - d_{t_i} | 0.0007, 0.02, 0.1 | 0.0007, 0.02, 0.16 | 0.0007, 0.02, 0.21 | 0.0007, 0.02, 0.26 | 0.0007, 0.02, 0.1 | 0.0007, 0.02, 0.1 | 0.0007, 0.02, 0.26 | m |
| Murs | | | | | | | | |
| nombre de couches pour les murs (k) | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | - |
| albédos des murs - α_m | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0,75 | 0,85 | 0,85 | - |
| émissivité des murs - ε_m | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | - |
| capacité thermique des k couches des murs - C_{m_k} | 2 10 ⁶ , 2 10 ⁶ , 2 10 ⁶ (béton) | 2 10 ⁶ , 2 10 ⁶ , 0.16 10 ⁶ (verre cellulaire – AGEDEN (2008)) | 2 10 ⁶ , 2 10 ⁶ , 0.06 10 ⁶ (mousse de poly-uréthane – AGEDEN (2008)) | 2 10 ⁶ , 2 10 ⁶ , 0.06 10 ⁶ (mousse de poly-uréthane – AGEDEN (2008)) | 2 10 ⁶ , 2 10 ⁶ , 2 10 ⁶ (béton) | 2 10 ⁶ , 2 10 ⁶ , 2 10 ⁶ (béton) | 2 10 ⁶ , 2 10 ⁶ , 0.06 10 ⁶ (mousse de poly-uréthane – AGEDEN (2008)) | J.m ⁻³ .K ⁻¹ |
| conductivité thermique des k couches des murs - λ_{m_k} | 1.35, 1.35, 1.35 | 1.35, 1.35, 0.057 | 1.35, 1.35, 0.032 | 1.35, 1.35, 0.032 | 1.35, 1.35, 1.35 | 1.35, 1.35, 1.35 | 1.35, 1.35, 0.032 | W.m ⁻¹ .K ⁻¹ |
| Résistance thermique totale du mur (Ri + Re inclus) | 0,37 | 1,21 | 1,90 | 3,15 | 0,37 | 0,37 | 3,15 | K.m ² .W ⁻¹ |
| épaisseur des k couches des murs - d_{m_k} | 0.02, 0.2, 0.05 | 0.02, 0.2, 0.05 | 0.02, 0.2, 0.05 | 0.02, 0.2, 0.09 | 0.02, 0.2, 0.05 | 0.02, 0.2, 0.05 | 0.02, 0.2, 0.09 | m |

Tableau A 40 : Simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à différentes orientations d'aménagement.

| Désignation | Paris | Vert et dense (VD) | Très vert et dense (TVD) | Très vert et dense avec une voirie claire (TVD_VC) | Unité | Symbole SURFEX |
|--|-------|--------------------|--------------------------|--|-------|------------------|
| COUVERTURE DU SOL | | | | | | |
| <i>Fraction de mers/océans</i> | 0 | 0 | 0 | 0 | - | XUNIF_SEA |
| Fraction de lacs | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | - | XUNIF_WATER |
| Fraction de villes (TEB) | 0,80 | 0,72 | 0,67 | 0,67 | - | XUNIF_TOWN |
| Fraction de sol nu/végétation (ISBA) | 0,17 | 0,25 | 0,30 | 0,30 | - | XUNIF_NATURE |
| STRUCTURE URBAINE ET TISSU CONSTRUCTIF | | | | | | |
| longueur de rugosité dynamique du couvert urbain - Z_{0ville} | 3 | 3,5 | 3,8 | 3,8 | m | XUNIF_Z0_TOWN |
| la fraction occupée par les bâtiments (= surface de toit/surface de toit et route) - $a_{bât}$ | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | - | XUNIF_BLD |
| la hauteur des bâtiments - $z_{bât}$ | 30 | 35 | 38 | 38 | m | XUNIF_BLD_HEIGHT |
| le facteur de forme du bâti (= surface des 2 murs/surface de route et toit = $2(z_{bât}/W)*(1-a_{bât})$) | 2 | 2,33 | 2,53 | 2,53 | - | XUNIF_WALL_O_HOR |
| PARAMETRES RADIATIFS ET THERMIQUES DES MATERIAUX URBAINS (TEB) | | | | | | |
| <i>Route</i> | | | | | | |
| albédo de la route - α_r | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,50 | - | XUNIF_ALB_ROAD |

Annexe 13 Courbes de résultats des simulations numériques effectuées les 30 janvier et 30 juin 2006

Les simulations numériques ont été effectuées avec SURFEX (TEB, ISBA et des modules d'eau et de mer) les 30 janvier et 30 juin 2006 dont les données climatiques sont les suivantes :

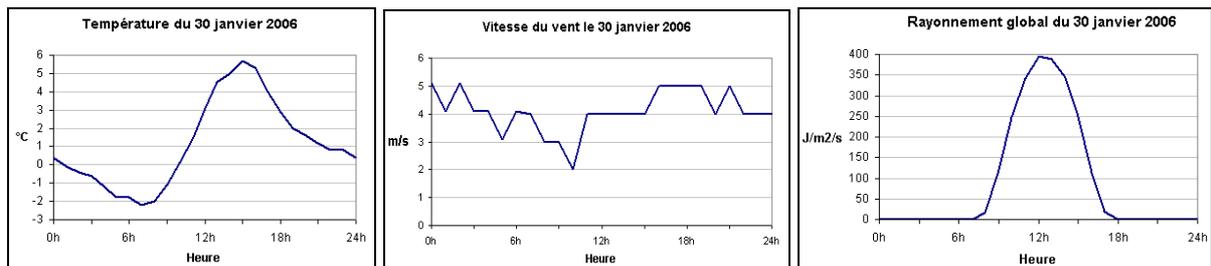


Figure A 44 : Température (°C), vent (m/s) et rayonnement solaire (J/m²/s) à la station Montsouris (Paris) le 30 janvier 2006.

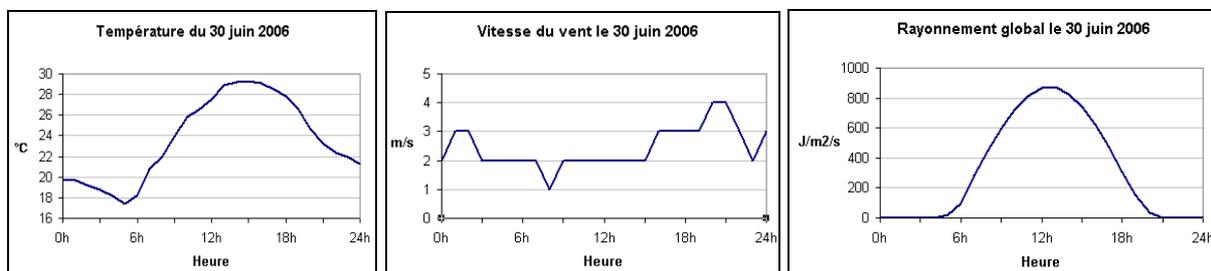


Figure A 45 : Température (°C), vent (m/s) et rayonnement solaire (J/m²/s) à la station Montsouris (Paris) le 30 juin 2006.

Résultats des simulations effectuées pour la journée du 30 janvier 2006

Tableau A 41 : Résultat de la simulation du bilan d'énergie pour Paris (janvier 2006).

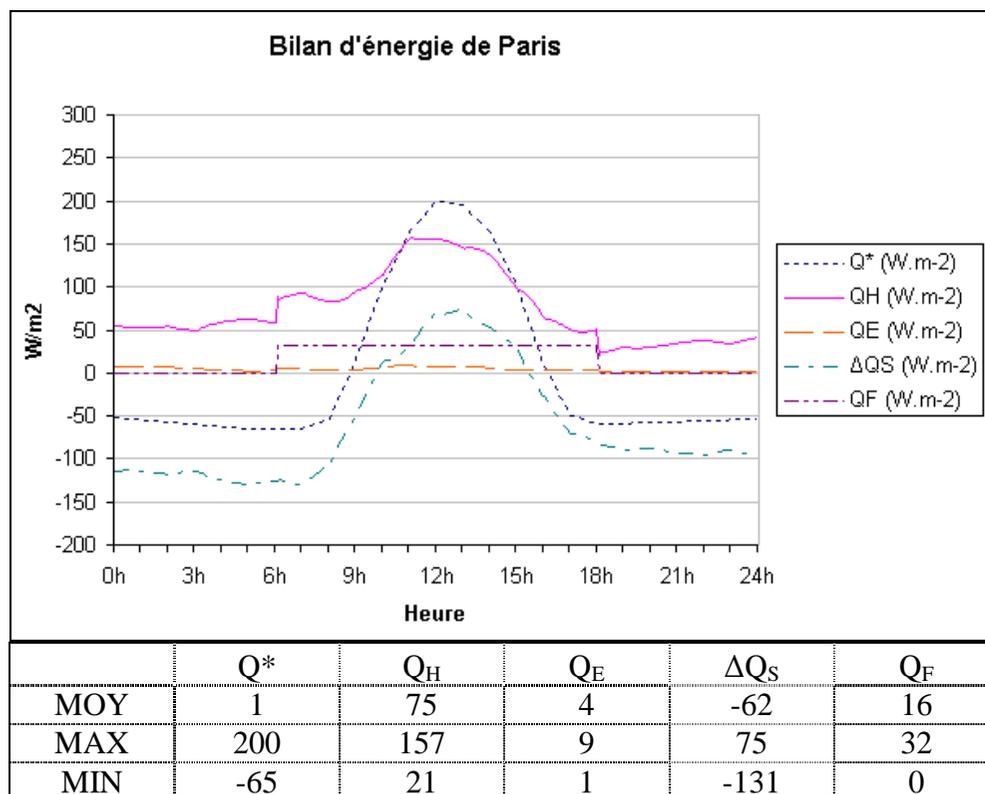


Tableau A 42 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la fraction de végétation (janvier 2006).

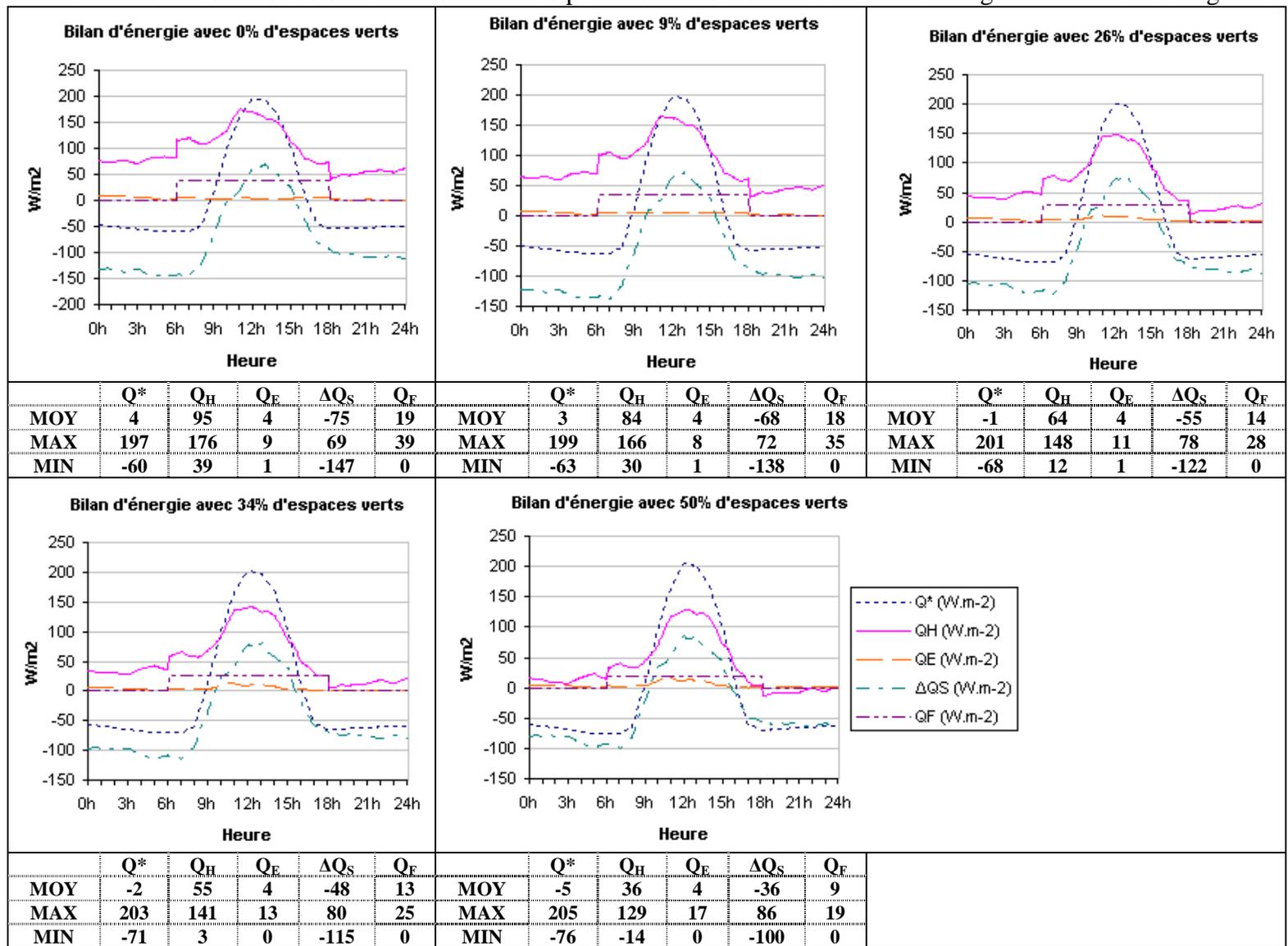


Tableau A 43 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la fraction d'eau (janvier 2006).

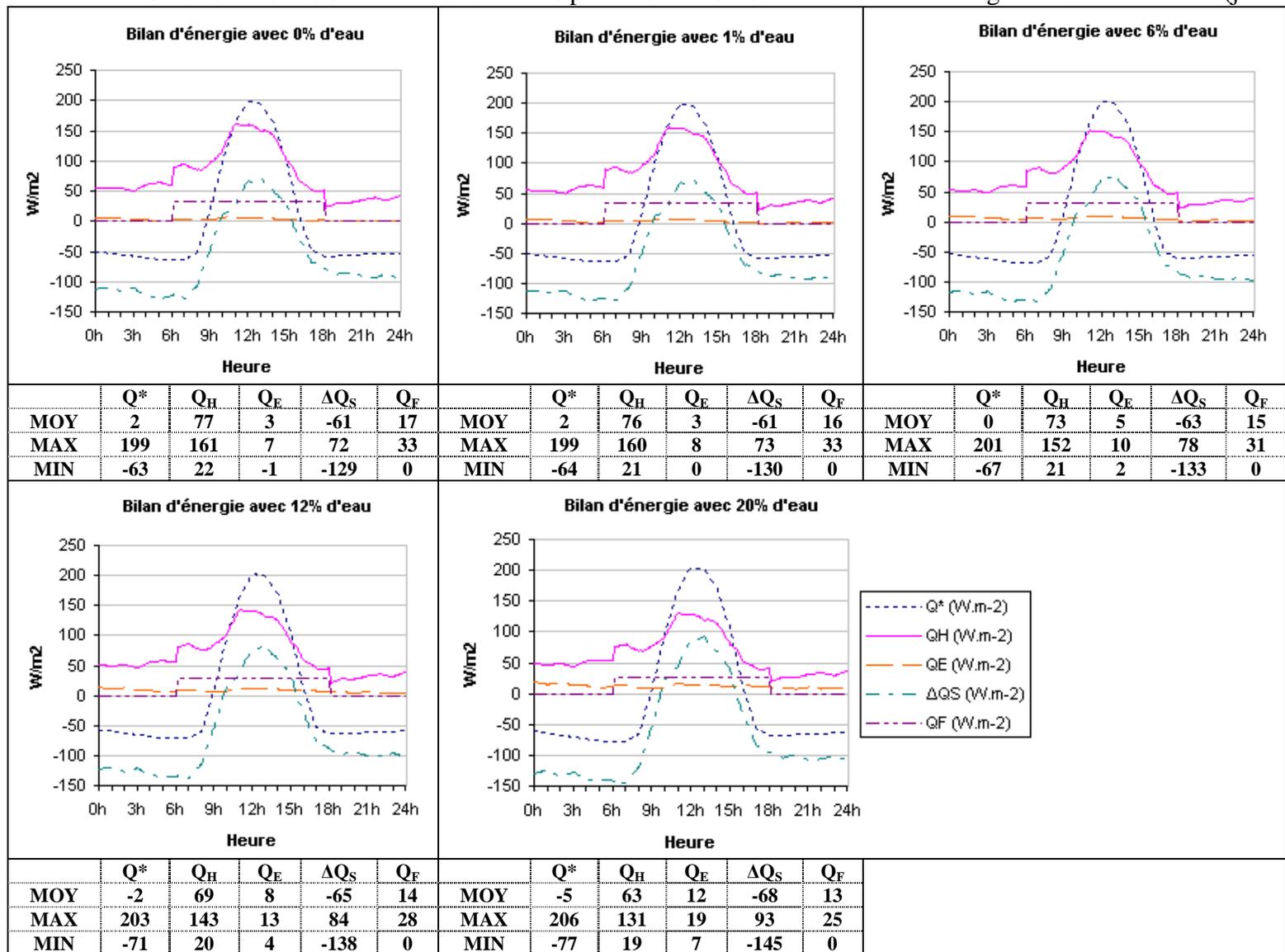


Tableau A 44 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la largeur des rues (janvier 2006).

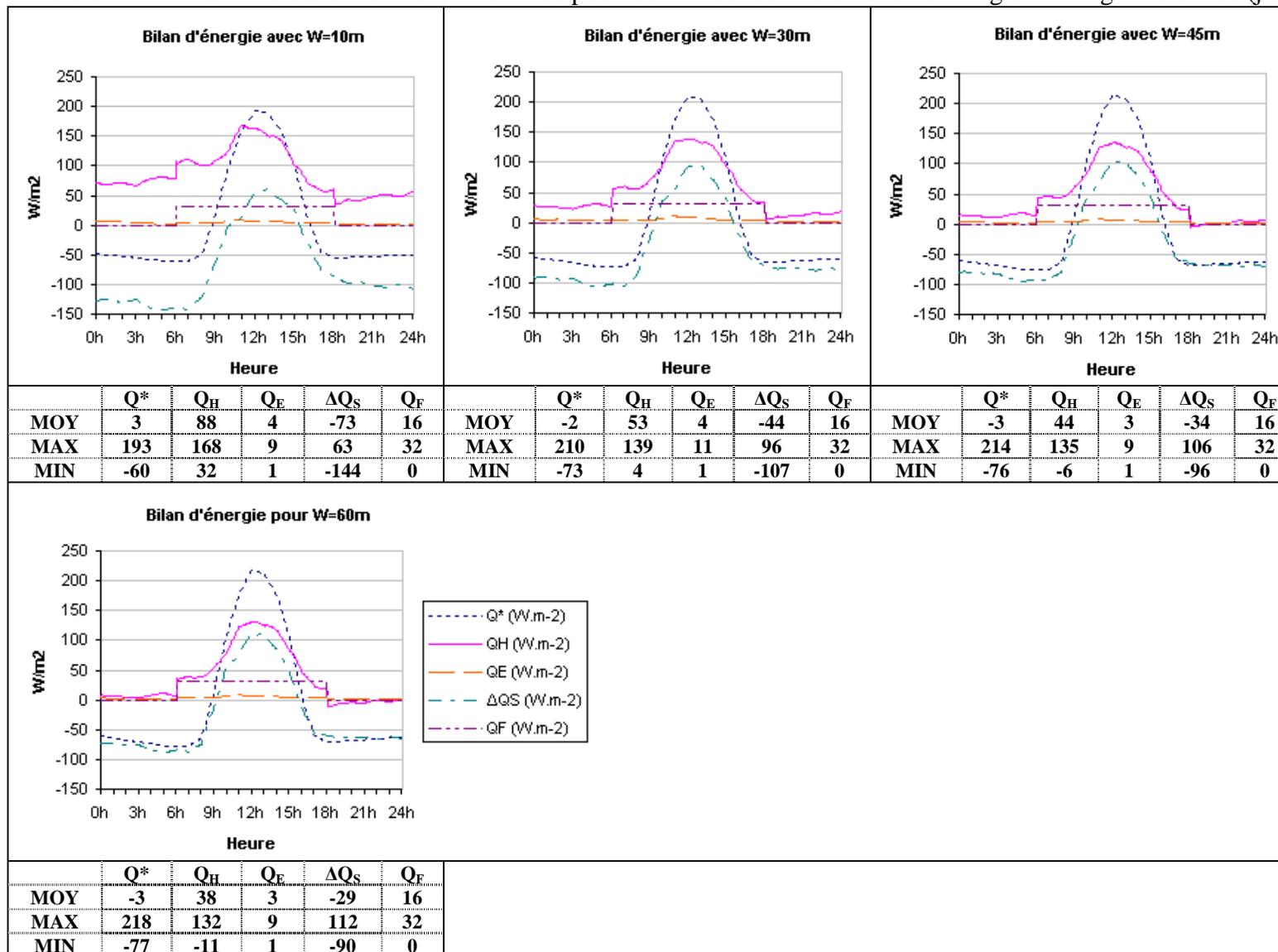


Tableau A 45 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la hauteur des bâtiments (janvier 2006).

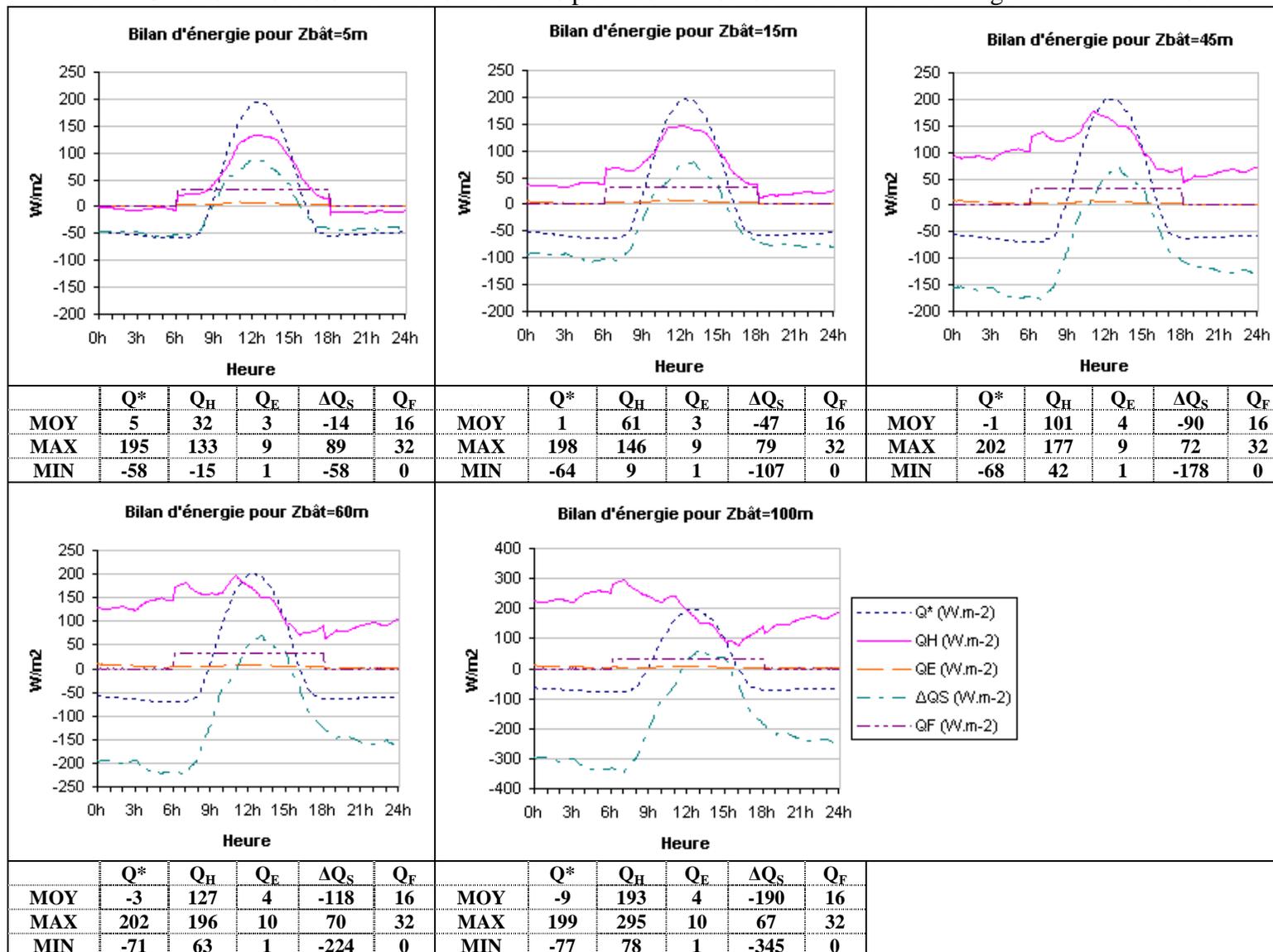


Tableau A 46 Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la profondeur des bâtiments (janvier 2006).

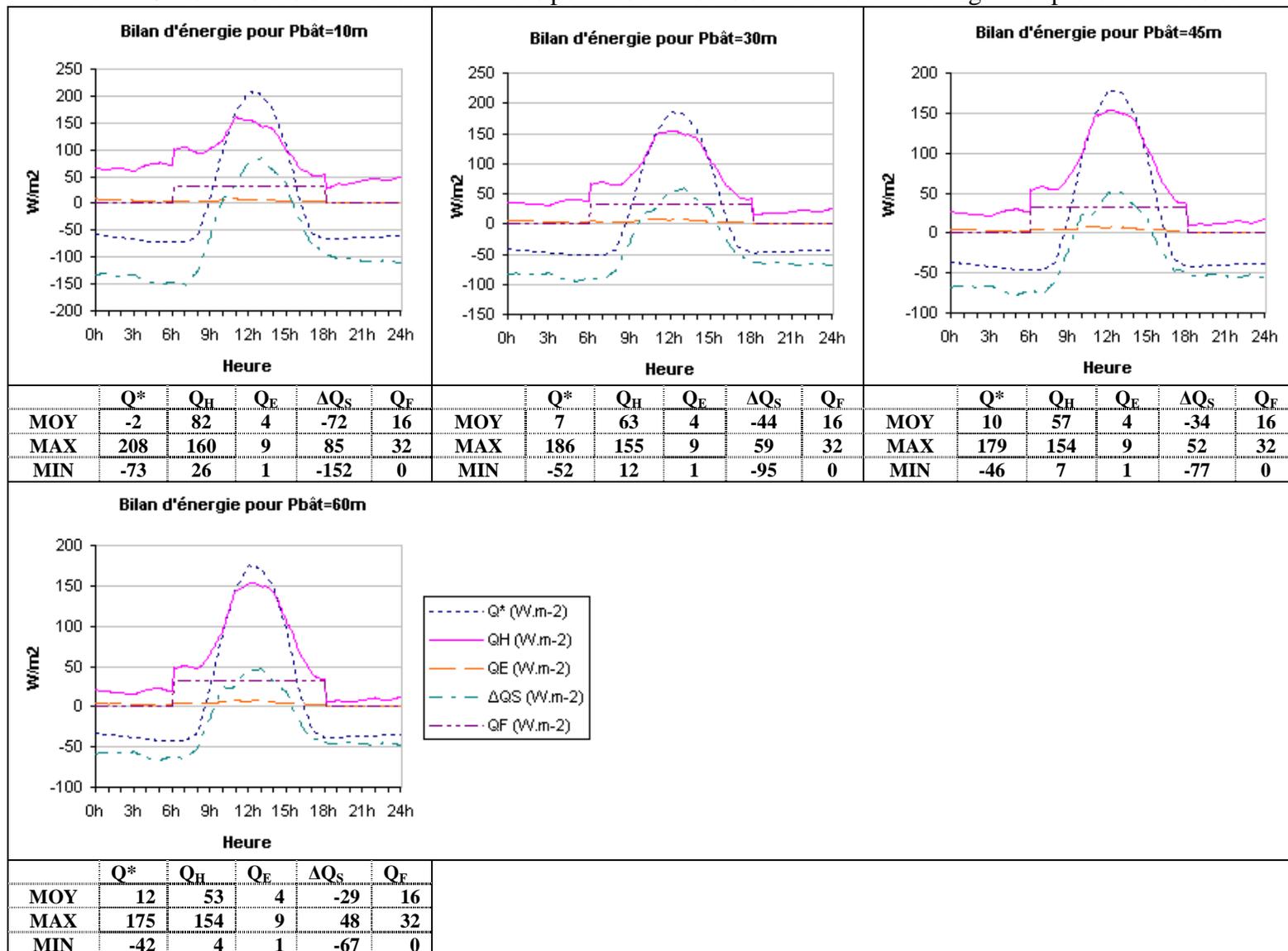


Tableau A 47 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'isolation des toits (janvier 2006).

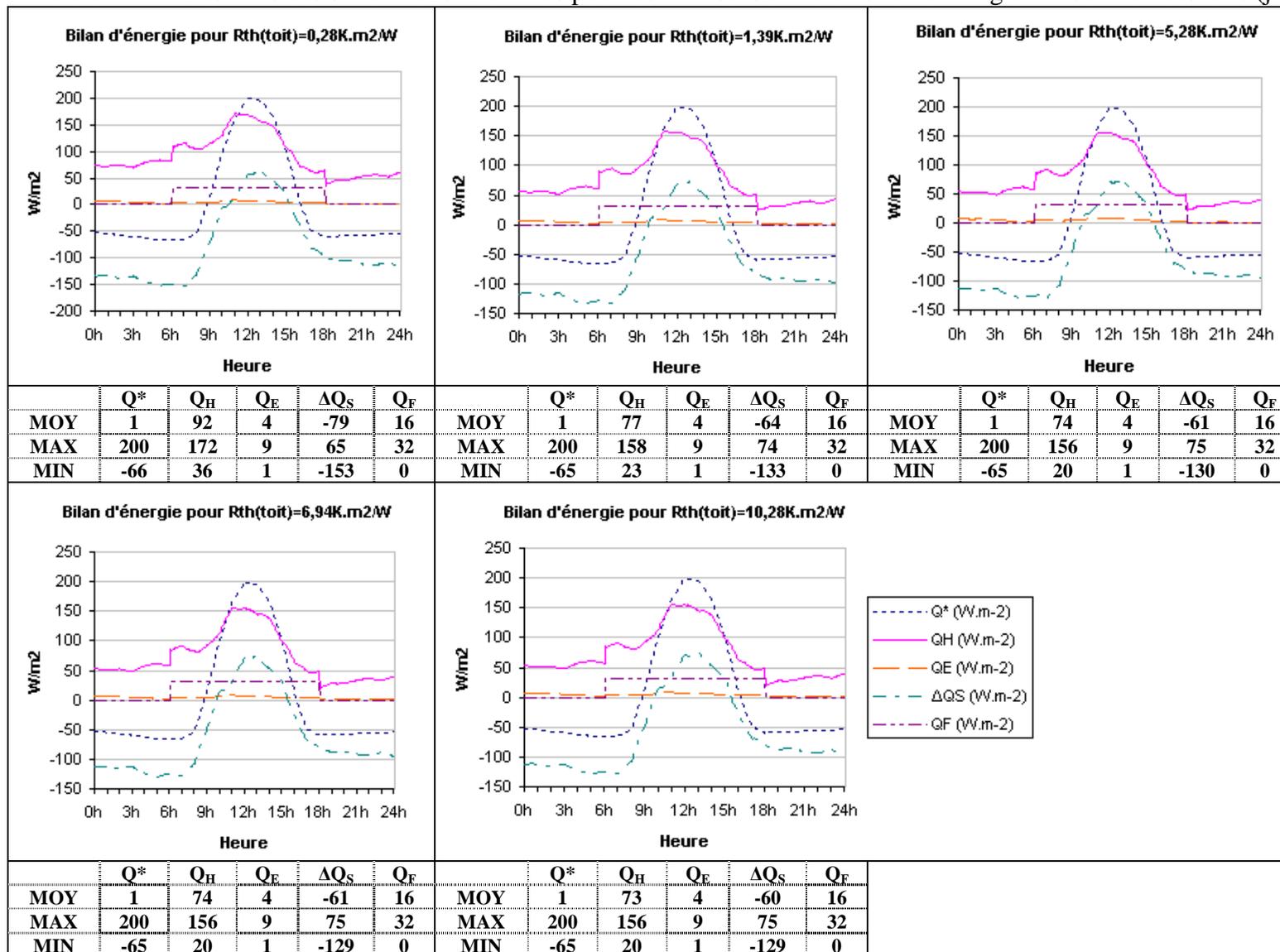


Tableau A 48 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des toits (janvier 2006).

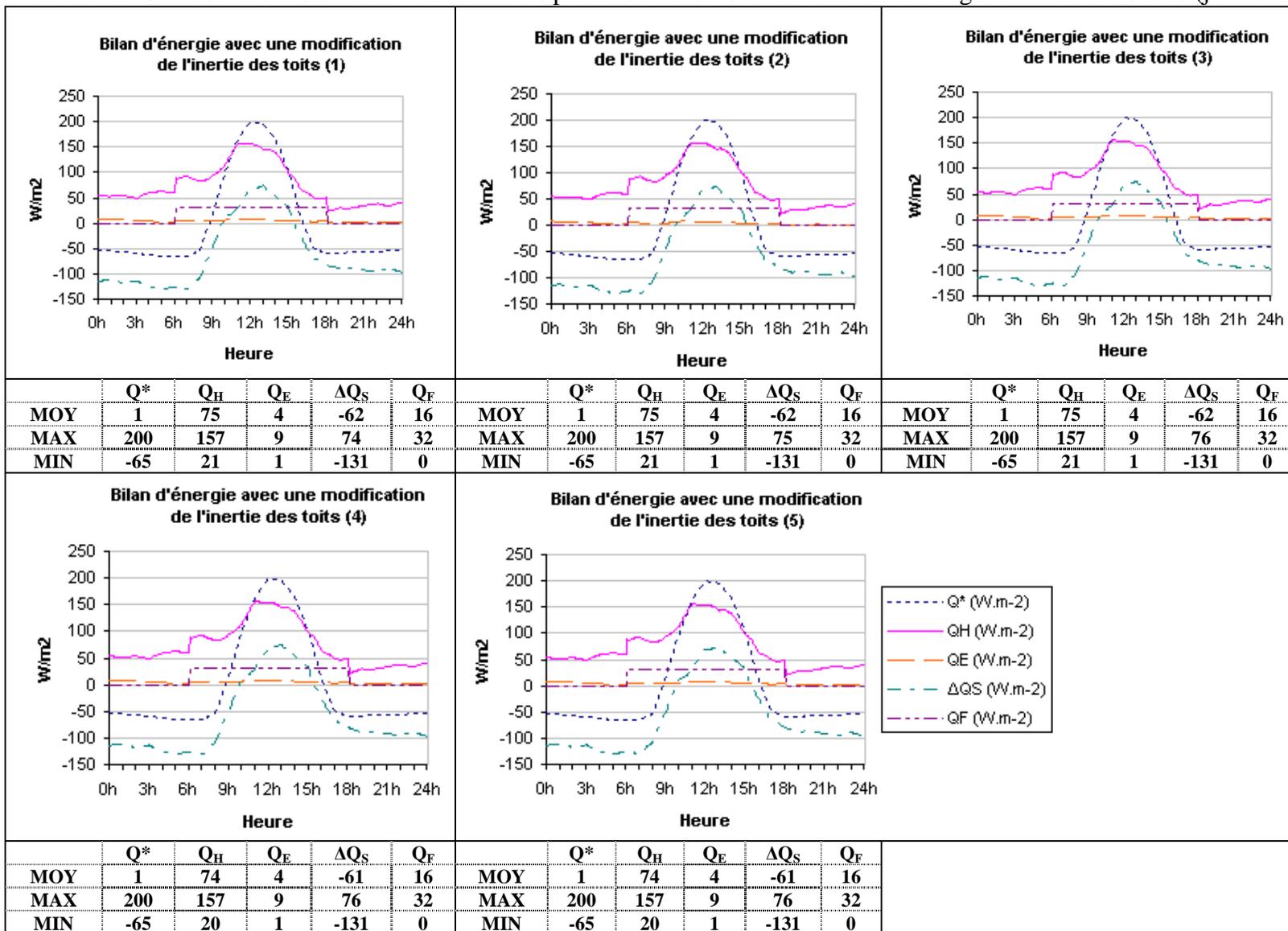


Tableau A 49 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'albédo des toits (janvier 2006).

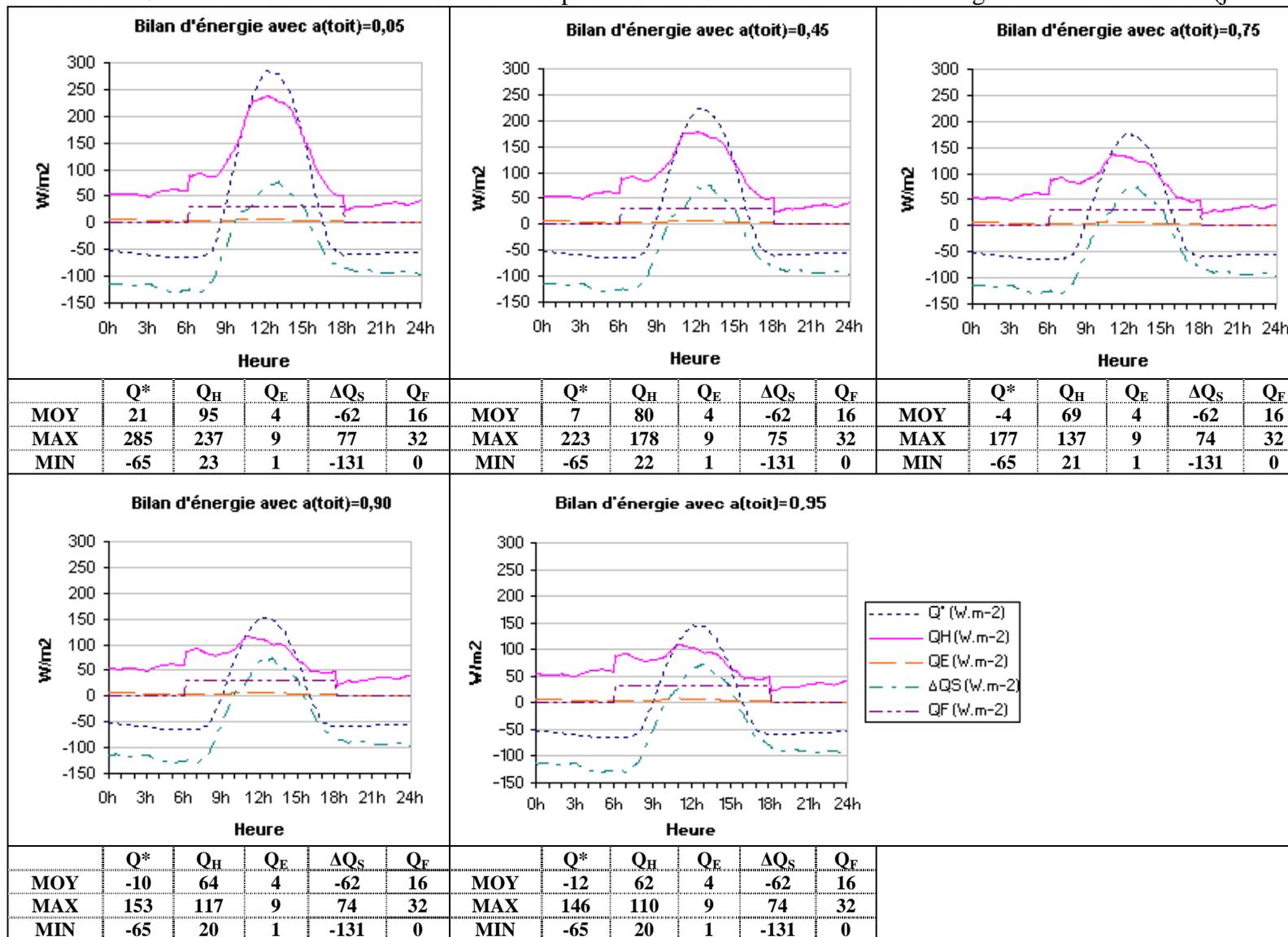


Tableau A 50 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité des toits (janvier 2006).

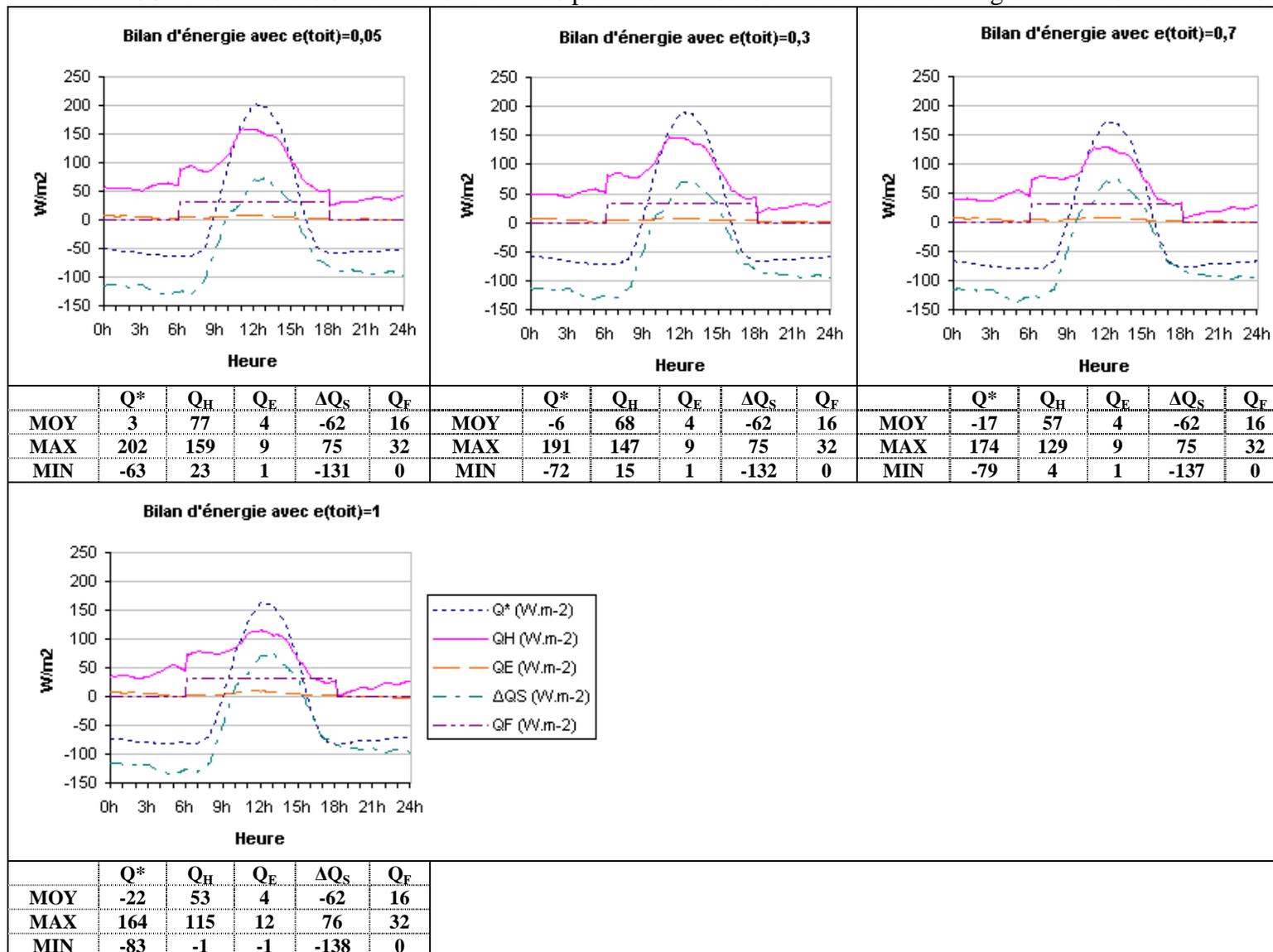


Tableau A 51 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à un changement de types de toits (janvier 2006).

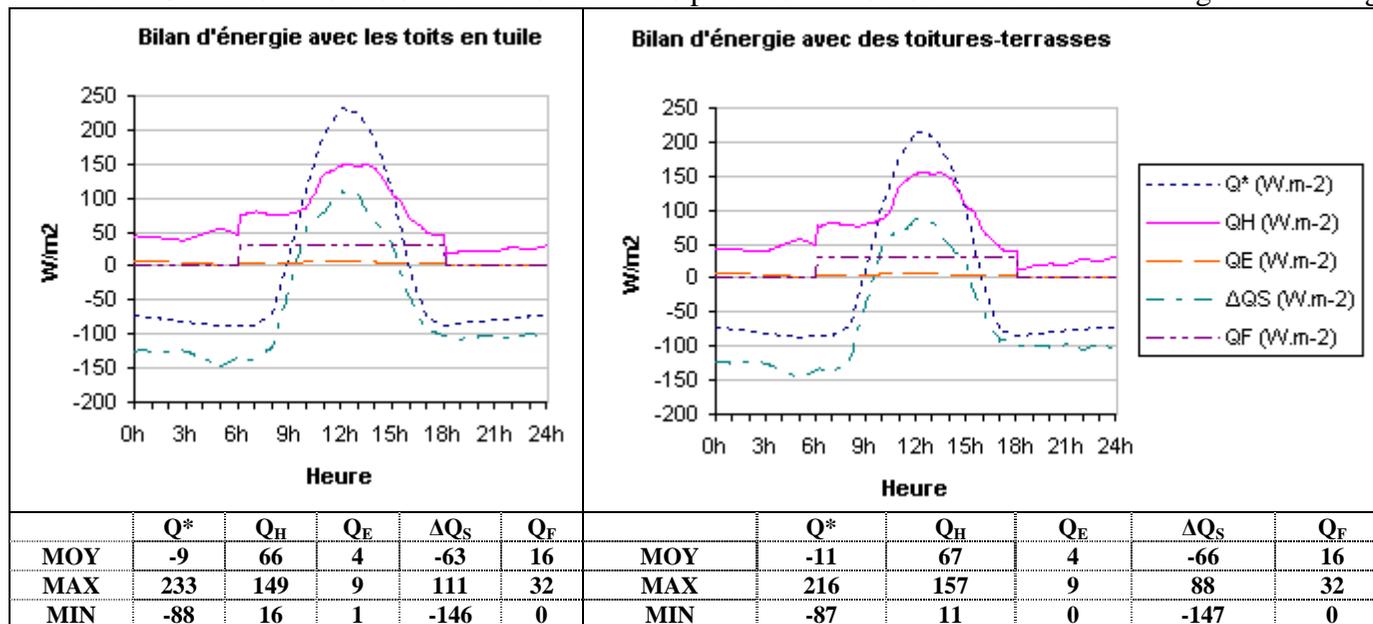


Tableau A 52 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'isolation des murs (janvier 2006).

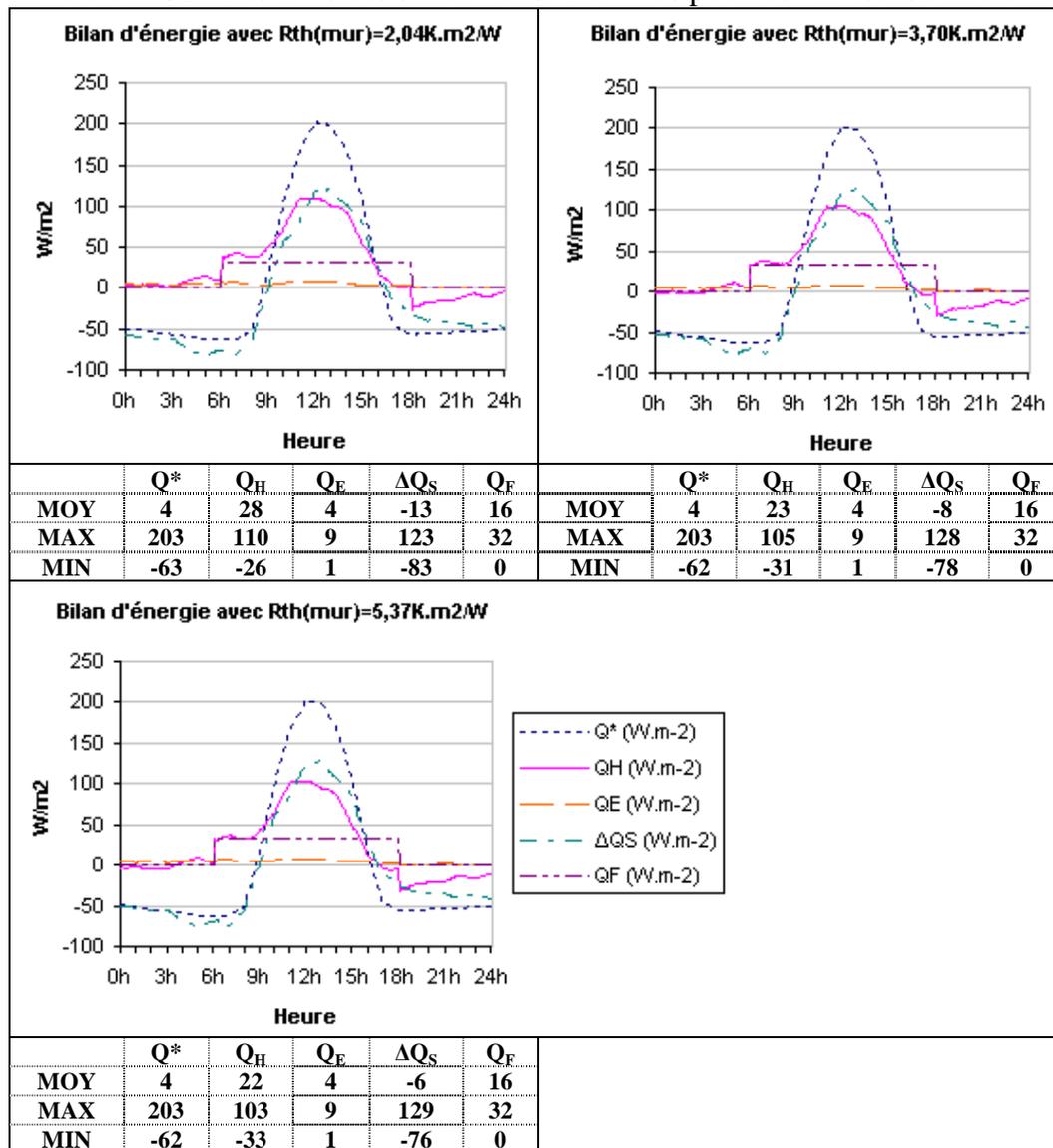


Tableau A 53 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des murs (janvier 2006).

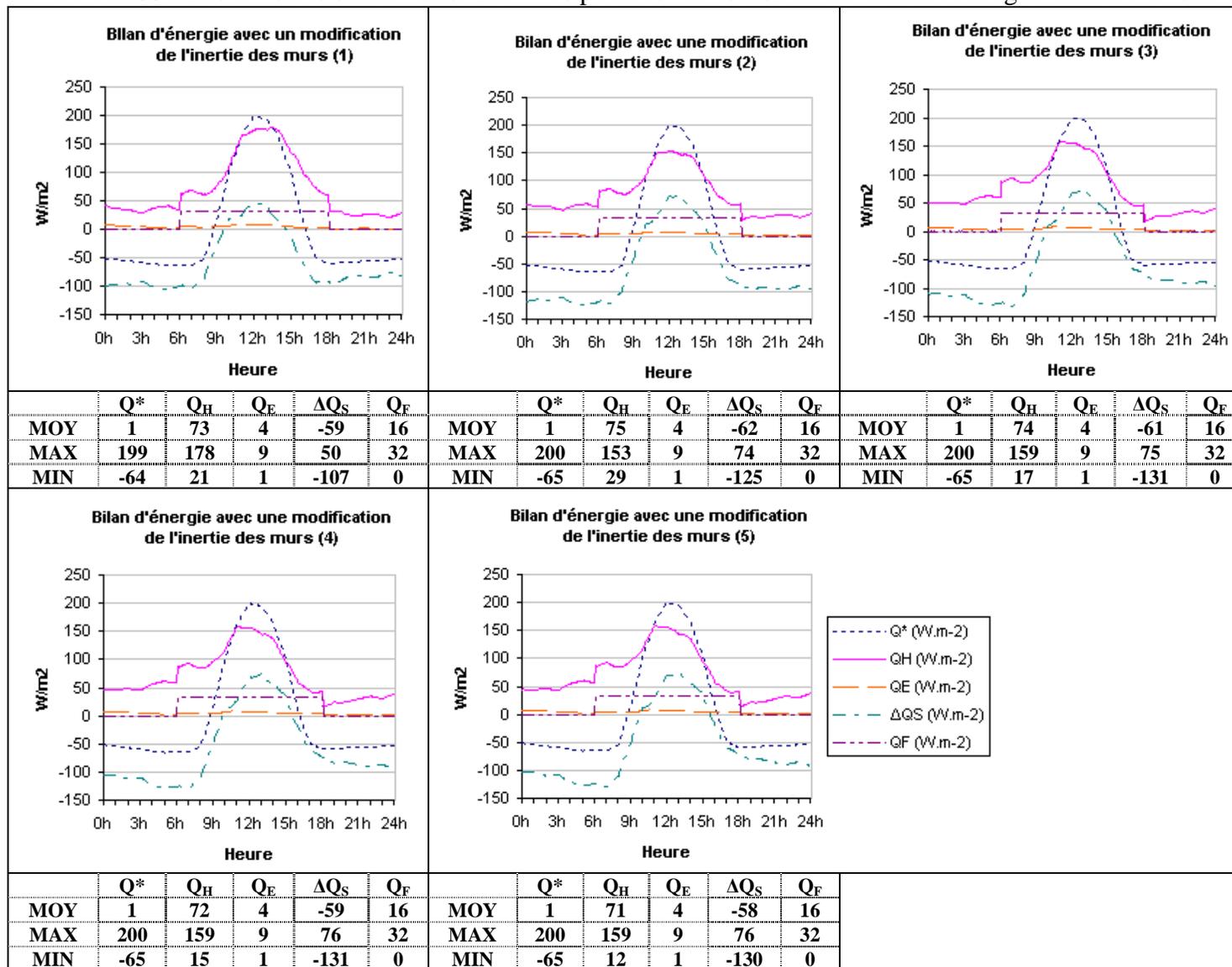


Tableau A 54 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'albédo des murs (janvier 2006).

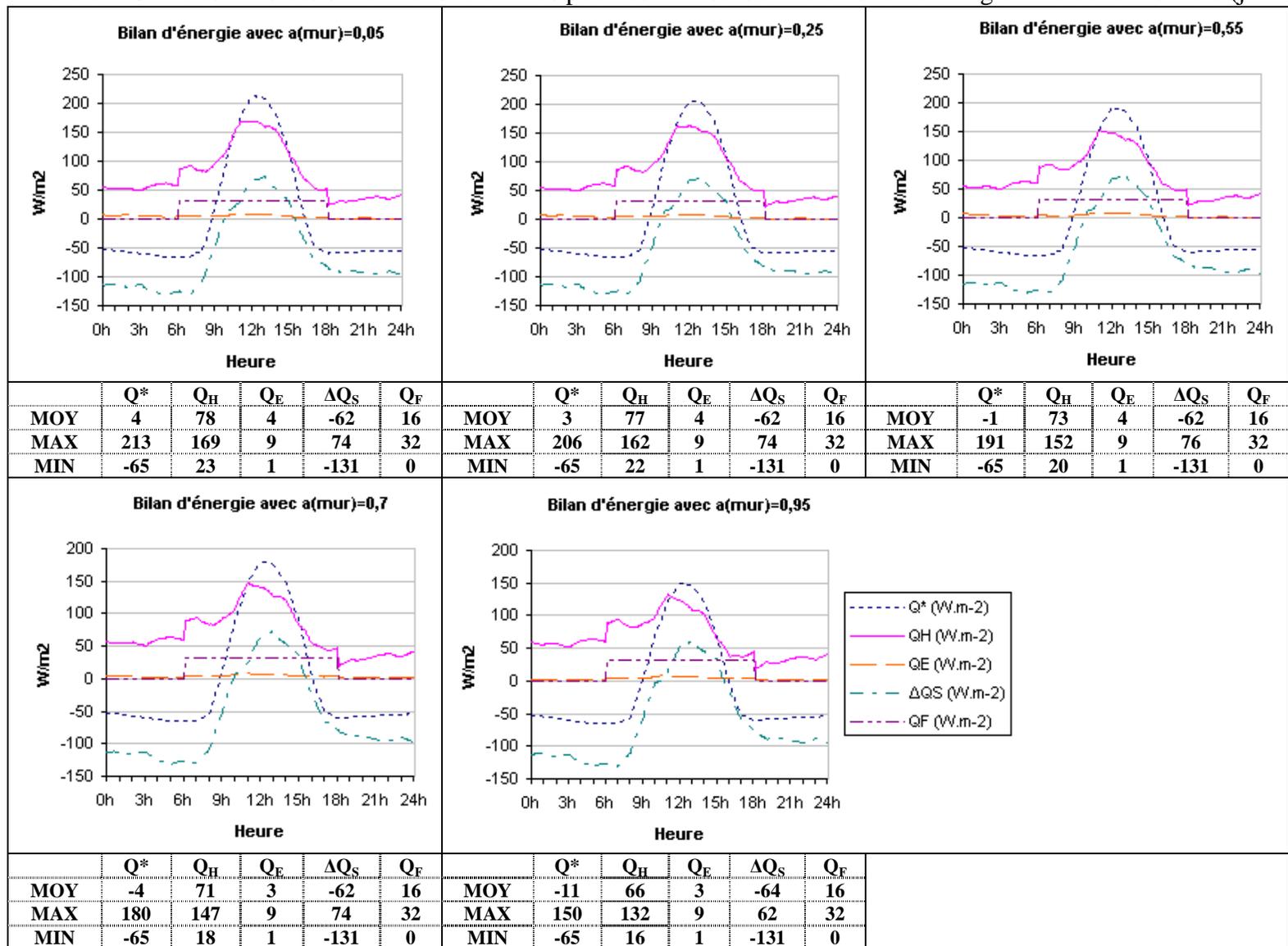


Tableau A 55 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité des murs (janvier 2006).

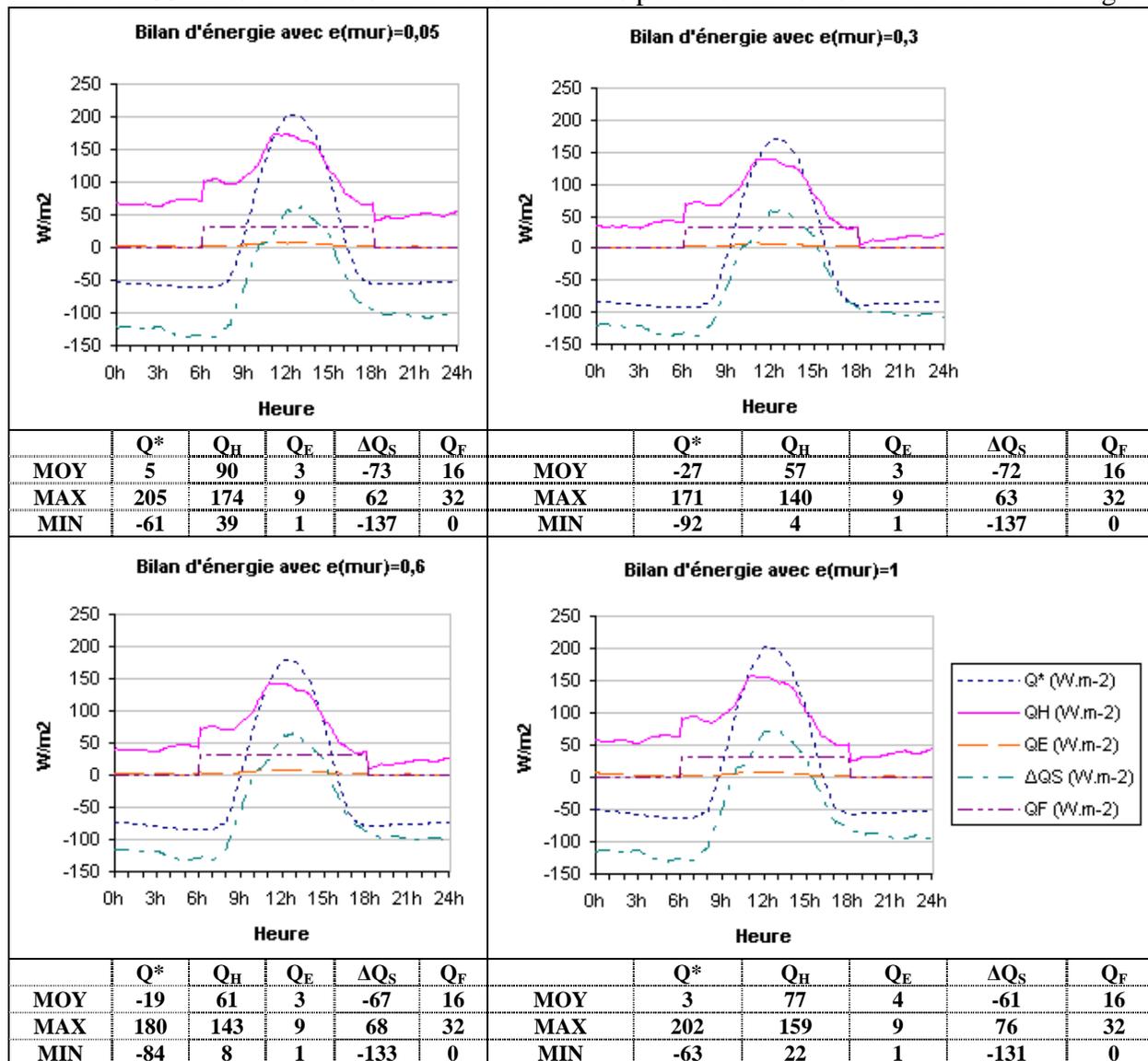


Tableau A 56 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des routes (janvier 2006).

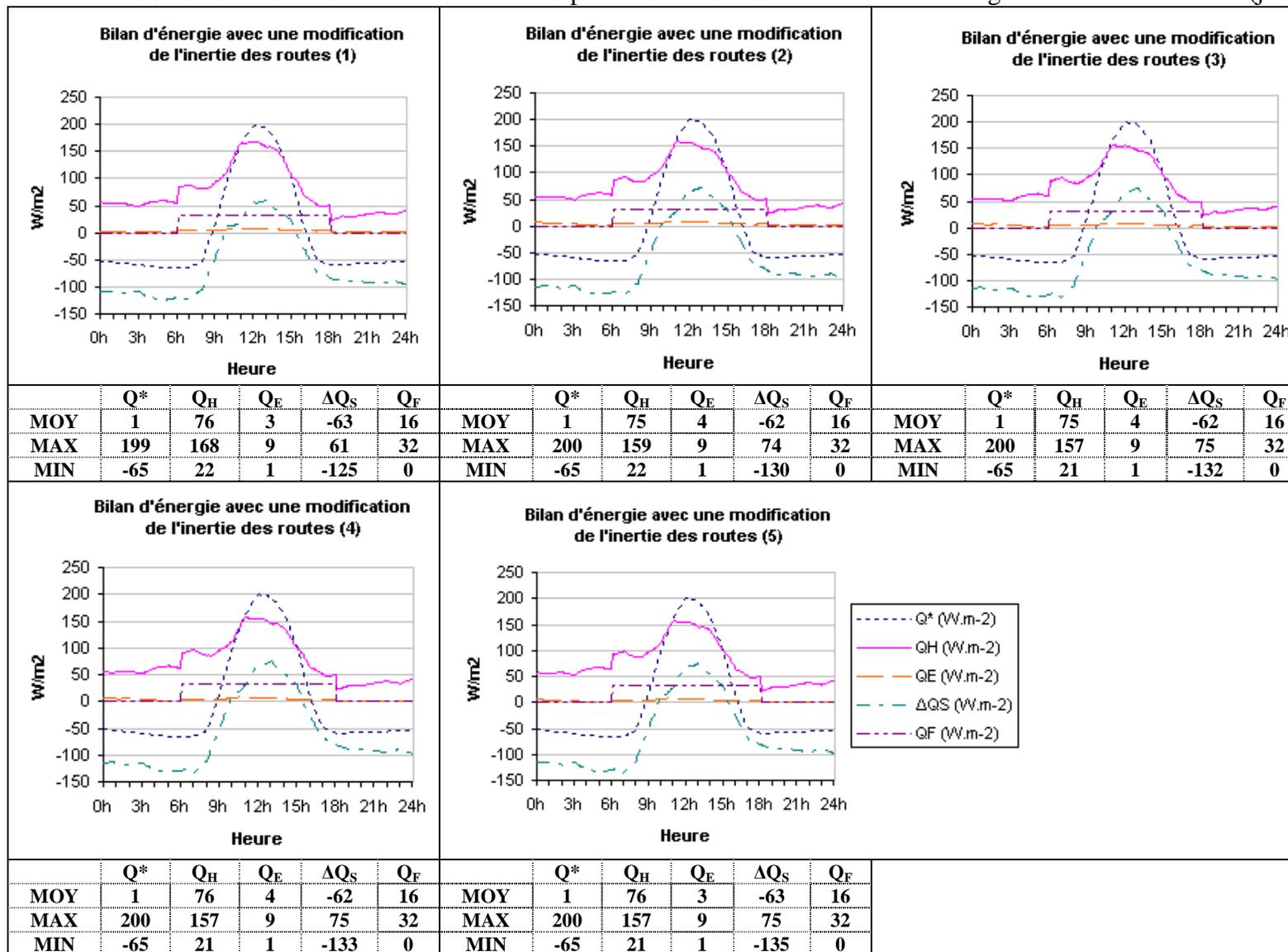


Tableau A 57 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'albédo des routes (janvier 2006).

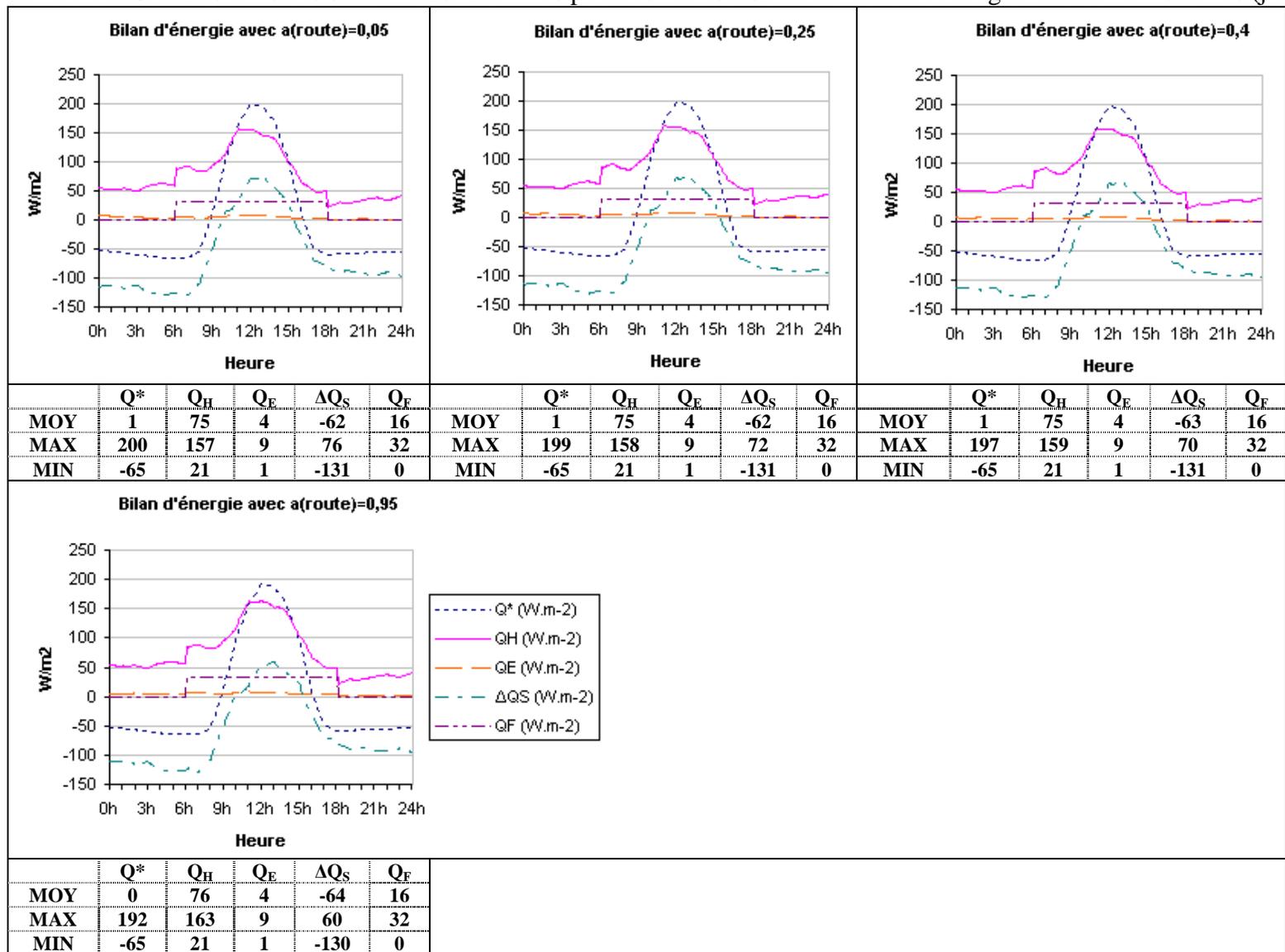


Tableau A 58 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité des rues (janvier 2006).

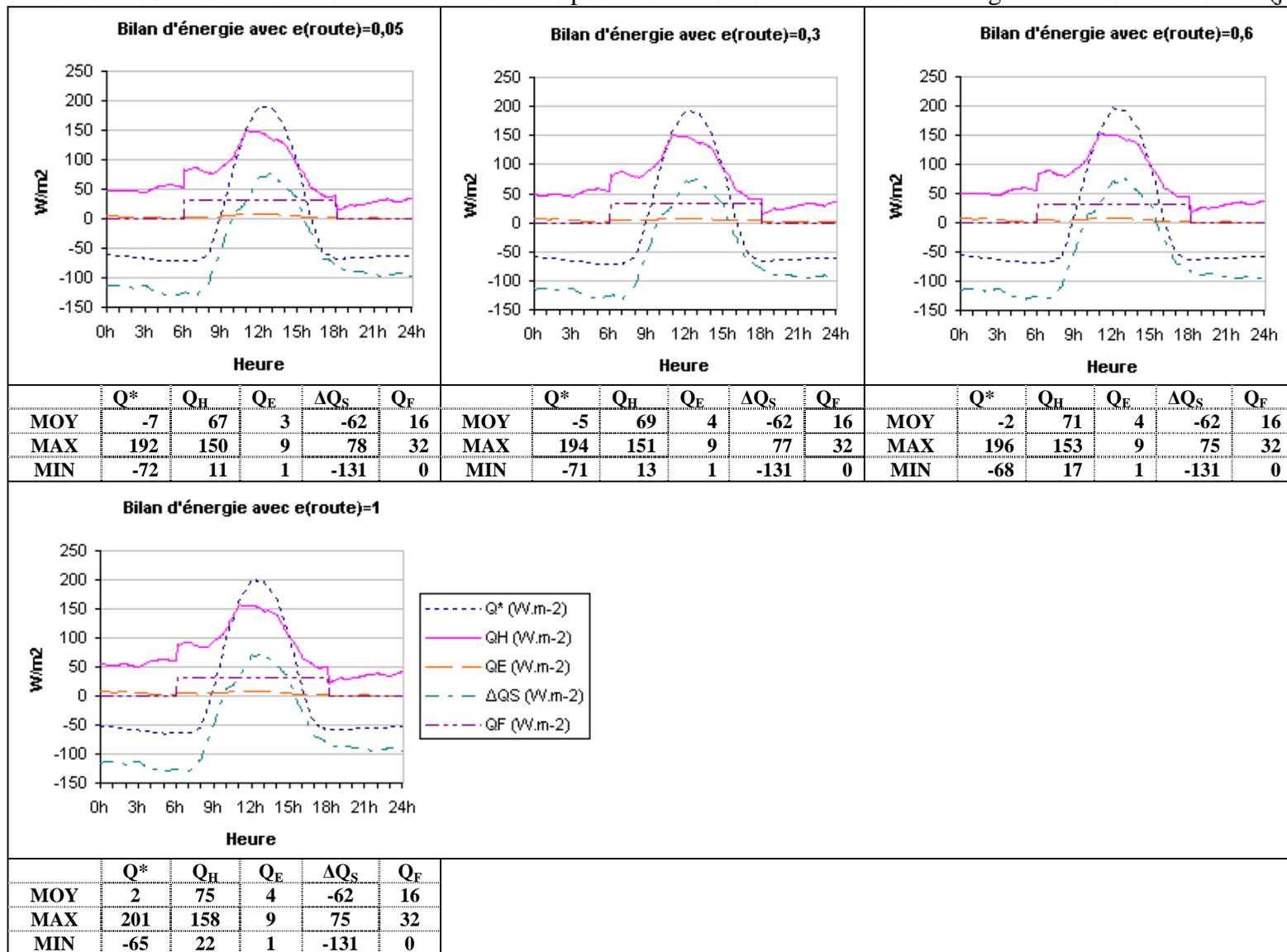


Tableau A 59 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie au flux de chaleur sensible lié au trafic (janvier 2006).

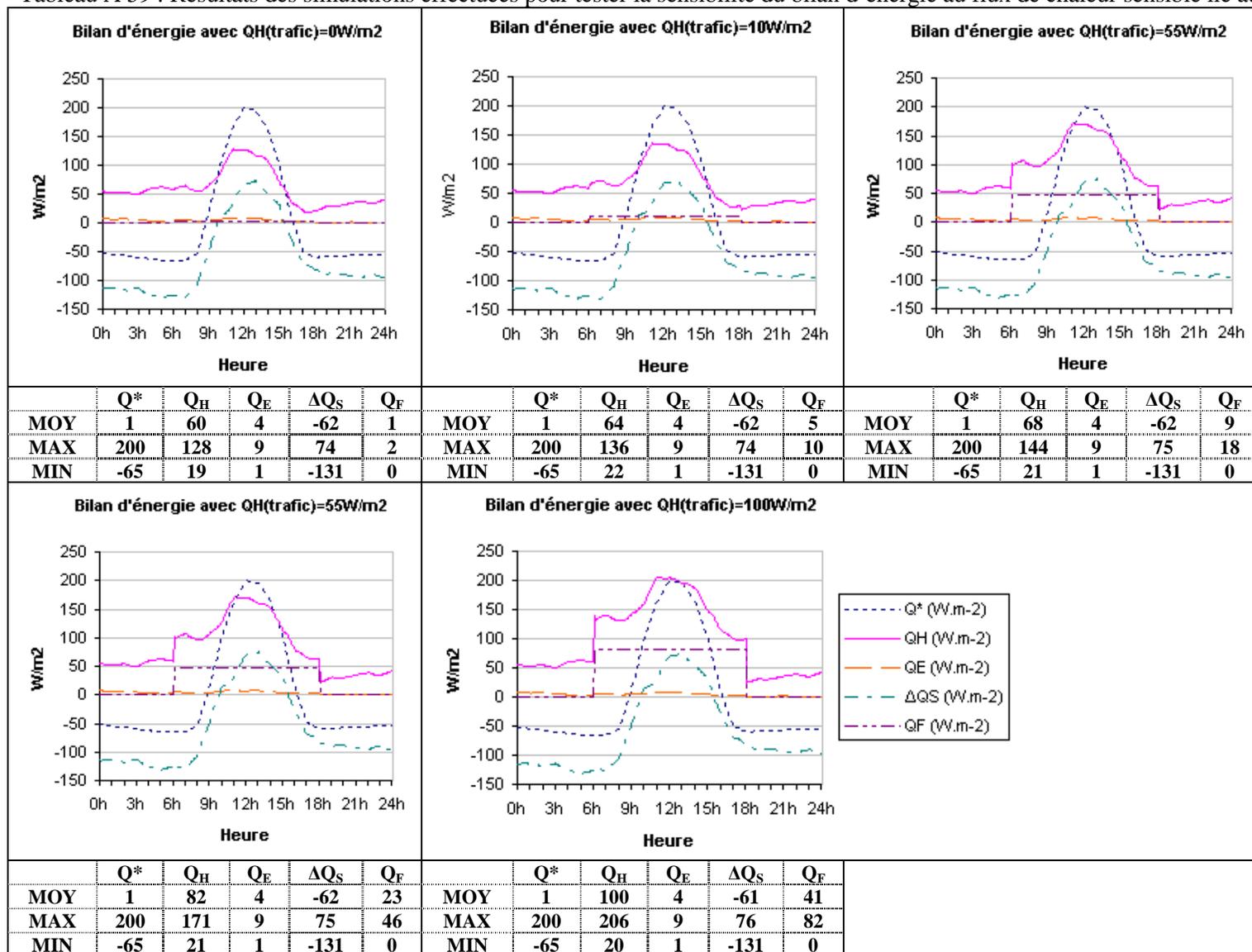


Tableau A 60 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie au flux de chaleur latente lié au trafic (janvier 2006).

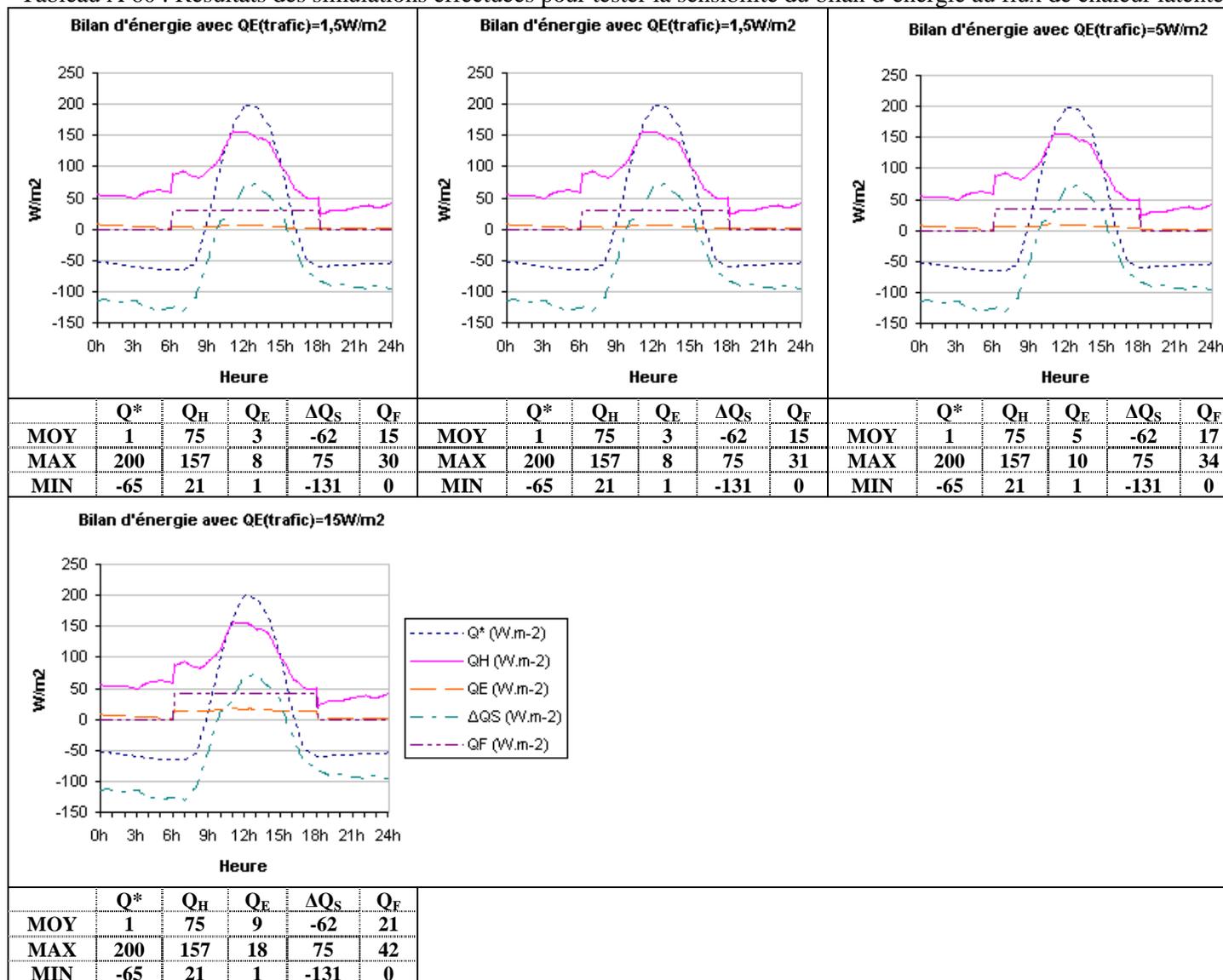


Tableau A 61 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie aux flux de chaleur sensible et latente d'origine industrielle (janvier 2006).

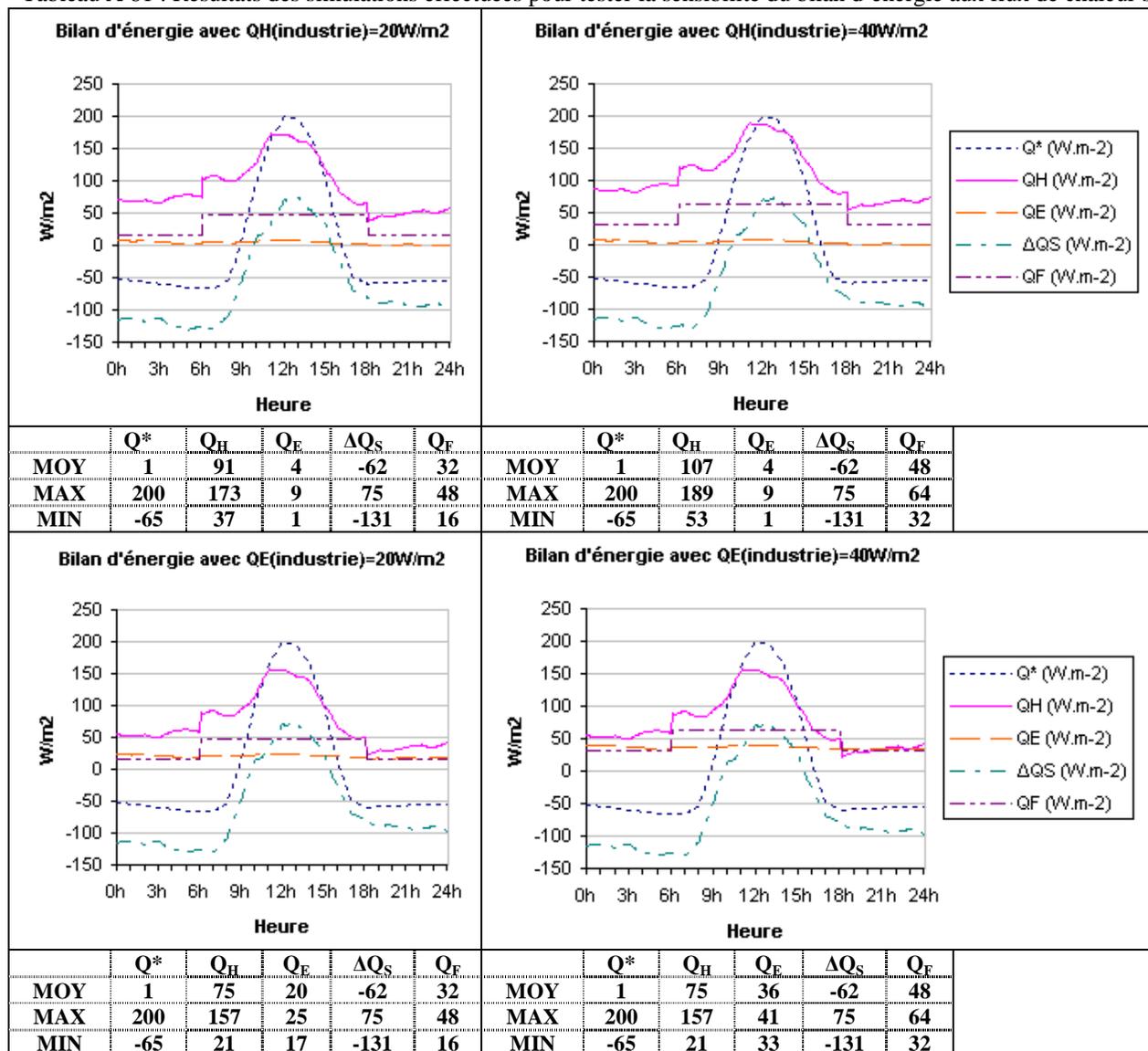


Tableau A 62 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la structure du bâtiment (janvier 2006).

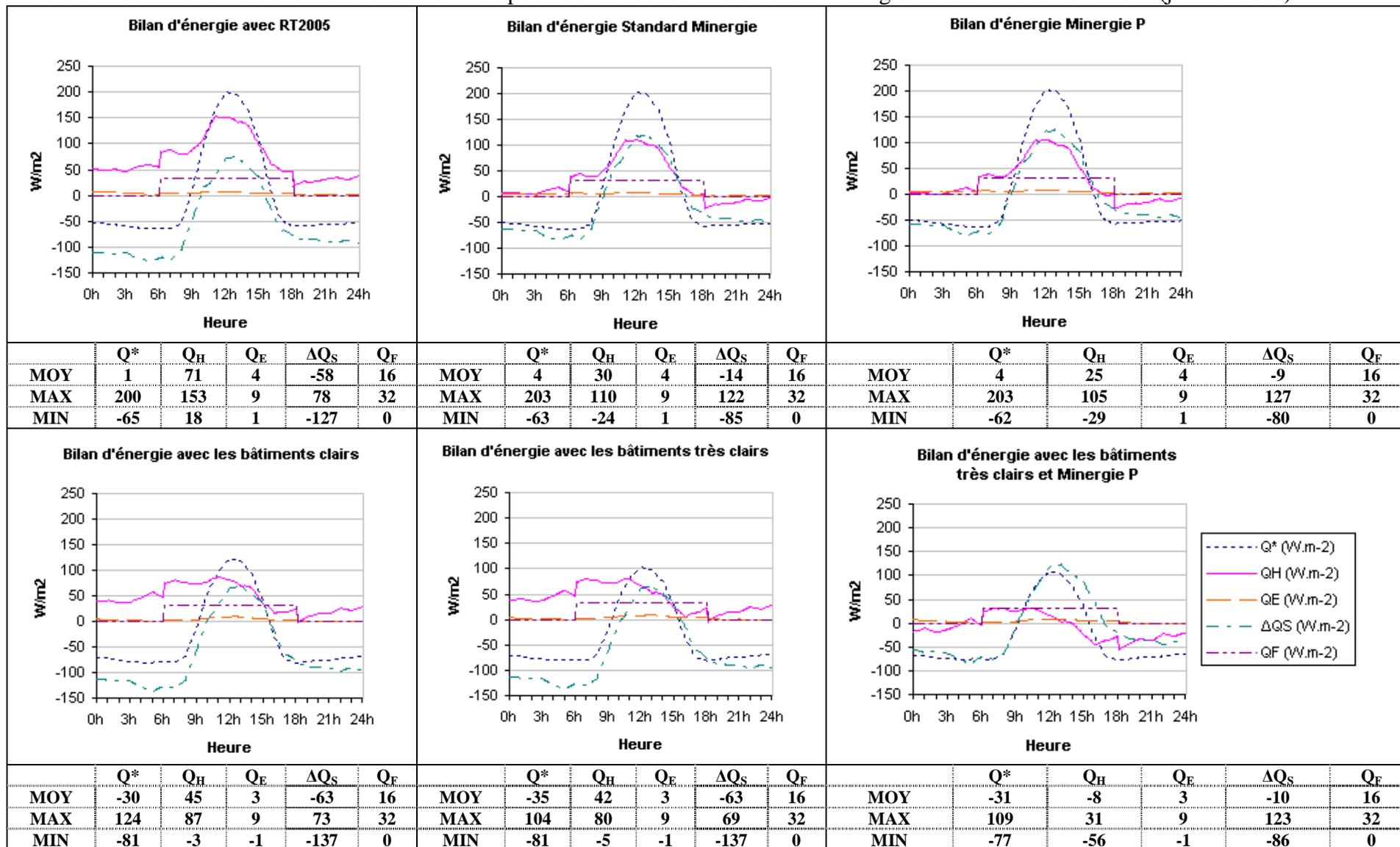
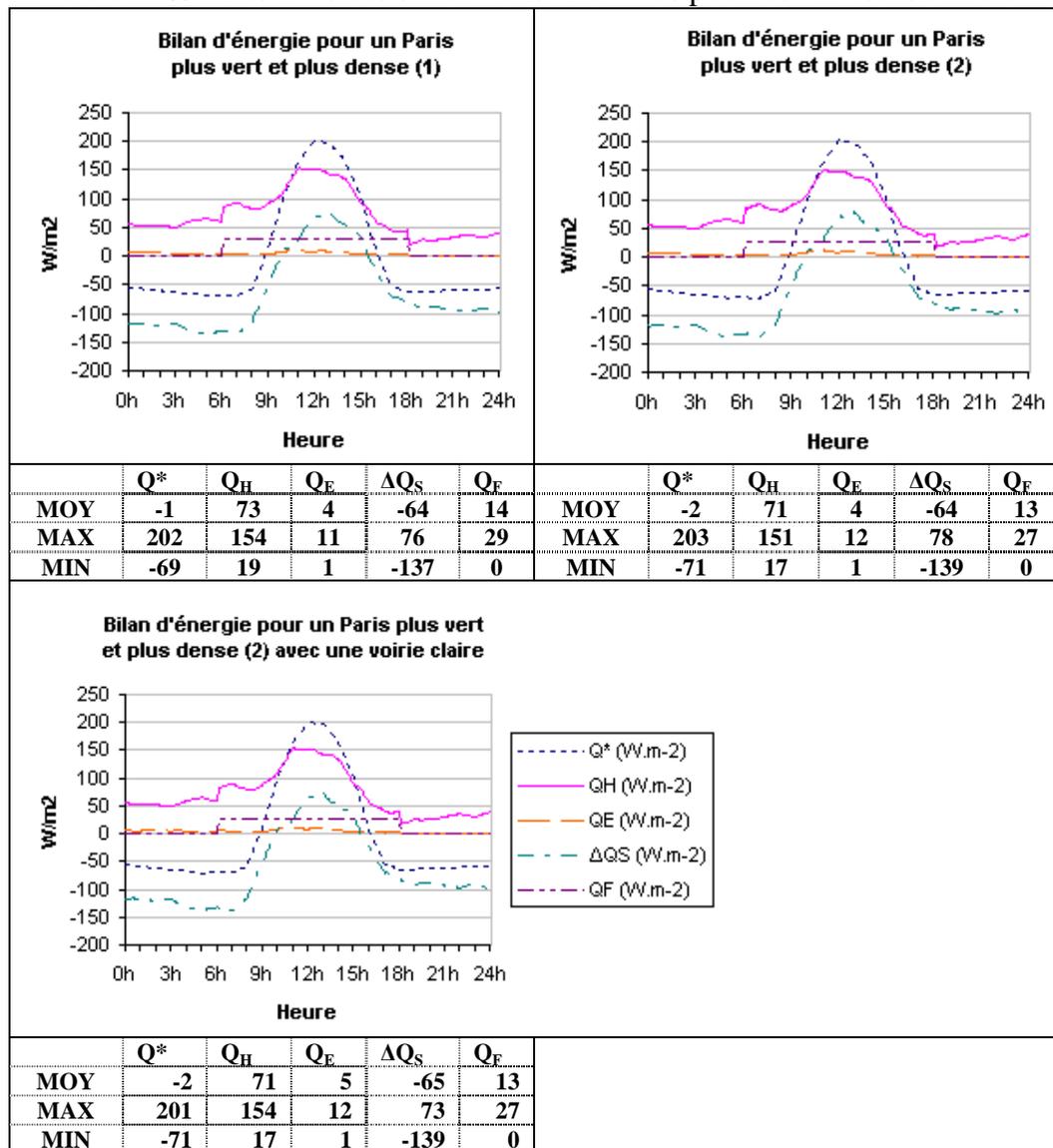


Tableau A 63 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'organisation urbaine (janvier 2006).



Résultats des simulations effectuées pour la journée du 30 juin 2006

Tableau A 64 : Résultat de la simulation du bilan d'énergie pour Paris (juin 2006).

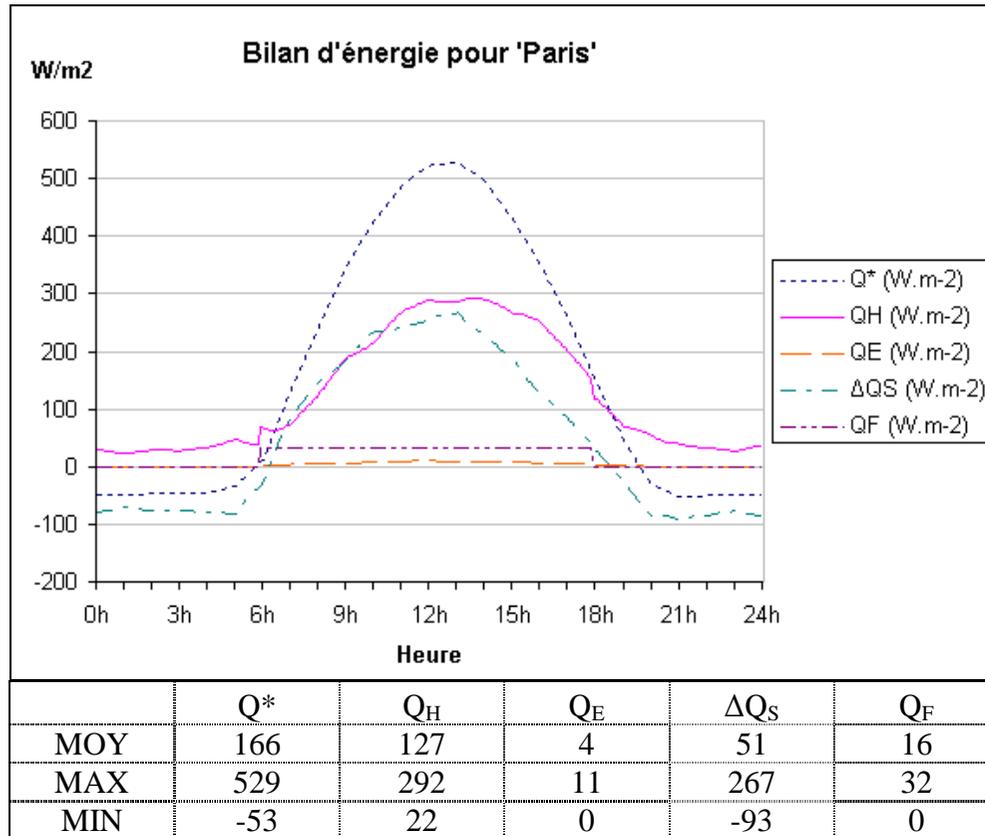


Tableau A 65 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la fraction de végétation (juin 2006).

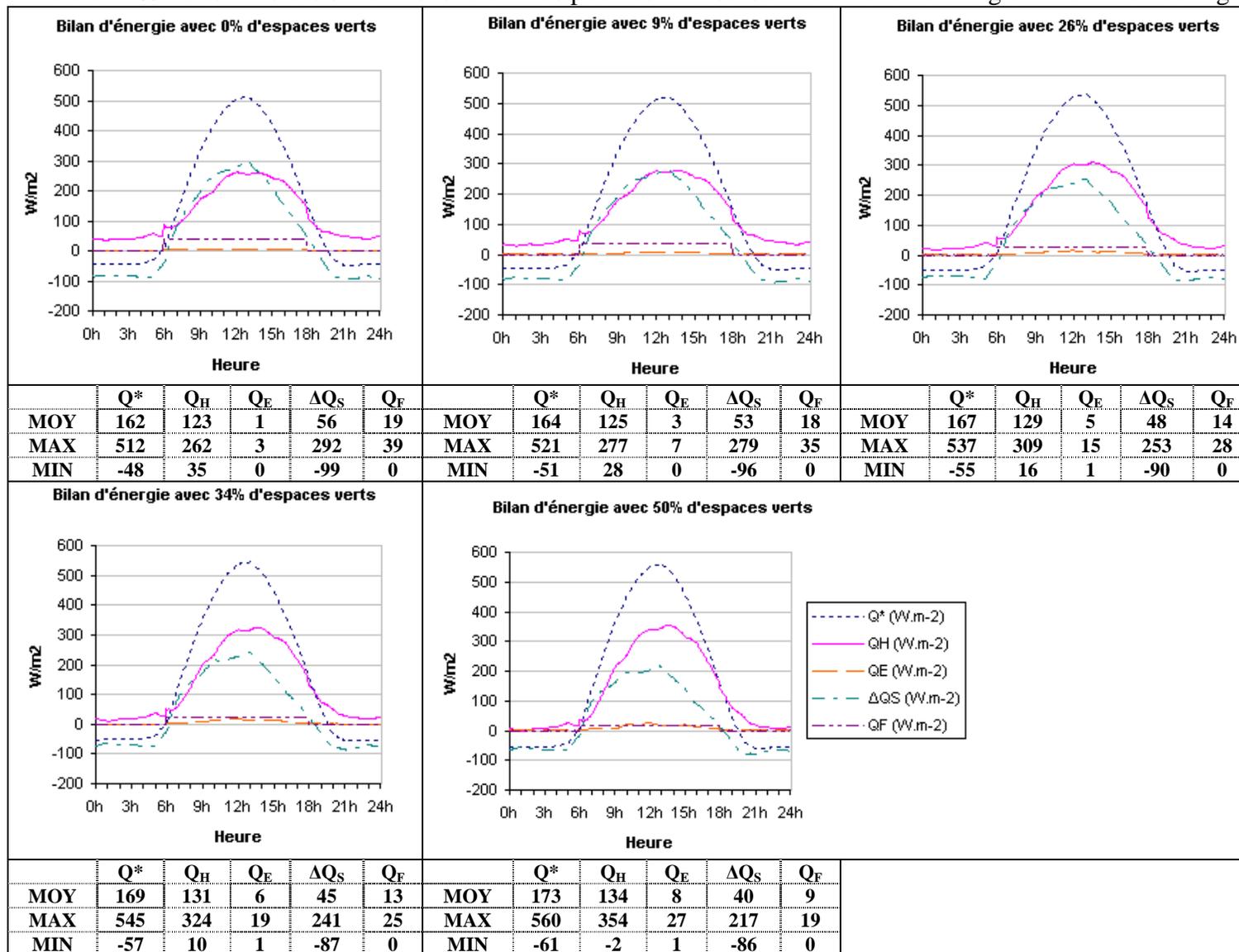


Tableau A 66 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la fraction d'eau (juin 2006).

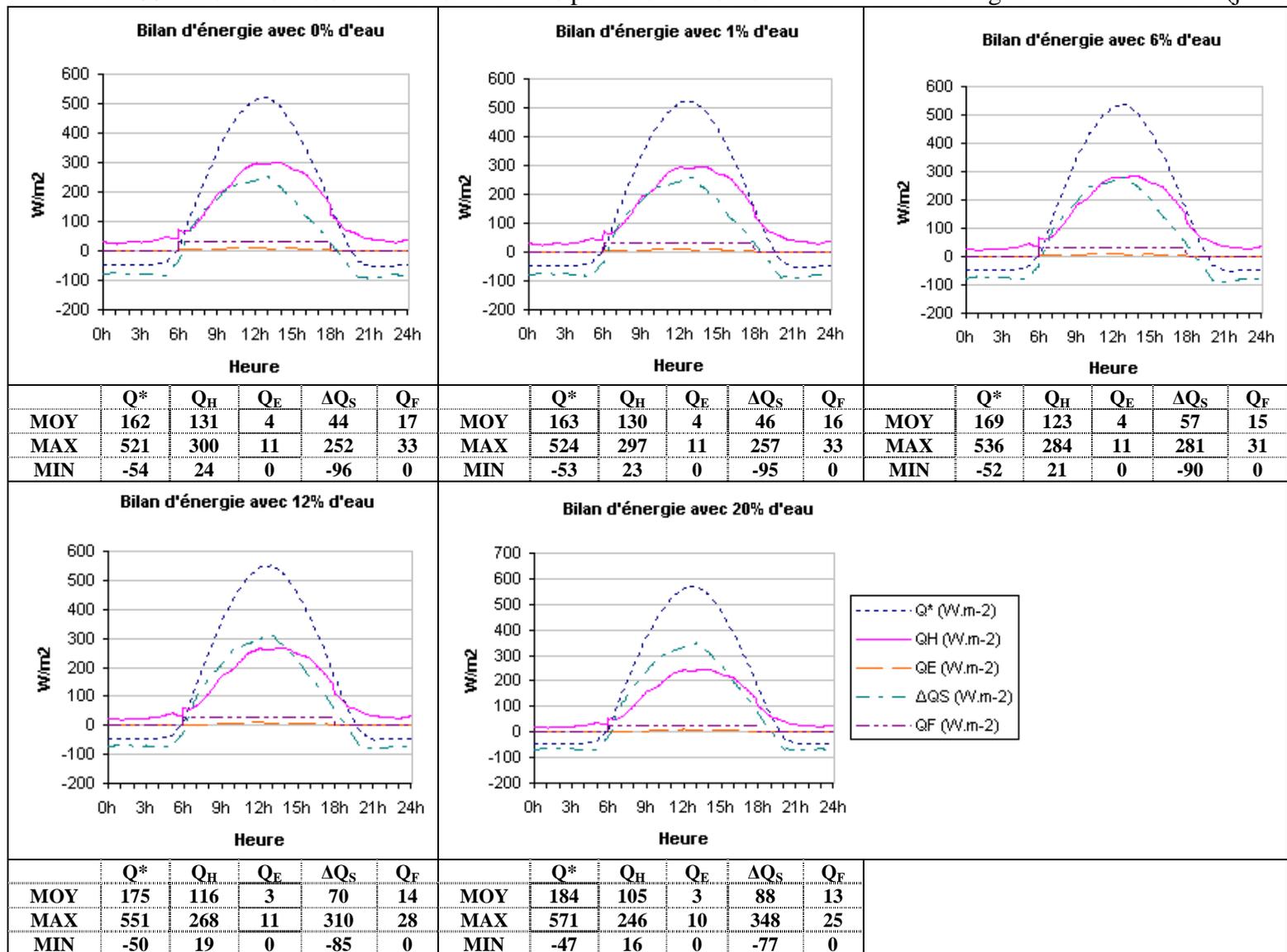


Tableau A 67 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la largeur des rues (juin 2006).

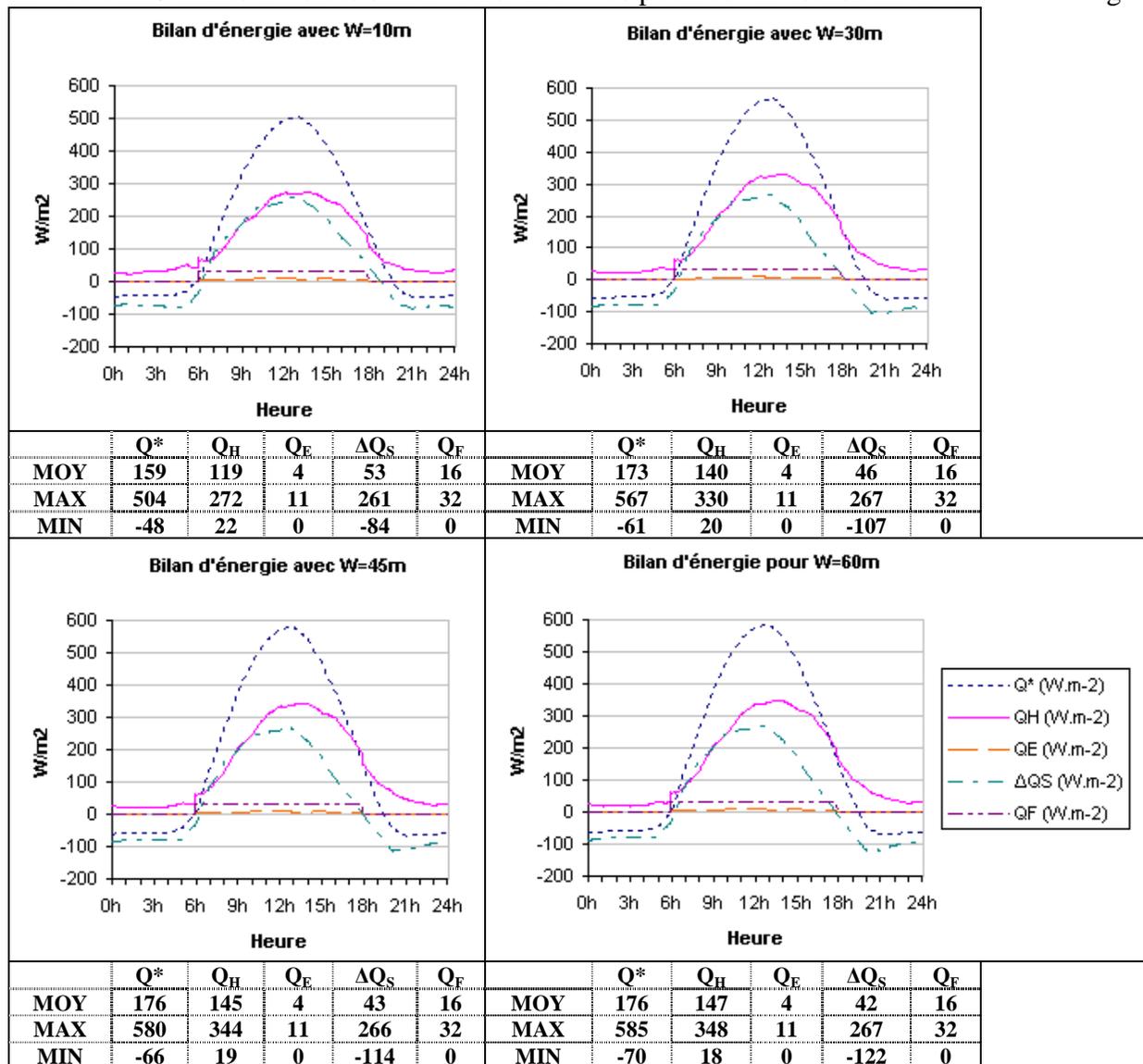


Tableau A 68 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la hauteur des bâtiments (juin 2006).

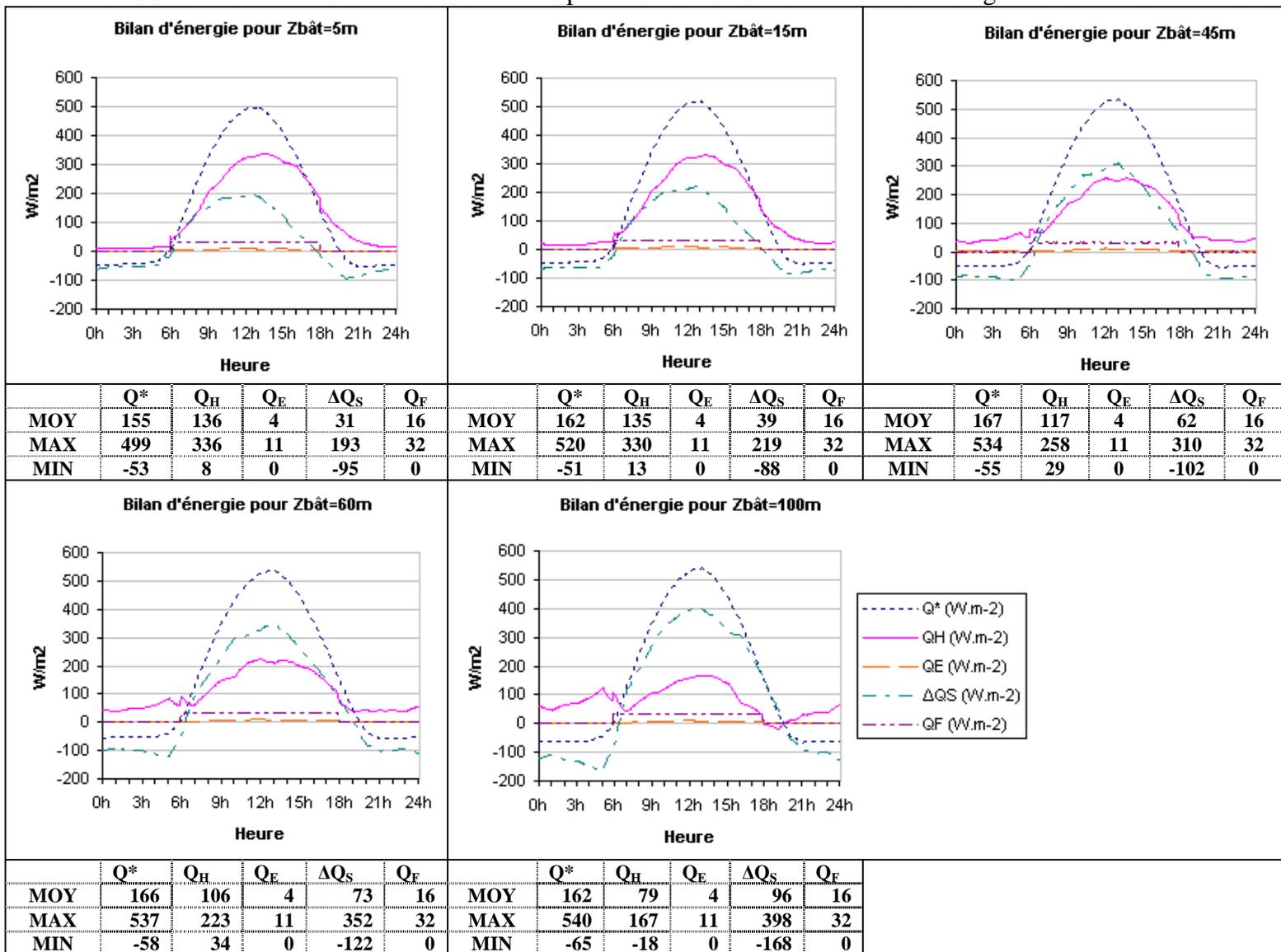


Tableau A 69 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la profondeur des bâtiments (juin 2006).

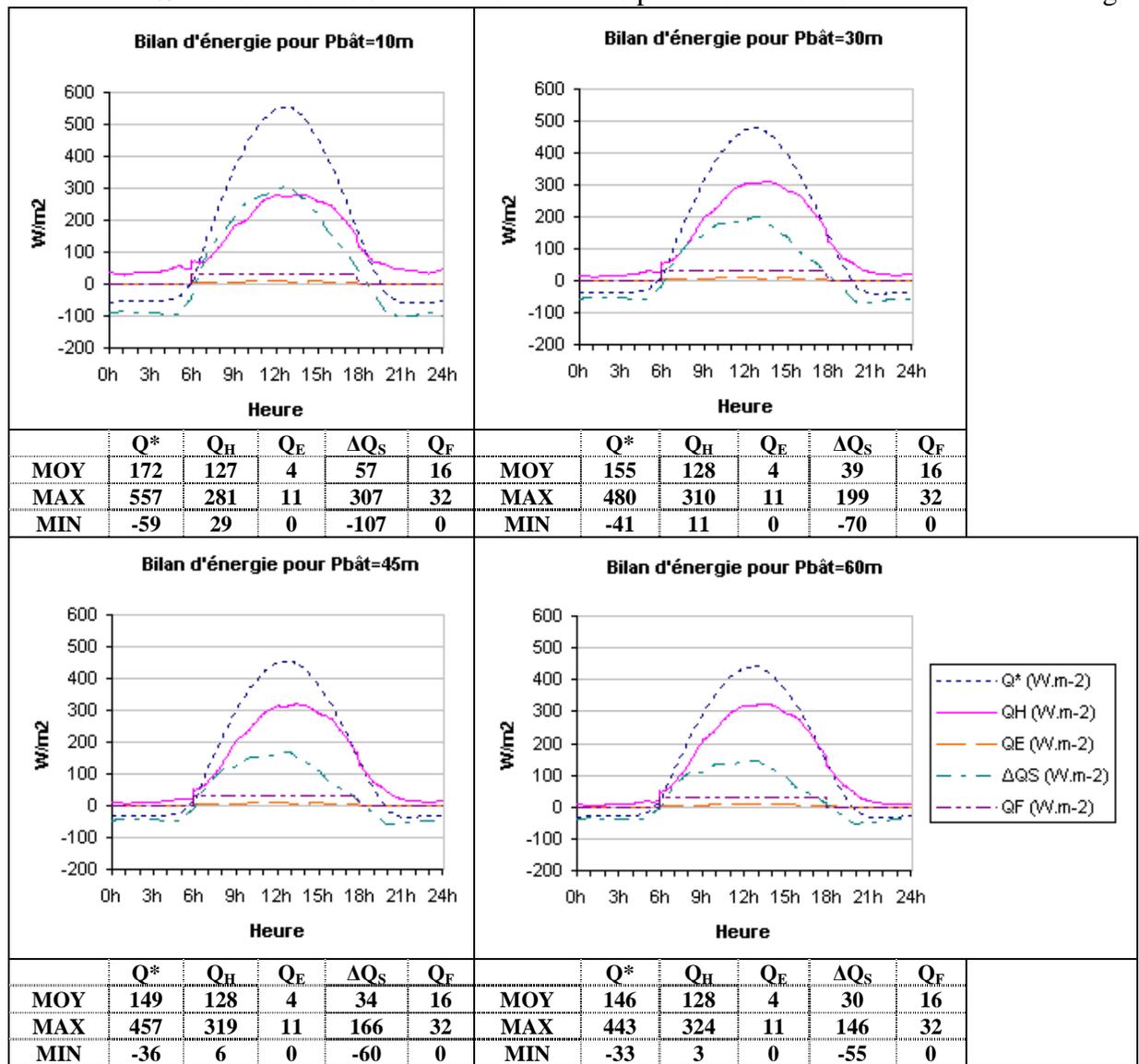


Tableau A 70 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'isolation des toits (juin 2006).

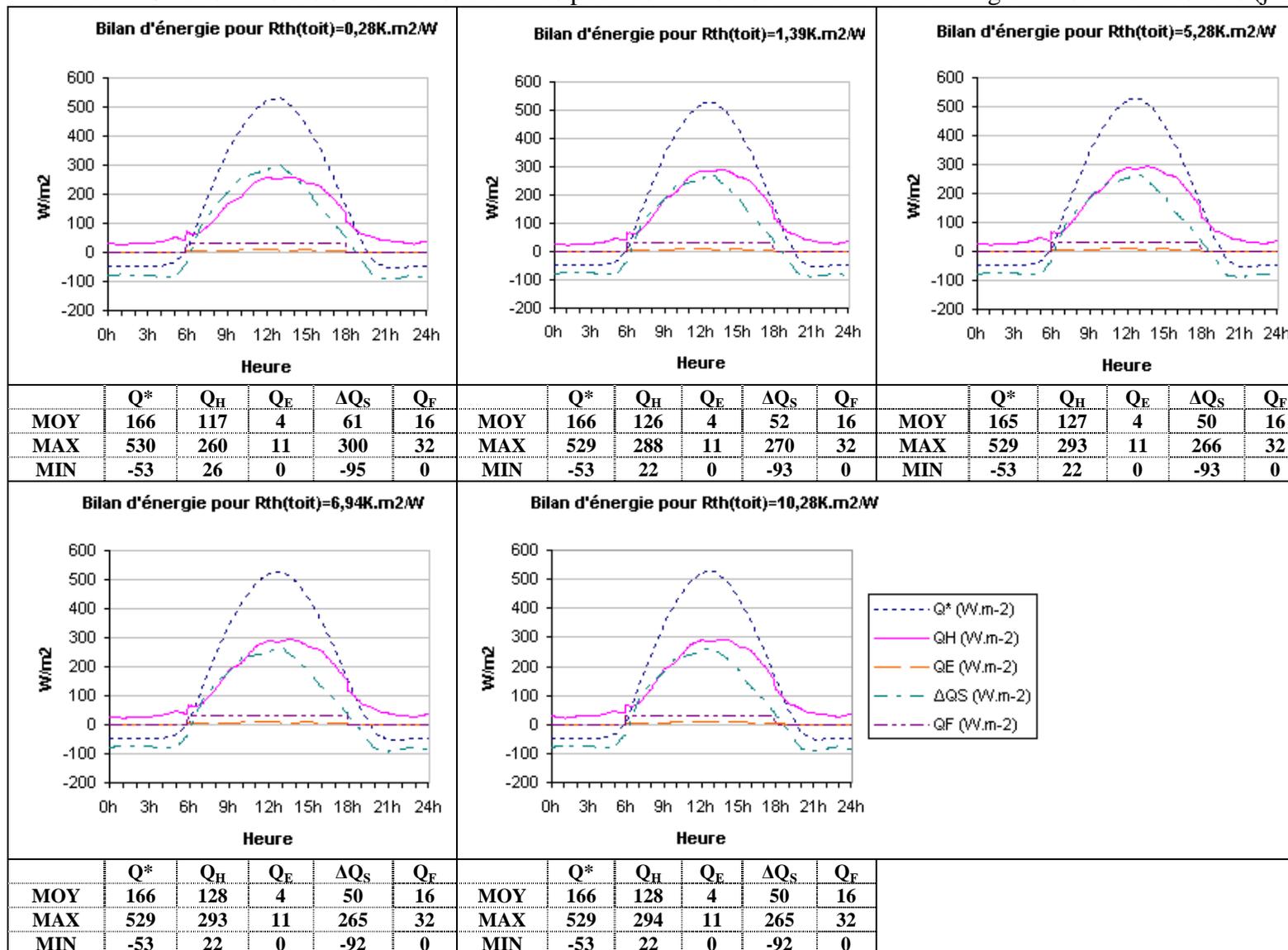


Tableau A 71 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des toits (juin 2006).

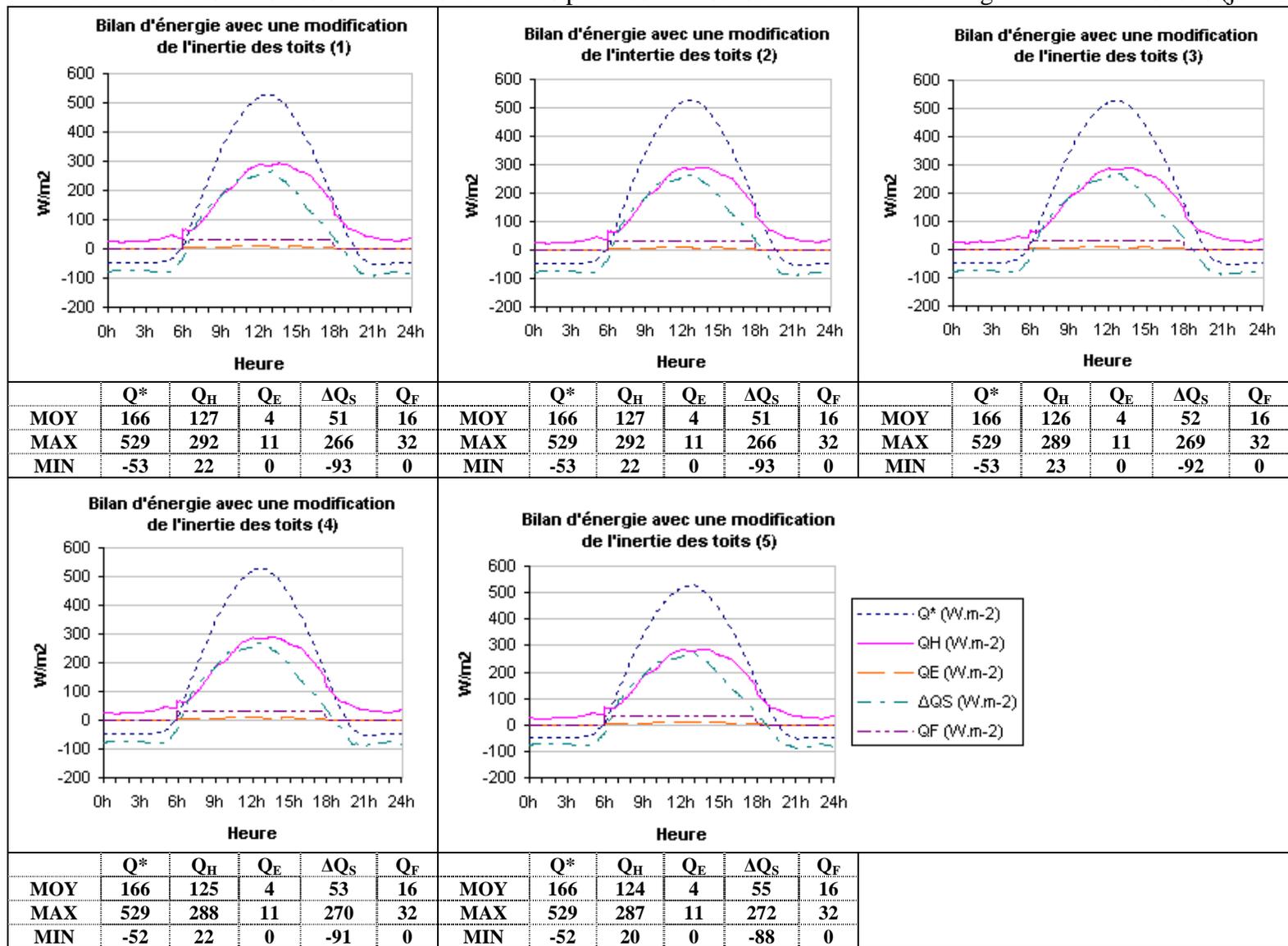


Tableau A 72 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'albédo des toits (juin 2006).

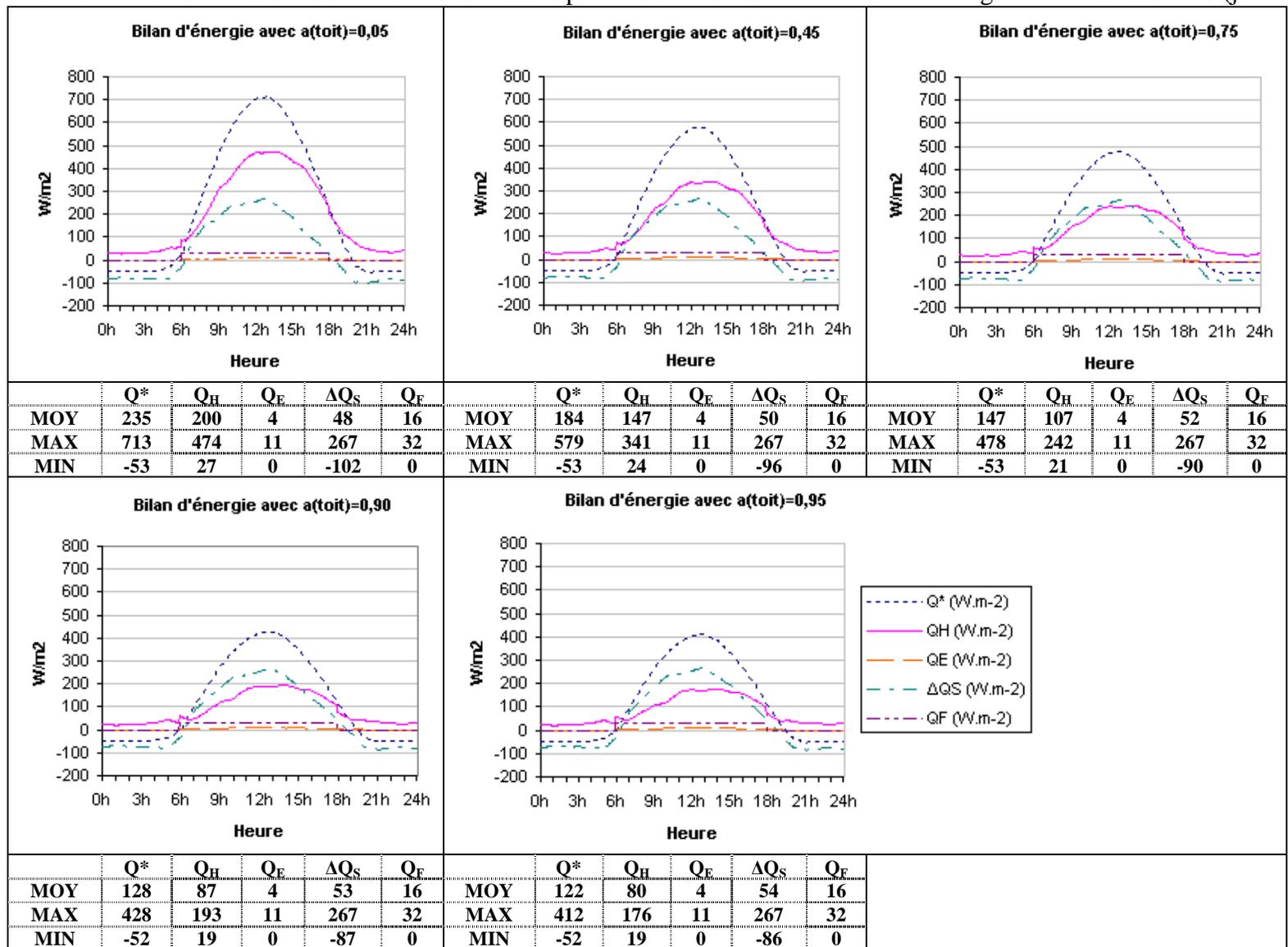


Tableau A 73 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité des toits (juin 2006).

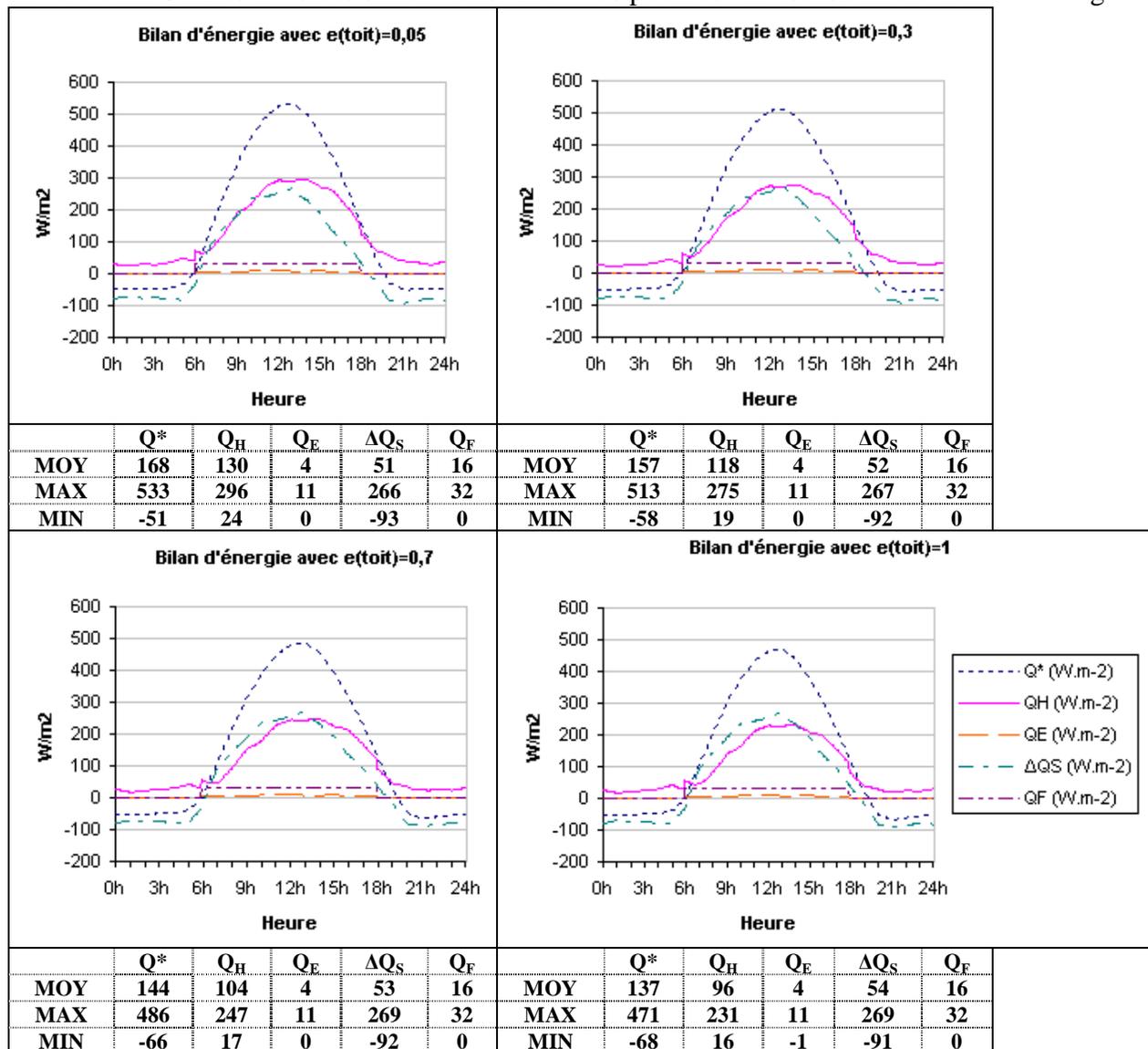


Tableau A 74 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à un changement de types de toits (juin 2006).

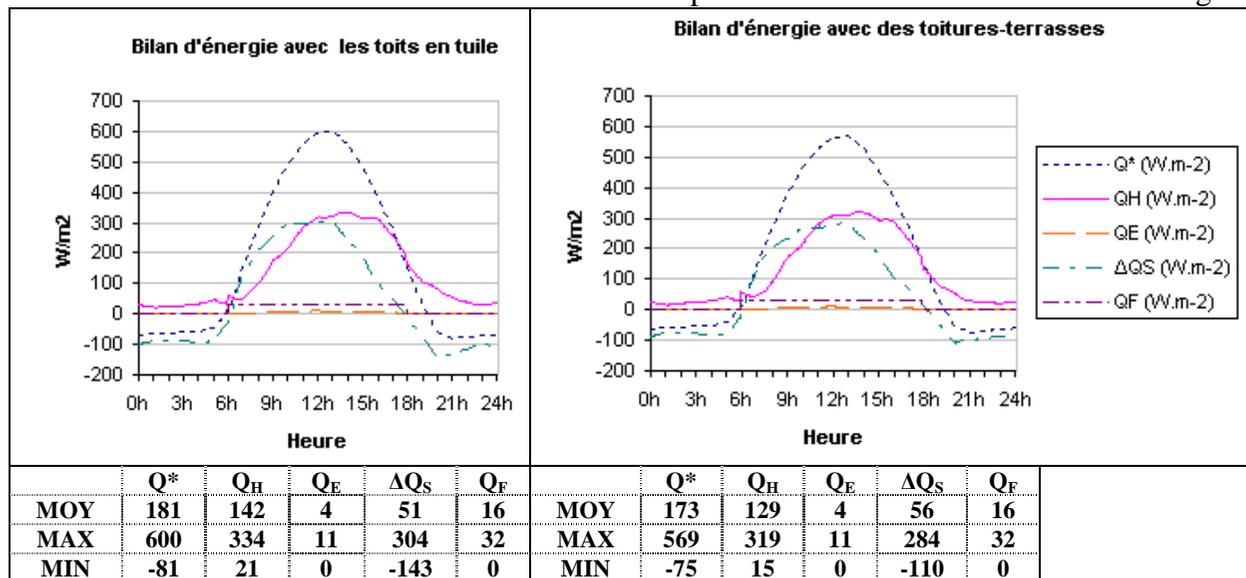


Tableau A 75 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'isolation des murs (juin 2006).

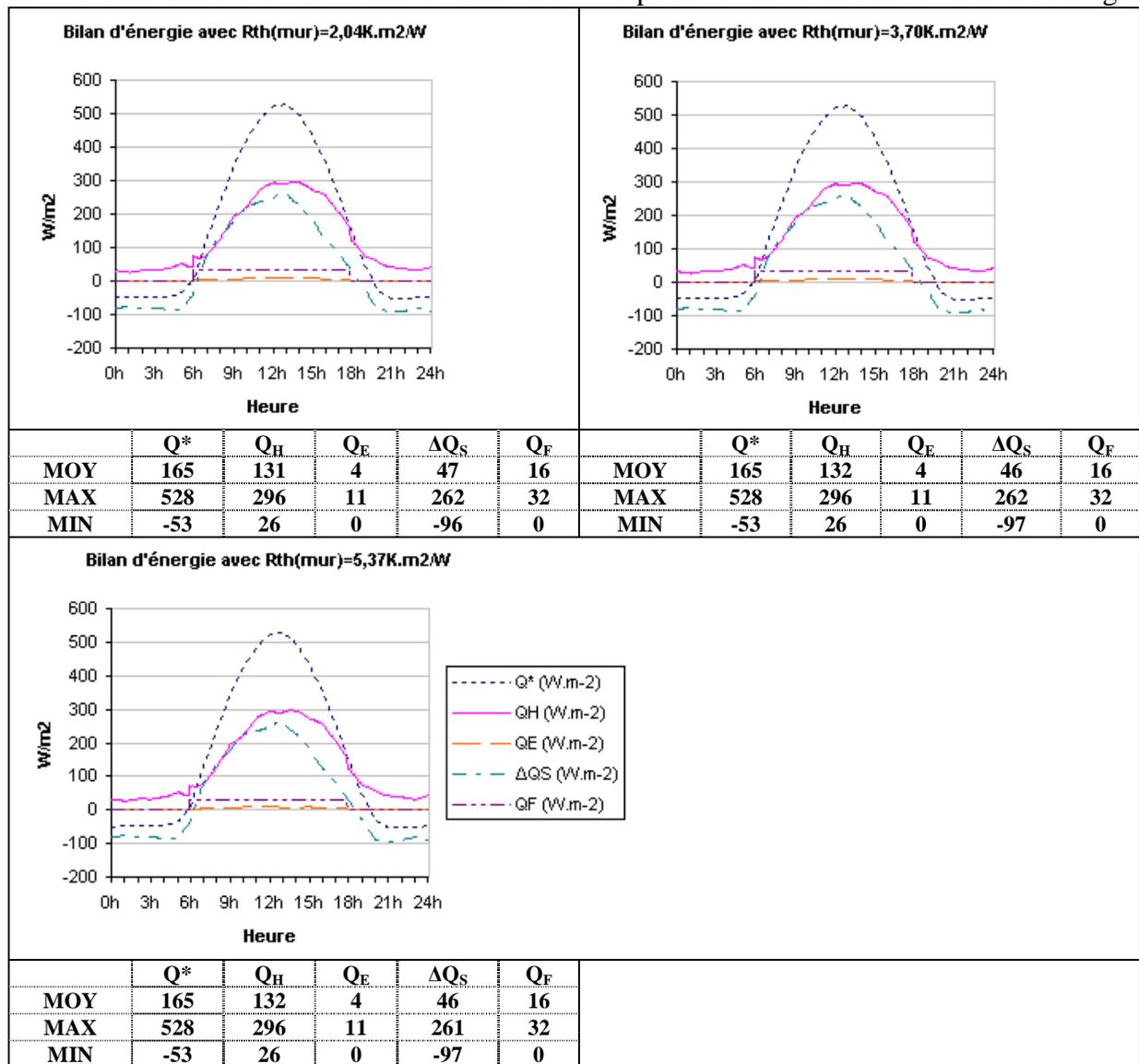


Tableau A 76 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des murs (juin 2006).

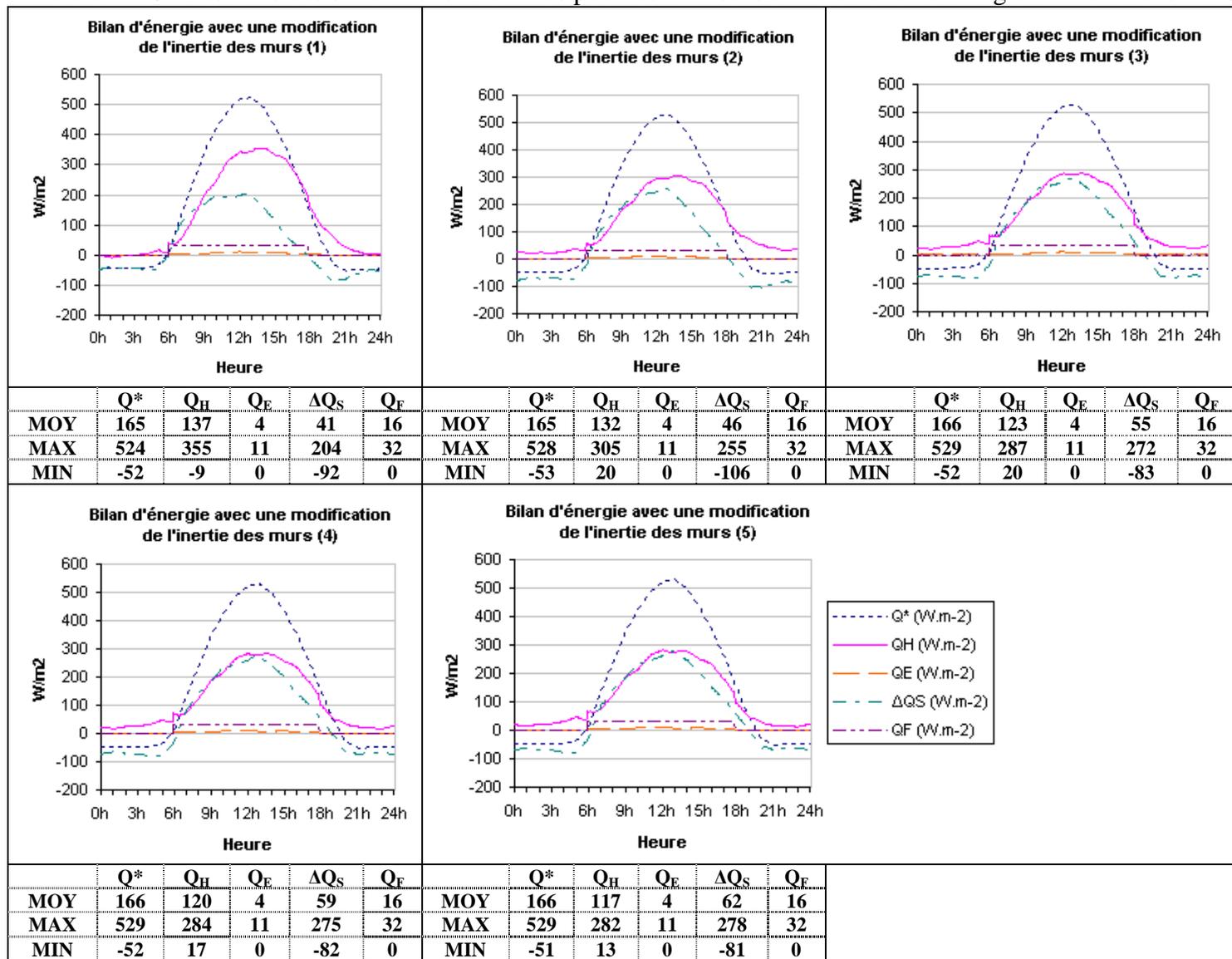


Tableau A 77 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'albédo des murs (juin 2006).

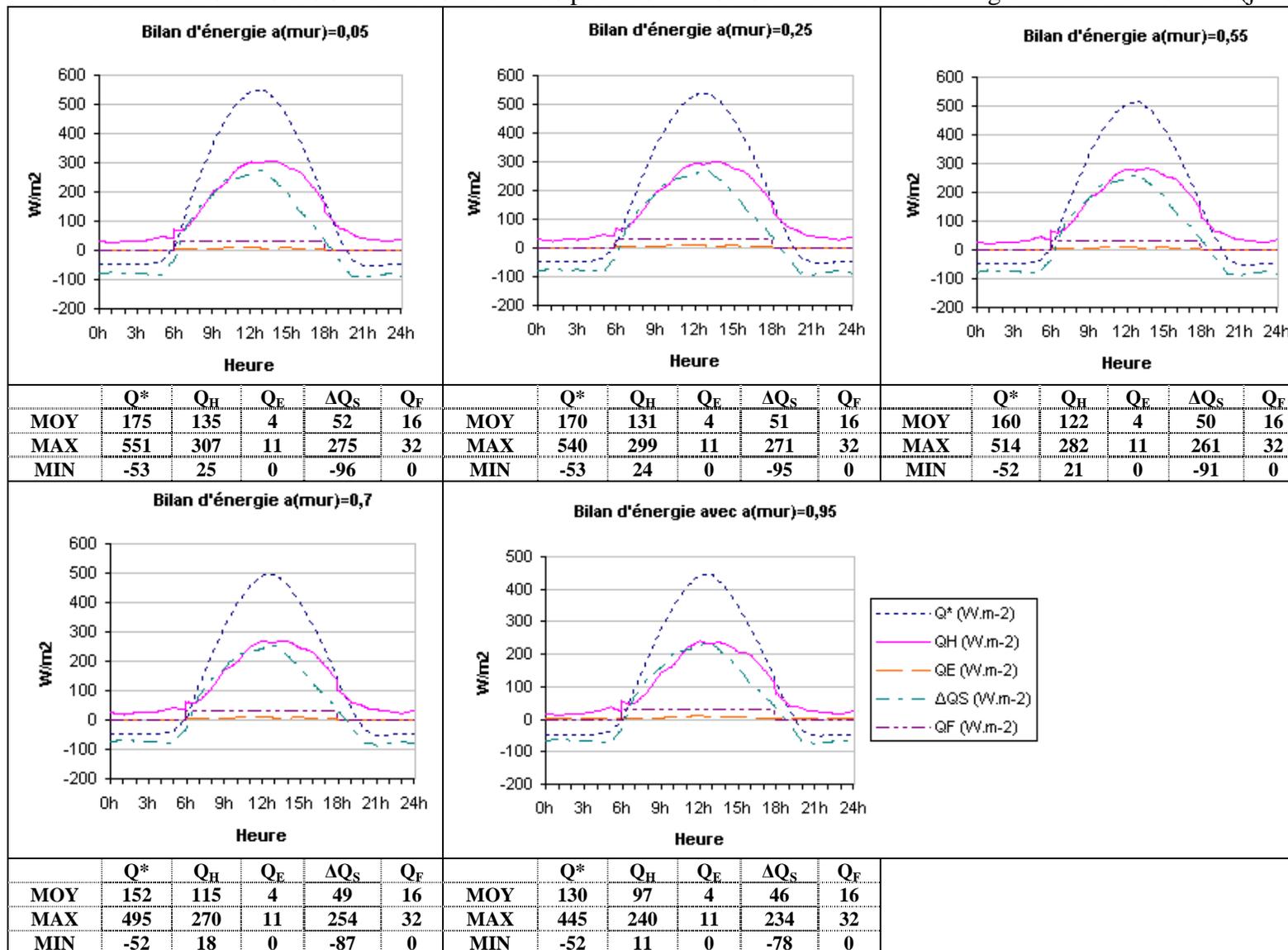


Tableau A 78 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité des murs (juin 2006).

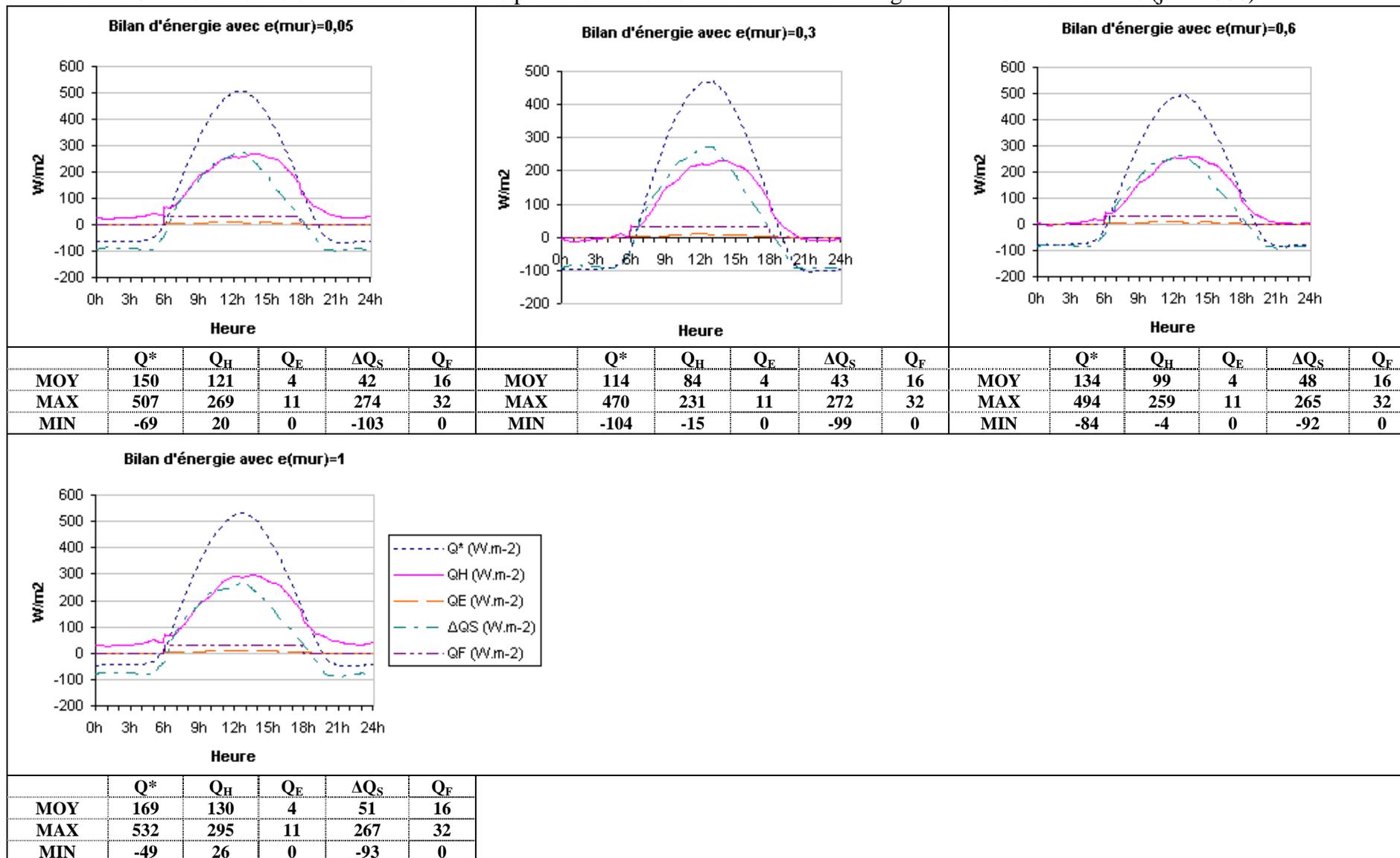


Tableau A 79 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'inertie des routes (juin 2006).

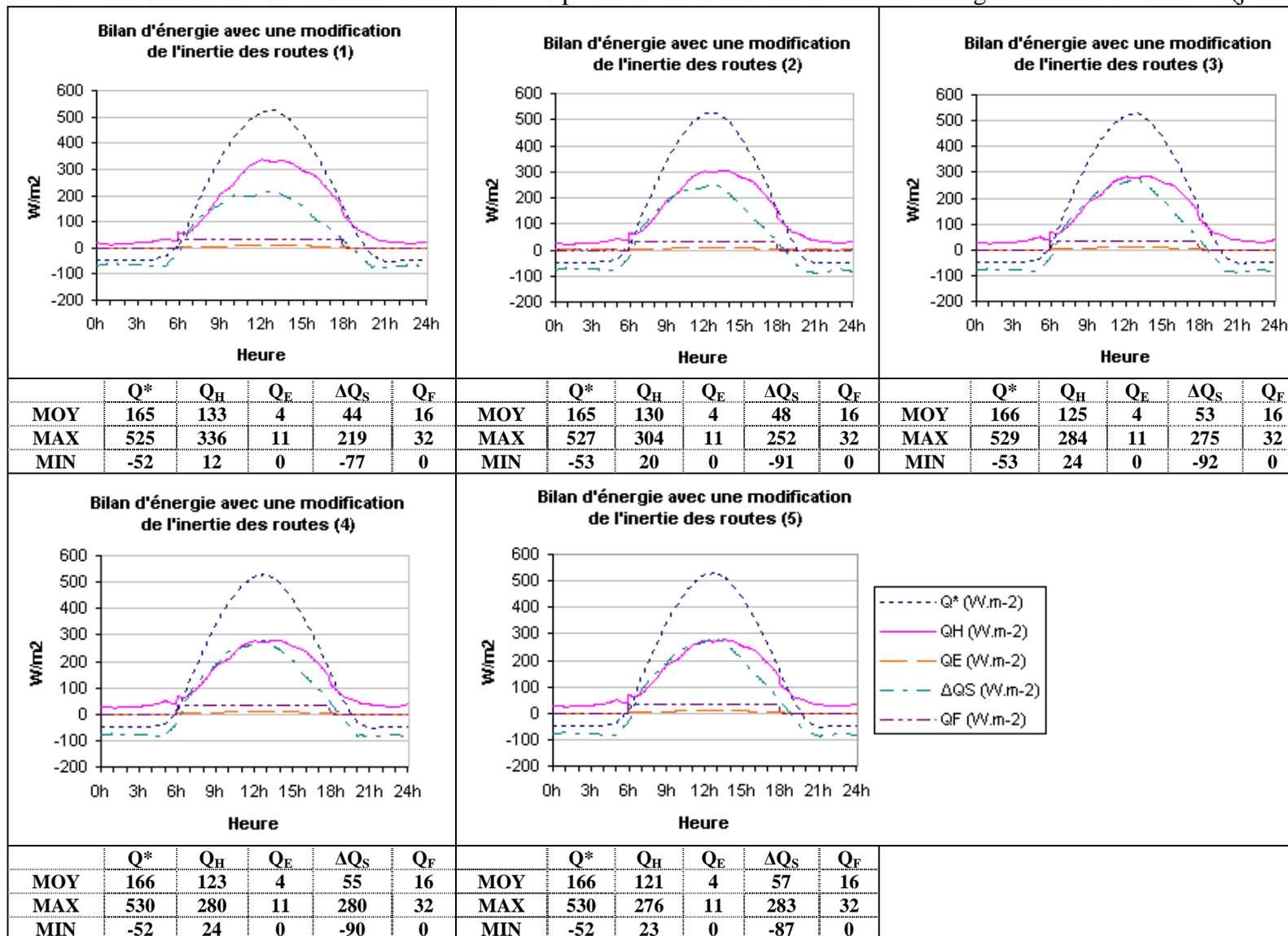


Tableau A 80 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'albédo des routes (juin 2006).

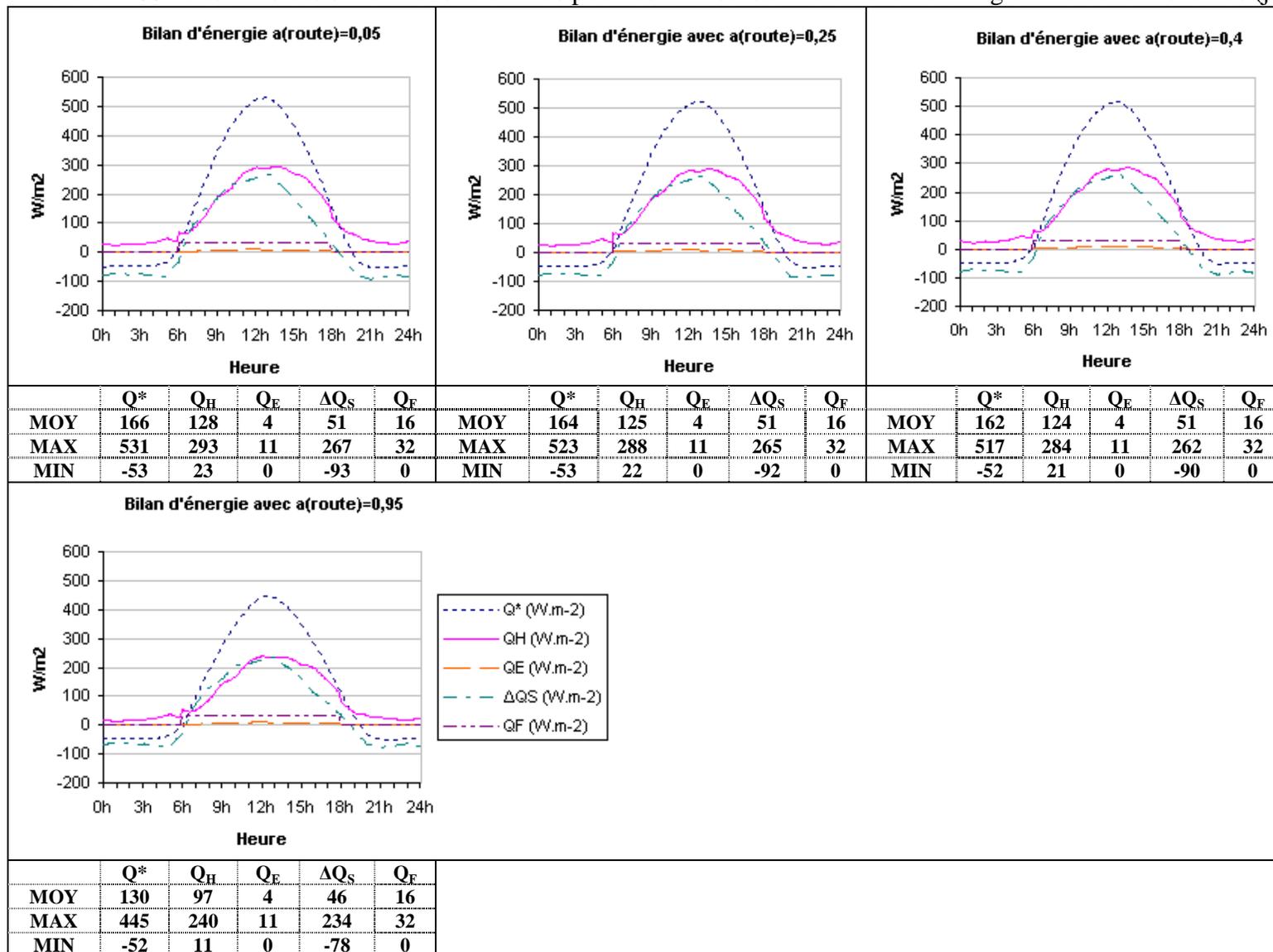


Tableau A 81 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'émissivité des rues (juin 2006).

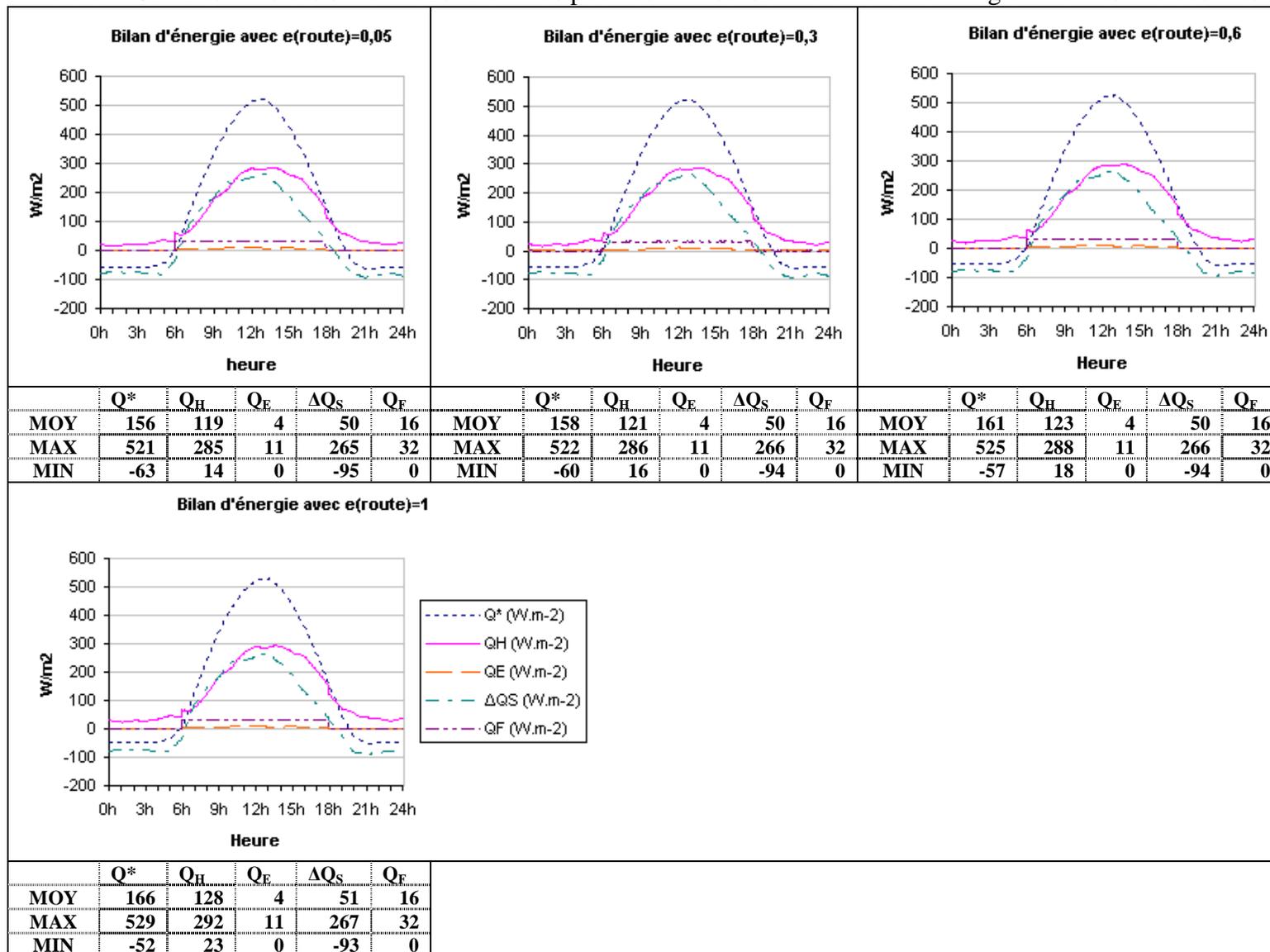


Tableau A 82 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie au flux de chaleur sensible lié au trafic (juin 2006).

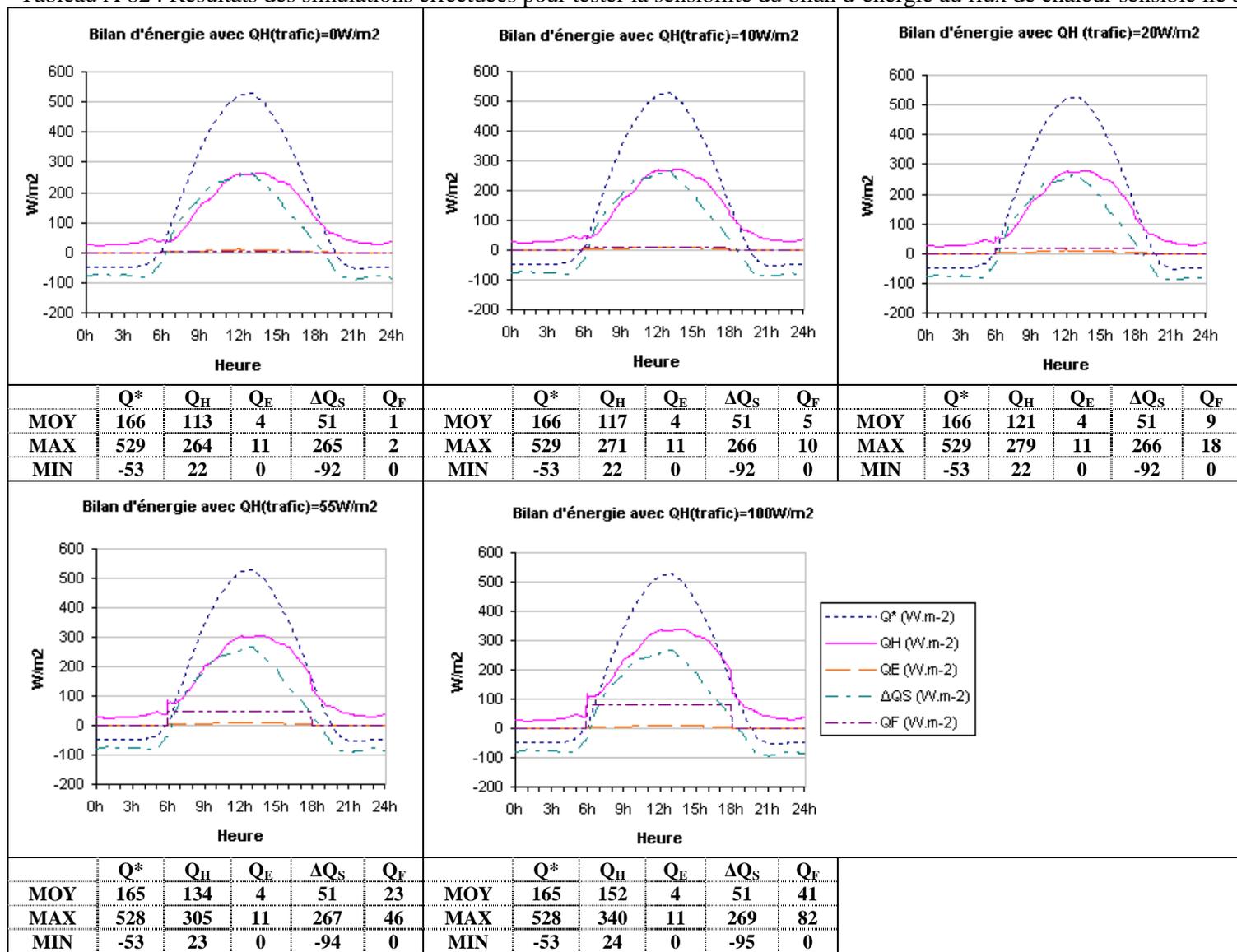


Tableau A 83 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie au flux de chaleur latente lié au trafic (juin 2006).

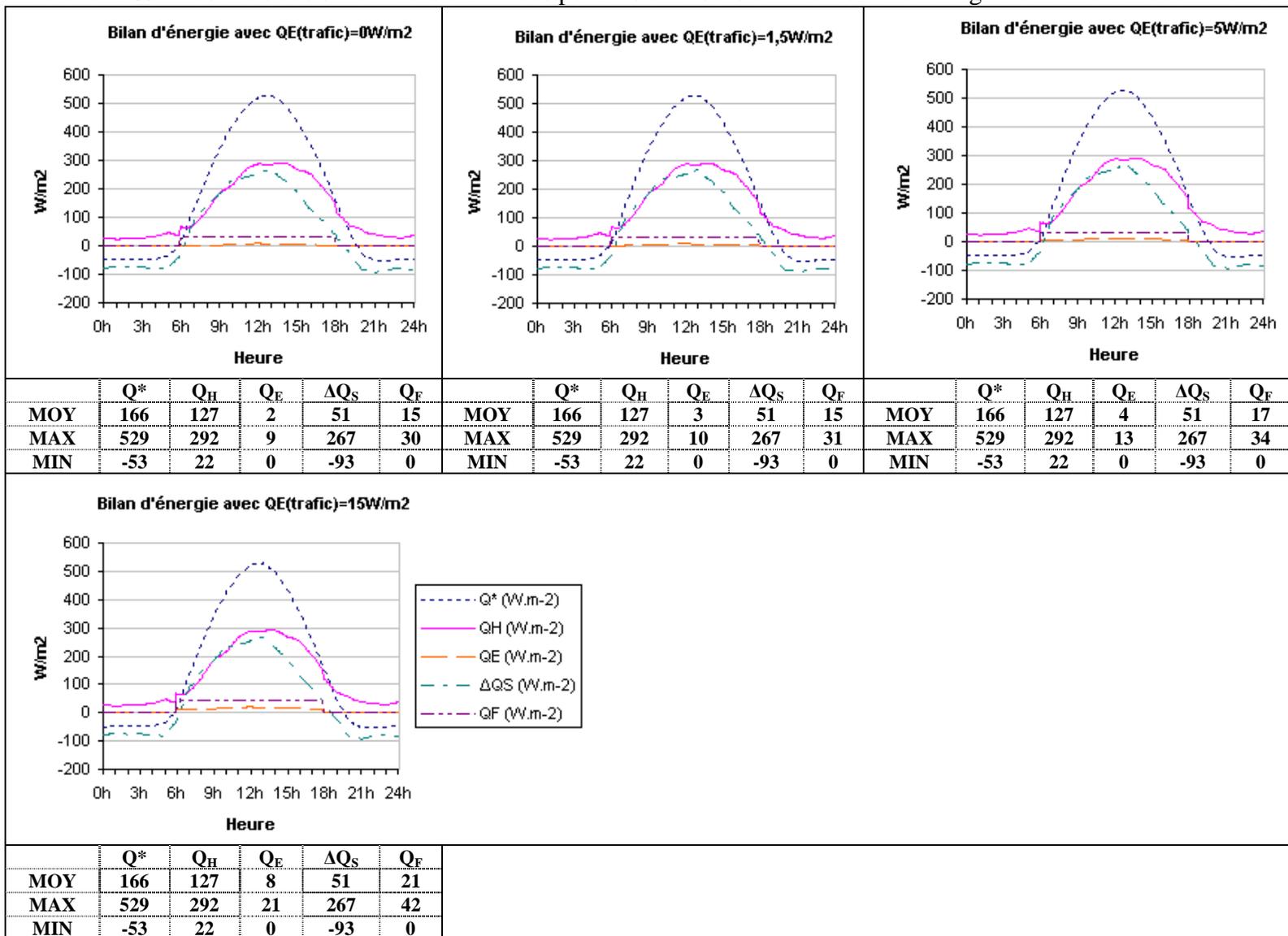


Tableau A 84 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie au flux de chaleur sensible et latente d'origine industrielle (juin 2006).

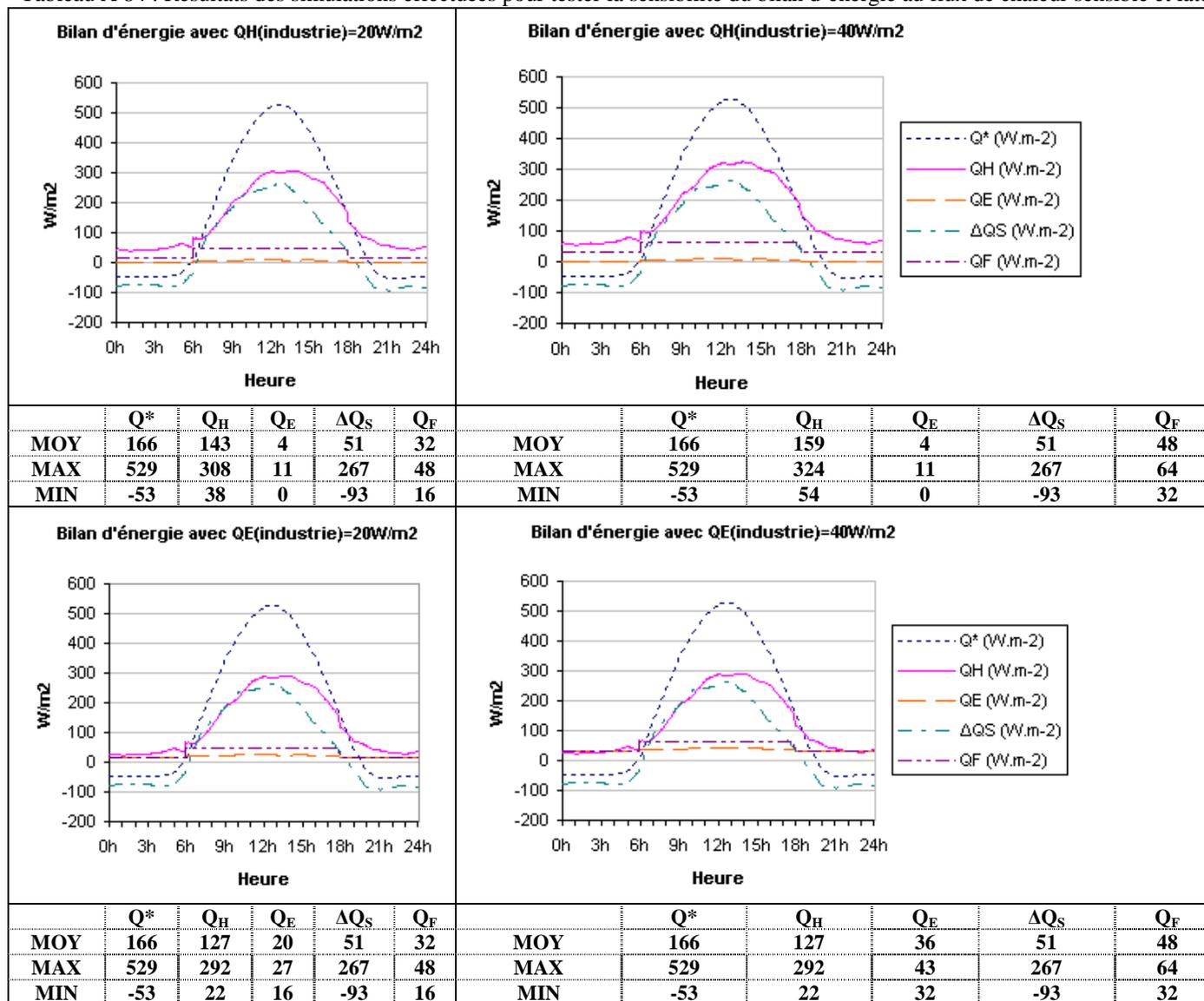


Tableau A 85 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à la structure du bâtiment (juin 2006).

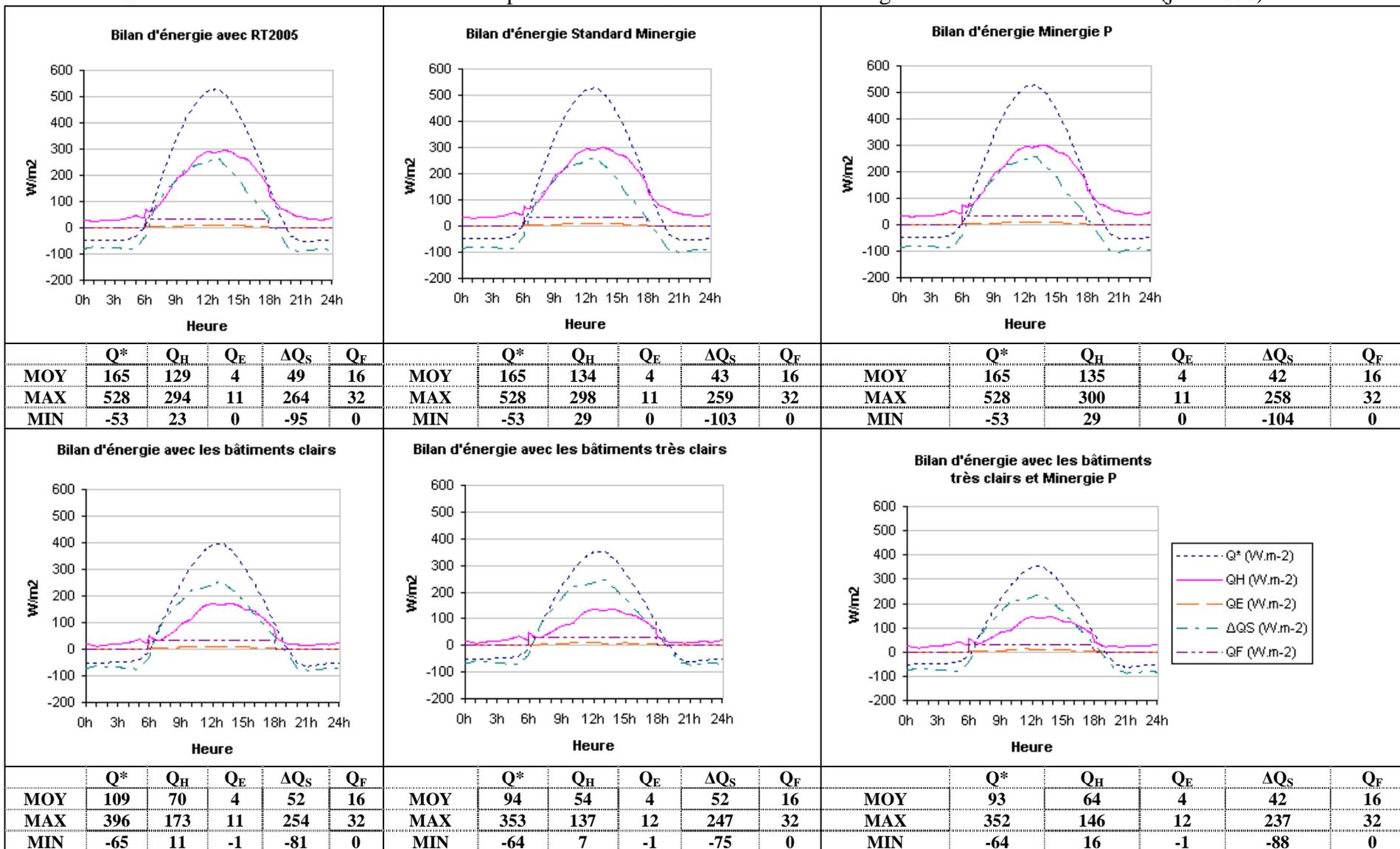
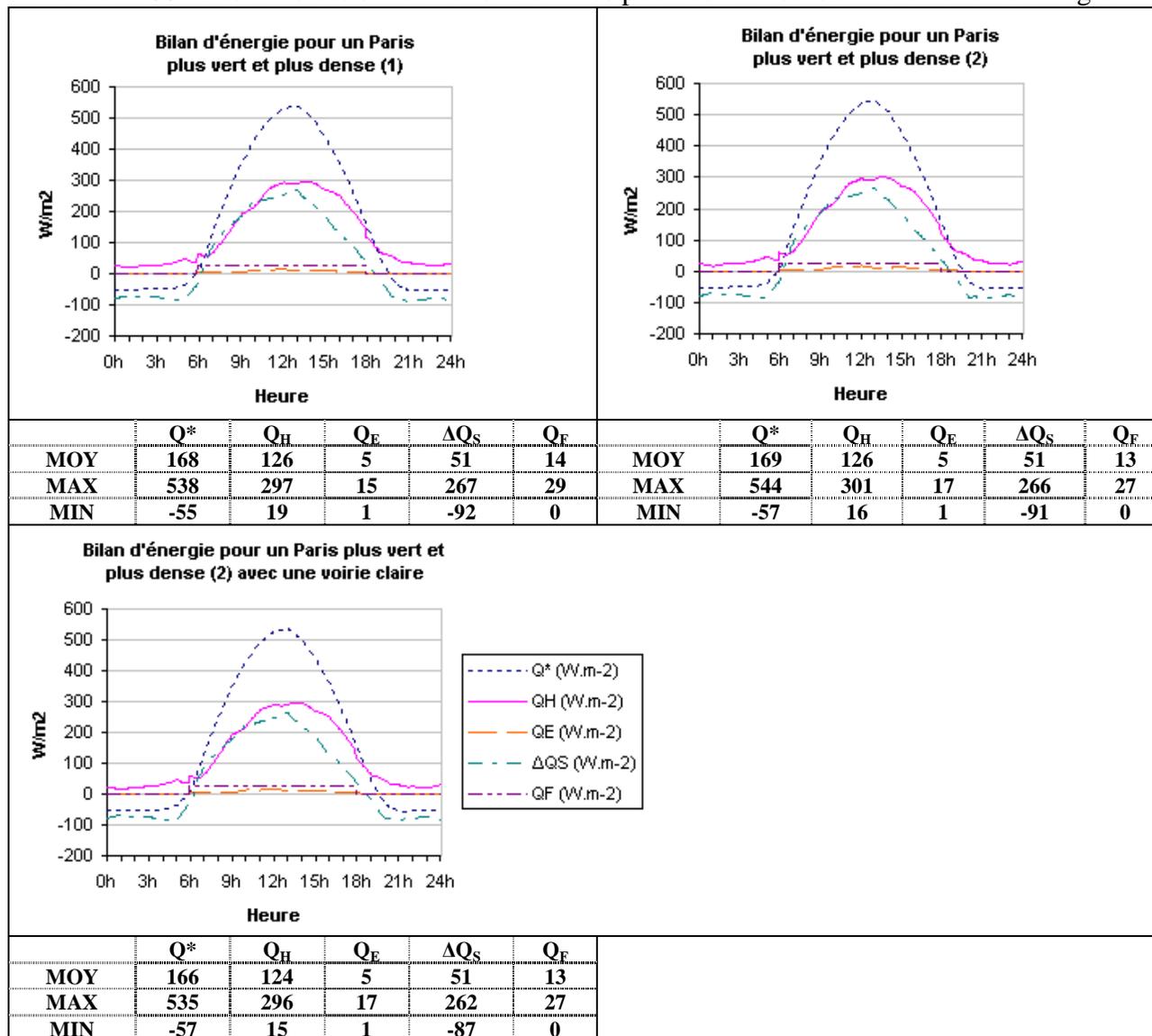


Tableau A 86 : Résultats des simulations effectuées pour tester la sensibilité du bilan d'énergie à l'organisation urbaine (juin 2006).



Annexe 14 Contexte législatif et juridique encadrant la protection et l'amélioration de l'environnement

Nous allons traiter au sein de cette annexe du contexte législatif et juridique encadrant la protection ou l'amélioration de l'environnement en abordant dans un premier temps les principales initiatives et politiques françaises en faveur de l'environnement puis en présentant l'initiative européenne en faveur de la prise en compte de l'environnement dans les plans et programme : la directive 2001/42/CE.

Les principales initiatives et politiques françaises en faveur de l'environnement

Dans son principe 1, la célèbre Déclaration de Stockholm de 1972 promet au rang de droit de l'homme le droit à un environnement de qualité : « *L'homme a un droit fondamental à la liberté, à l'égalité et à des conditions de vie satisfaisantes, dans un environnement dont la qualité lui permette de vivre dans la dignité et le bien-être. Il a le devoir solennel de protéger et d'améliorer l'environnement pour les générations présentes et futures.* ». En France, il faut attendre le 1^{er} mars 2005 pour que soit adoptée puis inscrite au Préambule de la Constitution de 1958 une Charte de l'environnement comportant dix articles reconnaissant les valeurs du développement durable et affirmant des droits et des devoirs en matière d'environnement. Cette charte formalise notamment le principe de précaution, l'obligation de prévenir les atteintes portées à l'environnement ou d'en limiter les conséquences, la réparation des dommages causés à l'environnement, etc.

La France n'a heureusement pas attendu cette Charte pour élaborer une politique en faveur de la protection de l'environnement et durant le XX^e siècle plusieurs lois françaises, concernant l'environnement et l'aménagement, se sont plus particulièrement attachées à « *protéger les milieux* », « *maitriser l'urbanisation* » quand ce n'est pas *l'interdire en certains endroits (les Parcs Naturels nationaux)* » (BELZITTI et SOUAMI, 2007).

Le point de départ à une meilleure prise en compte de l'environnement en France débute avec la création du ministère chargé de la Protection de la nature et de l'Environnement en 1971.

Les diverses évolutions de ce ministère²¹⁰ ont mené à la création en 2007 du Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire (MEEDDAT).

La série de textes législatifs promulgués suite à la création de ce ministère chargé de la Protection de la nature et de l'Environnement porte principalement sur la préservation des milieux (BELZITTI et SOUAMI, 2007). La loi du 10 juillet 1976 sur la protection de la nature, et qui introduit la procédure d'étude d'impact²¹¹, est un exemple de la nouvelle volonté de prévenir les incidences sur les milieux²¹².

Pour BELZITTI et SOUAMI (2007), ce n'est réellement qu'« à partir des années 1980 que l'environnement et certaines thématiques du développement durable ont véritablement été pris en compte dans les politiques nationales et locales, donnant lieu à la création de documents de planification intégrant ces problématiques. » Le développement de l'écologie urbaine, du thème de la qualité de vie et de l'environnement urbain a été accompagné par les « protocoles d'accord pour la prise en compte de l'environnement urbain », documents contractuels entre l'Etat et les collectivités, entre 1983 et 1989. Une dizaine d'expériences fut contractualisées (GOXE, 2007), dont une, par exemple, avec la ville de Bourges en 1984.

²¹⁰ « Le ministère chargé de la Protection de la nature et de l'Environnement resta en place de 1971 à 1974 et, d'abord rattaché au Premier ministre, conquiert peu à peu son autonomie. Une ambitieuse réforme, inspirée de l'exemple anglais, intervient en avril 1978, donnant lieu à la fusion de l'Environnement et de l'Equipement en un superministère, celui de l'Environnement et du Cadre de vie, qui resta en fonction jusqu'en 1981. [...] Au fil des années, des transferts de compétences ont renforcé les pouvoirs du ministère : compétence en matière d'eaux non maritimes, de paysage, de prévention des risques, de publicité et d'affichage. Le ministère est associé, par ailleurs, à l'élaboration de nombreuses politiques : urbanisme, espace rural et forestier, santé... Il exerce, de surcroît, des compétences dites conjointes, c'est-à-dire un rôle d'impulsion et de coordination interministérielle dans les domaines de l'eau, du bruit, de l'air, des espaces verts. » (MORAND-DEVILLER, 2006)

²¹¹ « Les études préalables à la réalisation d'aménagements ou d'ouvrage qui, par l'importance de leurs dimensions ou leurs incidences sur le milieu naturel, peuvent porter atteinte à ce dernier, doivent comporter une étude d'impact permettant d'en apprécier les conséquences » (droit de l'environnement, articles L. 122-1 et suivant ; et article 2 de la loi n°76-629 du 10 juillet 1976).

²¹² La loi n°76-629 du 10 juillet 1976 relative à la protection de la nature, fixe le principe de cette protection et affirme que le maintien des équilibres biologiques est d'intérêt général ; en conséquence les documents d'urbanisme doivent respecter les préoccupations environnementales sous peine d'illégalité. « La protection des espaces naturels et des paysages, la préservation des espèces animales et végétales, le maintien des équilibres biologiques auxquels ils participent et la protection des ressources naturelles contre toutes les causes de dégradation qui les menacent sont d'intérêt général. Il est du devoir de chacun de veiller à la sauvegarde du patrimoine naturel dans lequel il vit. Les activités publiques ou privées d'aménagement, d'équipement et de production doivent se conformer aux mêmes exigences. La réalisation de ces objectifs doit également assurer l'équilibre harmonieux de la population résidant dans les milieux urbains et ruraux. » (Article 1 de la loi n°76-629 du 10 juillet 1976)

« Les travaux et projets d'aménagement qui sont entrepris par une collectivité publique ou qui nécessitent une autorisation ou une décision d'approbation ainsi que les documents d'urbanisme doivent respecter les préoccupations d'environnement. [...] » (Article 2 de la loi n°76-629 du 10 juillet 1976)

Avec les lois de décentralisation de 1982 et 1983, les élus locaux disposent de prérogatives accrues. L'article 1^{er} de la loi n°83-8 du 7 janvier 1983 relative à la répartition des compétences pose en effet le principe selon lequel « *Les communes, les départements et les régions règlent par leurs délibérations les affaires de leur compétence. Ils concourent avec l'Etat à l'administration et à l'aménagement du territoire, au développement économique, social, sanitaire, culturel et scientifique, ainsi qu'à la protection de l'environnement et à l'amélioration du cadre de vie.* »²¹³.

En 1990, l'Etat élabore un Plan National de l'Environnement qui est suivi par une centaine de plans municipaux ou départementaux pour l'environnement. Selon BELZITTI et SOUAMI (2007), « *les actions entreprises dans ces plans sont très variées, allant de démarches ponctuelles à des politiques plus ambitieuses et globales* ». D'autres actions et démarches ont suivi avec plus ou moins de succès telles que les Chartes d'écologie urbaine et de la qualité de vie en 1992, la campagne 1 000 communes pour l'environnement urbain, ou encore les Chartes d'écologie (désormais Chartes d'environnement). Ce sont ces dernières qui ont été le plus étés mises en place par les communes et, selon BELZITTI et SOUAMI (2007), « *les plus récentes sont considérées comme de véritables outils de mise en œuvre du développement durable et elles sont basées sur trois principes : la démocratie, l'équité sociale et la solidarité écologique* »²¹⁴.

En 2003, l'Etat a poursuivi son action en rédigeant une stratégie nationale de développement durable. Concernant les territoires urbains et la ville durable, plusieurs grands objectifs sont ainsi fixés par l'Etat : diminuer le rythme de consommation par l'urbanisation d'espaces naturels et agricoles, diminuer la consommation énergétique des déplacements liés à la vie quotidienne des familles : éducation des enfants, travail, loisirs ; analyser la vulnérabilité des territoires aux contraintes énergétiques. Le rapport entre territoires urbains et ruraux est également mis en avant, la stratégie soulignant le fait que « *pour permettre un développement harmonieux de notre société, une complémentarité et des relations équilibrées doivent exister*

²¹³ Cet article a été abrogé par la loi n°96-142 du 21 février 1996, relative à la partie législative du code général des collectivités territoriales.

²¹⁴ « *La priorité est d'intégrer l'environnement dans tous les documents d'urbanisme afin de maîtriser l'urbanisation, de préserver les espaces naturels et ruraux et de planifier des zones mixtes et diversifiées. Il s'agit également de limiter les flux automobiles en favorisant l'intermodalité ainsi que le vélo et la marche, mais aussi de réaliser des économies (eau, énergie, déchets, matériaux de construction...) tout en impliquant la population. Cependant des difficultés sont apparus dans la mise en œuvre des actions de grande envergure, et ce notamment en raison d'un manque d'engagement et de l'inexistence des synergies nécessaires. Malgré tout, ces chartes ont eu un rôle pédagogique important auprès des municipalités puisqu'elles ont constitué une sorte « d'étape préalable » à l'Agenda 21, ce dernier étant un projet global pour la ville.* » (BELZITTI et SOUAMI, 2007)

entre les villes et le monde rural. ». Les collectivités territoriales sont alors identifiées comme des acteurs essentiels pour mettre en œuvre des politiques publiques concrètes de développement durable, et ce en adéquation avec les besoins quotidiens des citoyens : « *Elles sont à même de favoriser un développement articulant les politiques de développement économique, d'actions sociales et culturelles, d'urbanisme, de déplacements, d'habitat et d'environnement dont elles ont les compétences. Leurs actions peuvent être plus facilement mises en cohérence autour de la notion de projet.* »

A partir des années 1990, plusieurs lois, de plus ou moins grande envergure, vont venir sensibiliser les français, penser l'aménagement au-delà du court terme et de la dizaine d'années, insister sur la nécessité d'intégrer l'environnement, et, plus globalement, le développement durable, dans la législation et la planification urbaine. Parmi les plus importantes, nous retiendrons la loi d'Orientation sur l'Aménagement et le Développement Durable des Territoires (LOADDT ou loi Voynet) du 25 juin 1999 et la loi Solidarité et Renouvellement Urbain (SRU) du 13 décembre 2000²¹⁵.

La loi d'Orientation sur l'Aménagement et le Développement Durable des Territoires a défini de nouveaux territoires de projet : les Agglomérations, les Pays²¹⁶ et les Parcs Naturels Régionaux. Ces territoires peuvent se doter d'un projet d'aménagement et de développement durable. La LOADDT met en avant la volonté d'optimiser les ressources sur le long terme, en combinant préservation de l'environnement, efficacité économique et équité sociale sur des territoires dits « de projet ». Ces territoires regroupent plusieurs communes qui définissent ensemble des choix stratégiques, des objectifs de développement économique, social, culturel, touristique, par le biais de schémas de service collectifs établis dans plusieurs domaines (enseignement supérieur et recherche, santé, sport, énergie, espaces naturels et ruraux, culture, information et communication, transport de voyageurs et de marchandises). Ces communes s'offrent ainsi un cadre de référence commun et une structuration collective des territoires sur le long terme.

²¹⁵ La loi d'Orientation pour la Ville (loi LOV) du 13 juillet 1991, qui a pour objectif de lutter contre la ségrégation sociale et spatiale en favorisant la mixité sociale et fonctionnelle et de diversifier l'offre de logements, aura une grande importance pour la mise en œuvre d'une politique urbaine plus en accord avec les principes du développement durable. Cette loi s'accompagnera de la création d'un nouvel outil : le Programme Local de l'Habitat (PLH).

²¹⁶ « *Lorsqu'un territoire présente une cohésion géographique, culturelle, économique ou sociale, il peut être reconnu à l'initiative de communes ou de leurs groupements comme ayant vocation à former un pays.* » (Article 22 de la loi d'Orientation sur l'Aménagement et le Développement Durable des Territoires (LOADDT))

La loi Solidarité et Renouvellement Urbains, modifiée par la loi n° 2003-590 « Urbanisme et Habitat » du 2 juillet 2003, a profondément rénové le cadre des politiques d'aménagement. Elle a renforcé les obligations légales des collectivités territoriales en matière de prise en compte de l'environnement dans l'élaboration de leurs documents d'urbanisme et s'est articulée autour de trois exigences : exigence de solidarité ; développement durable ; renforcement de la démocratie et de la décentralisation. La loi SRU a introduit de nouvelles exigences relatives à l'état initial de l'environnement, l'évaluation des incidences prévisibles des orientations du schéma ou du plan sur l'environnement et la manière dont le document prend en compte la préservation et la mise en valeur de l'environnement. Elle a également introduit la démocratisation des procédures à travers la généralisation de la concertation et de l'enquête publique. Ainsi le Schéma de Cohérence Territoriale (SCOT) a remplacé les anciens Schémas Directeurs (SD)²¹⁷, les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU) ont succédé au Plan d'Occupation des Sols (POS) et la carte communale est devenu un véritable document d'urbanisme pour les petites communes dépourvues de PLU.

La loi SRU propose (ou renforce) également de nouveaux documents de renouvellement urbain et de gestion du développement, des plans thématiques et opérationnels, tels les Plans de Déplacements Urbains (PDU), les Programmes Locaux de l'Habitat (PLH), les Schémas d'équipement commercial, les Opérations de Renouvellement Urbain. Elle favorise également une utilisation plus rationnelle des espaces et décourage la poursuite d'un urbanisme périphérique diffus, le développement de l'étalement urbain. Elle a aussi introduit la démocratisation des procédures à travers la généralisation de la concertation et de l'enquête publique.

Ces lois s'accompagnent d'autres lois plus sectorielles qui génèrent elles-aussi des outils de planification opposable aux tiers. Nous pouvons citer par exemple :

- La loi d'Orientation sur les Transports intérieurs (LOTI) du 30 décembre 1982 (loi n°82-1153) instaure le Plan de Déplacements Urbains (PDU), plan qui définit les objectifs en matière de transport de passagers et de marchandises à l'échelle de

²¹⁷« Les schémas de cohérence territoriale qui succèdent aux anciens schémas directeurs (SD) réforment profondément les approches de planification urbaine en privilégiant leur caractère stratégique. Les élus définissent ensemble l'évolution de l'agglomération et les priorités en matière d'habitat, de commerce, de zones d'activité, de transports alors que les SD portaient essentiellement sur la destination des sols sans prendre en compte les autres politiques au niveau de l'agglomération (urbanisme, logement, déplacement). Ils sont, par ailleurs, soumis à enquête publique avant approbation et feront l'objet d'un examen périodique. Leur élaboration et révision ont été simplifiées mais conditionne désormais l'ouverture à l'urbanisation des zones naturelles et des zones d'urbanisation future des délimitées par les PLU. » (ADEME, 2003)

l'agglomération et dont le principal objectif doit être la maîtrise de la circulation automobile en centre-ville et l'amélioration de l'offre des transports en commun, ainsi que le Schéma Régional des Transports (SRT) dont l'objectif prioritaire est, selon la LOTI, est « *d'optimiser les réseaux et équipements existants et de favoriser la complémentarité entre les modes de transport et la coopération entre les opérateurs, en prévoyant, lorsque nécessaire, la réalisation d'infrastructures nouvelles* »

- La loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie (LAURE) du 30 décembre 1996 (loi n°96-1236), a pour objectif la mise en place de mesures d'amélioration de la qualité de l'air²¹⁸. Elle va entre autres rendre obligatoire pour toute ville ou agglomération de plus de 100 000 habitants la mise en place d'un PDU. Elle instaure également les Plans de Protection de l'Atmosphère (PPA) et les Plans Régionaux pour la Qualité de l'Air (PRQA) qui fixe les orientations à moyen et long terme permettant de prévenir ou de réduire la pollution atmosphérique afin d'atteindre les objectifs de la qualité de l'air définis dans ce même plan. La loi LAURE va également imposer que le PDU soit compatible avec le PRQA.
- La loi n°92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets et aux installations classées pour la protection de l'environnement (modifiant la loi du 15 juillet 1975), a notamment pour objet « *De prévenir ou réduire la production et la nocivité des déchets, notamment en agissant sur la fabrication et sur la distribution des produits ; D'organiser le transport des déchets et de le limiter en distance et en volume ; De valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toute autre action visant à obtenir à partir des déchets des matériaux réutilisables ou de l'énergie ; D'assurer l'information du public sur les effets pour l'environnement et la santé publique des opérations de production et d'élimination des déchets, sous réserve des règles de confidentialité prévues par la loi, ainsi que sur les mesures destinées à en prévenir ou à en compenser les effets préjudiciables.* » Elle instaure notamment les plans d'élimination des déchets ménagers et assimilés (PEDMA).

²¹⁸ Article 1 : « *L'objectif est la mise en œuvre du droit reconnu à chacun à respirer un air qui ne nuise pas à sa santé. Cette action d'intérêt général consiste à prévenir, à surveiller, à réduire ou à supprimer les pollutions atmosphériques, à préserver la qualité de l'air et, à ces fins, à économiser et à utiliser rationnellement l'énergie.* »

Article 2 : « *Constitue une pollution atmosphérique au sens du présent titre l'introduction par l'homme, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives excessives.* »

- La loi sur l'eau du 3 Janvier 1992 instaure la mise en place de Schéma Directeur D'aménagement et De Gestion de l'Eau (SDAGE), élaborés pour chacun des grands bassins hydrographiques français par les comités de bassin, et de Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SAGE), élaborés à une échelle plus locale (bassin versant d'une rivière, système aquifère, etc.). Le SDAGE détermine les orientations fondamentales d'une gestion équilibrée de la ressource en eau et les aménagements à réaliser pour les atteindre. Cette loi sur l'eau instaure également l'élaboration de Schéma Directeur d'Assainissement (SDA) qui sont des études spécifique qui définissent au sein d'une commune, pour le court et le long terme, les modalités de collecte et de traitement des eaux usées sur leur territoire, ainsi que les moyens d'élimination des sous-produits de l'épuration.
- La loi n°95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement, dite loi Barnier²¹⁹, instaure les Plans de Prévention des Risques (PPR).
- La loi n°93-24 du 8 janvier 1993 relative à la protection et la mise en valeur des paysages instaure les Chartes paysagères (document de référence, élaboré par la Région, permettant aux collectivités et acteurs socio-économiques de conduire des actions de valorisation du paysage), chartes qui sont réalisées sur la base d'inventaires et de diagnostics paysagers territoriaux et qui identifient les caractères paysagers des territoires, mais aussi leurs dynamiques d'évolutions et les enjeux et menaces qui les touchent, et le plan de Paysage (qui est la traduction des orientations stratégiques choisies dans la charte paysagère ou, si celle-ci n'existe pas encore, peut déboucher sur la création d'une charte paysagère)

²¹⁹ « Les espaces, ressources et milieux naturels, les sites et paysages, les espèces animales et végétales, la diversité et les équilibres biologiques auxquels ils participent font partie du patrimoine commun de la nation. Leur protection, leur mise en valeur, leur restauration, leur remise en état et leur gestion sont d'intérêt général et concourent à l'objectif de développement durable qui vise à satisfaire les besoins de développement des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Elles s'inspirent, dans le cadre des lois qui en définissent la portée, des principes suivants : le principe de précaution, selon lequel l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable ; le principe d'action préventive et de correction, par priorité à la source, des atteintes à l'environnement, en utilisant les meilleures techniques disponibles à un coût économiquement acceptable ; le principe pollueur-payeur, selon lequel les frais résultant des mesures de prévention, de réduction de la pollution et de lutte contre celle-ci doivent être supportés par le pollueur ; le principe de participation, selon lequel chaque citoyen doit avoir accès aux informations relatives à l'environnement, y compris celles relatives aux substances et activités dangereuses. » (Article 1 de la loi Barnier)

- La loi n°85-696 du 11 juillet 1985 relative à l'urbanisme au voisinage des aérodromes instaure la mise en place de plan d'exposition au bruit (PEB) dont l'objectif est d'interdire ou de limiter les constructions, et ne pas augmenter les populations soumises aux nuisances. Le PEB vise ainsi un développement maîtrisé des communes autour des aéroports.

Parallèlement, la loi n°99-586 du 12 juillet 1999 relative au renforcement et à la simplification de la coopération intercommunale, dite loi Chevènement, vient fournir les outils de décentralisation nécessaires et indispensables à la mise en œuvre des principes d'équilibre, de solidarité, d'efficacité économique et de protection de l'environnement posés par la LOADDT. Elle permet un processus de regroupement des communes autour d'un projet commun de développement. Une nouvelle catégorie d'établissement public de coopération intercommunale est créée avec les communautés d'agglomération et leur vocation est de rationaliser et de structurer les aires urbaines dans une optique d'efficacité renforcée et d'exercice des compétences à une échelle de territoire pertinente. La loi Chevènement limite à trois les types de structure intercommunale (contre cinq auparavant) :

- la communauté de communes, qui concerne les milieux faiblement urbanisés ou urbanisation diffuse),
- la communauté d'agglomération, (regroupant des communes formant un ensemble de plus de 50.000 habitants d'un seul tenant et sans enclave)
- la communauté urbaine (regroupant des communes formant un ensemble de plus de 500.000 habitants d'un seul tenant et sans enclave et visant à favoriser l'émergence de métropoles régionales d'équilibre).

La loi Chevènement rationalise la coopération intercommunale et redistribue les compétences, en particulier celles d'urbanisme et de gestion des déplacements. Comme le signale l'ADEME (2003), *« l'aménagement de l'espace et les actions de développement économique sont des compétences exercées de plein droit par l'ensemble des structures créées. Pour la Communauté d'agglomération s'y rajoutent l'équilibre social de l'habitat, la politique de la ville. Si les compétences relatives à la protection et la mise en valeur de l'environnement et à la politique du cadre de vie ainsi qu'à la gestion des services d'intérêt collectif (eau, assainissement) sont exercées de plein droit par les communautés urbaines, elles restent optionnelles pour les Communautés d'agglomération et les Communautés de communes. »*

En 2004, l'Etat élabore son Plan Climat, qui constitue alors un « *plan d'actions du gouvernement pour être à la hauteur du défi majeur que constitue le changement climatique, dès 2010, en respectant l'objectif du Protocole de Kyoto, voire en le dépassant légèrement.* »

Le Plan Climat s'appuie sur huit orientations fortes : Une campagne nationale sur le changement climatique et l'adaptation ; les transports durables ; le bâtiment et l'écohabitat ; l'industrie, l'énergie et les déchets ; l'agriculture durable et les forêts ; la climatisation durable ; les plans climats territoriaux et l'Etat exemplaire ; et la recherche, l'international et la prospective après 2010. L'intérêt grandissant autour de la problématique du changement climatique, de la raréfaction de l'énergie et plus globalement de l'environnement a pour conséquence la mise en place du Grenelle de l'Environnement. Lancé en 2007, ce grenelle de l'environnement a réuni l'Etat et les représentants de la société civile afin de définir une feuille de route en faveur de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables. Six groupes de travail ont réfléchi à des plans d'action sur les thèmes ; « lutter contre les changements climatiques et maîtriser la demande d'énergie » ; « préserver la biodiversité et les ressources naturelles » ; « instaurer un environnement respectueux de la santé » ; « adopter des modes de production et de consommation durables » ; « construire une démocratie écologique » ; « promouvoir des modes de développement écologiques favorables à l'emploi et à la compétitivité ». Pour renforcer les compétences du ministère chargé de l'environnement et du développement durable, le ministère de l'Ecologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire a été créé le 1^{er} juin 2007 et le président de la République l'a distingué en nommant à sa tête un ministre d'Etat, montrant ainsi que l'action de ce ministère est considérée comme une priorité gouvernementale.

Une initiative européenne en faveur de la prise en compte de l'environnement dans les plans et programme : la directive 2001/42/CE

L'ordonnance n°2004-489 du 3 juin 2004 transposant la directive européenne 2001/42 du 27 juin 2001 relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement va rendre obligatoire l'évaluation environnementale de certains plans, schémas, programmes et autres documents de planification.

Cette directive européenne signale entre autres que « *l'évaluation environnementale est un outil important d'intégration des considérations en matière d'environnement dans l'élaboration et l'adoption de certains plans et programmes susceptibles d'avoir des incidences notables sur l'environnement dans les États membres, parce qu'elle assure que ces*

incidences de la mise en œuvre des plans et des programmes sont prises en compte durant l'élaboration et avant l'adoption de ces derniers. » et que « l'adoption de procédures d'évaluation des incidences sur l'environnement au niveau de l'établissement des plans et des programmes devrait être bénéfique aux entreprises en créant un cadre plus cohérent pour le déploiement des activités économiques en incluant des informations environnementales pertinentes dans les prises de décision ; la prise en compte d'un plus grand nombre de facteurs dans le processus de décision doit contribuer à des solutions plus durables et plus efficaces. ».

Ainsi, suite à l'ordonnance n°2004-489 du 3 juin 2004, une évaluation environnementale est exigée pour les plans, schémas, programmes et autres documents de planification adoptés par l'Etat, les collectivités territoriales ou leurs groupements et les établissements publics en dépendant, relatifs à l'agriculture, à la sylviculture, à la pêche, à l'énergie ou à l'industrie, aux transports, à la gestion des déchets ou à la gestion de l'eau, aux télécommunications, au tourisme ou à l'aménagement du territoire qui ont pour objet de fixer des prescriptions ou des orientations avec lesquelles doivent être compatibles les travaux et projets d'aménagement entrant dans le champ d'application de l'étude d'impact. Cette évaluation environnementale comporte l'établissement d'un rapport qui identifie, décrit et évalue les effets notables que peut avoir la mise en œuvre du plan ou du document sur l'environnement. Ce rapport présente les mesures prévues pour réduire et, dans la mesure du possible, compenser les incidences négatives notables que l'application du plan peut entraîner sur l'environnement. Il expose les autres solutions envisagées et les raisons pour lesquelles, notamment du point de vue de la protection de l'environnement, le projet a été retenu.

Les documents devant faire l'objet d'une évaluation environnementale sont les suivants : Les directives territoriales d'aménagement (DTA) ; Le schéma directeur de la région d'Ile-de-France (SDRIF) ; Les schémas de cohérence territoriale (SCOT) ; Les plans locaux d'urbanisme (PLU) susceptibles d'avoir des effets notables sur l'environnement compte tenu de la superficie du territoire auxquels ils s'appliquent²²⁰, de la nature et de l'importance des travaux et aménagements qu'ils autorisent et de la sensibilité du milieu dans lequel ceux-ci doivent être réalisés. Sauf dans le cas où elle ne prévoit que des changements mineurs, la

²²⁰ Ce sont plus précisément les PLU ayant une incidence sur un site Natura 2000 ou non couverts par un SCOT mais présentant : Une superficie supérieure ou égale à 5000 hectares et comprenant une population supérieure ou égale à 10 000 habitants ; Une ouverture à l'urbanisation supérieure à 200 hectares ; Une ouverture à l'urbanisation supérieure à 50 hectares pour les communes littorales ; Une unité touristique nouvelle en zone de montagne.

révision de ces documents donne lieu soit à une nouvelle évaluation environnementale, soit à une actualisation de l'évaluation environnementale réalisée lors de leur élaboration.

Cette procédure modifie profondément le contenu du rapport de présentation des documents concernés. Elle est aussi un moyen d'enrichir et d'améliorer les projets constitutifs des SCOT et des PLU. Comme le signale la Circulaire UHC/PA2 n°2006-16 du 6 mars 2006 relative à l'évaluation des incidences de certains documents d'urbanisme sur l'environnement, *« l'évaluation environnementale figure dans le rapport de présentation du document d'urbanisme. La prise en compte de l'environnement ne constitue cependant que l'un des aspects de ce rapport de présentation ; l'exposé du diagnostic général du territoire au regard des besoins répertoriés, l'explication des choix retenus pour établir le projet d'aménagement et de développement durable ainsi que les raisons des orientations générales ou des règles retenues qui étaient exigées avant l'entrée en vigueur des textes relatifs à la procédure d'évaluation environnementale, sont bien entendu maintenus compte tenu de l'objet des documents d'urbanisme. »*

Le rapport de présentation devra en particulier comporter selon la Circulaire UHC/PA2 n°2006-16 du 6 mars 2006 relative à l'évaluation des incidences de certains documents d'urbanisme sur l'environnement les éléments suivants :

- une analyse de l'état initial de l'environnement et des perspectives de son évolution examinant notamment les perspectives d'évolution des zones susceptibles d'être touchées de manière notable par la mise en œuvre du SCOT ou du PLU ;
- une analyse des incidences notables et prévisibles de la mise en œuvre du SCOT ou du PLU sur l'environnement et leurs conséquences sur la protection des zones revêtant une importance particulière pour l'environnement sont à traiter de façon très attentive ;
- une description de l'articulation du document (SCOT ou PLU) avec les autres documents d'urbanisme et les plans ou programmes soumis à évaluation environnementale en application du code de l'environnement, avec lesquels il doit être compatible ou qu'il doit prendre en considération ;
- dans l'hypothèse où plusieurs variantes ont été envisagées pour établir le projet d'aménagement et de développement durable, une explication et une justification des choix retenus et des raisons pour lesquelles des projets alternatifs ont été écartés. Il

n'est cependant pas nécessaire de développer tous les partis d'aménagement différents. Seuls les projets effectivement envisagés doivent être expliqués. Le rapport doit expliquer en quoi les choix retenus prennent en compte les objectifs de protection de l'environnement établis au niveau international, communautaire ou national ;

- une présentation des mesures envisagées pour éviter, réduire et si possible, compenser s'il y a lieu, les conséquences dommageables de la mise en œuvre du document d'urbanisme sur l'environnement et le rappel que ce document fera l'objet d'une analyse des résultats de son application, notamment en ce qui concerne l'environnement, au plus tard à l'expiration d'un délai de dix ans à compter de son approbation. Il convient d'abord de prévoir les mesures permettant d'éviter ou de réduire les conséquences dommageables sur l'environnement de la mise en œuvre du document, le recours aux mesures compensatoires ne devant être que supplétif et non systématique. Les mesures compensatoires éventuelles peuvent résulter du projet lui-même. Elles ne peuvent être envisagées que dans les domaines que réglemente le document d'urbanisme, et non dans d'autres domaines, tels que la production agricole ou forestière ;
- enfin un résumé non technique des éléments de l'évaluation environnementale et une description de la manière dont cette évaluation a été effectuée. Lors de l'enquête publique, le public pourra ainsi appréhender plus aisément la démarche d'évaluation environnementale.

Cette directive permet ainsi d'intégrer des considérations environnementales dans le processus de décision et par voie de conséquence d'assurer une meilleure protection de l'environnement, mais également de fournir un cadre aux collectivités locales et une meilleure information vis-à-vis du public. En effet, pour ce dernier point, la plupart des documents d'urbanisme font l'objet d'une enquête publique ce qui permettra au public de prendre connaissance de l'évaluation environnementale.



Figure A 46 : Domaines environnementaux pouvant concernés l'évaluation environnementale (Ministère de l'équipement et Ministère de l'Ecologie et du développement Durable, 2007).

Annexe 15 Grille RST₀₂

La grille RST₀₂ a été élaborée par le Réseau Scientifique et Technique (RST) associant la Direction générale de l'urbanisme, de l'habitat et de la construction (DGHHC/MAD), les Centres d'études techniques de l'équipement (CETE) et le Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU). La grille RST₀₂ est un outil d'analyse multicritère qui s'adresse aux collectivités territoriales et aux directions départementales de l'équipement et est venue remplacer et améliorer une version précédente, la grille RST₀₁.

Comme le présente le CERTU (2006), « *la grille RST₀₂ est un outil de questionnement et d'analyse, destiné à mettre en lumière les points faibles et les points forts d'un projet en regard de critères du développement durable* ». Elle se présente comme un recueil de questions qui permet à l'utilisateur d'apprécier le caractère durable de son projet. Le CERTU (2006) préconise également pour une meilleure prise en compte du développement durable, d'utiliser la grille « *le plus en amont possible : il est plus aisé d'infléchir, d'améliorer ou de suspendre un projet non durable, au stade de la conception, avant qu'il ne soit définitivement arrêté* ». La grille RST₀₂, en questionnant ainsi le projet, permet ainsi de revisiter les objectifs du projet, comparer les différentes solutions à l'aune de critères de développement durable et d'ouvrir par ailleurs de nouvelles pistes de réflexion pour supprimer, réduire et, si possible, compenser les conséquences dommageables du projet sur le développement durable.

La grille RST₀₂ s'applique à n'importe quel projet (équipement, aménagement, réalisation concrète, plan ou programme d'action, etc.) et ce quel que soit son état d'avancement, de sa conception à sa mise œuvre. Elle possède vingt-neuf critères répartis en sept familles (tableau A 87) qui permettent de prendre en compte le respect de l'environnement, le développement économique et le progrès social (tout trois piliers du développement durable), mais également la gouvernance et la démocratie participative indispensable pour donner de la cohésion au processus de développement durable. Ces vingt-neuf critères s'appuient sur les vingt-sept principes de la déclaration de Rio, texte qui fait parti des documents fondateurs du développement durable.

Tableau A 87 : Critères de la grille RST₀₂ (CERTU, 2006).

| Critères de la grille RST ₀₂ | |
|--|---|
| Dimensions et interfaces | Critères à passer en revue |
| 1. Gouvernance et démocratie participative | 1.1. management 1.2. concertation et participation 1.3. règles du jeu 1.4. évaluation, suivi et bilan 1.5. respect des valeurs humaines |
| 2. Dimension sociale | 2.1. liens sociaux 2.2. solidarité 2.3. identité culturelle 2.4. impact social |
| 3. Interface équitable | 3.1. accessibilité 3.2. équité entre les générations 3.3. partage des richesses 3.4. compensation des préjudices |
| 4. Dimension économique | 4.1. cohérence économique 4.2. dynamique économique 4.3. coût global 4.4. impact financier |
| 5. Interface viable | 5.1. adaptabilité 5.2. précaution-prévention 5.3. responsabilisation 5.4. robustesse des choix |
| 6. Dimension environnementale | 6.1. dynamique naturelle 6.2. gestion économe des ressources naturelles 6.3. impact sur l'environnement 6.4. pratiques environnementales |
| 7. Interface vivable | 7.1. cadre de vie 7.2. effet sur la santé et la sécurité 7.3. acceptation de la population 7.4. mode de vie |

Pour chacun de ces critères, des questions sont à passer en revue (en tout 78) et s'accompagne de recommandations (tableau A 88).

Les utilisateurs de la grille RST₀₂ répondent aux différentes questions en leur associant une appréciation dont l'échelle est de six niveaux : Hors sujet, mal pris en compte, non pris en compte, moyennement pris en compte, assez bien pris en compte, bien pris en compte. Cette appréciation peut s'effectuer avec l'aide d'un outil complémentaire : le tableau des performances (tableau A 89).

A partir du tableau A 89, il est alors possible d'élaborer plusieurs représentations graphiques :

- La « courbe de température », pour lesquels les critères sont rangés et classés le long de l'échelle d'appréciation (tableau A 90) ;
- Le profil développement durable, sous la forme d'un graphe « radar à six branches » (ou toile d'araignée) qui reprend les notes moyennes ou valeurs de chaque dimension (entre -3 et 3) du tableau des performances. Pour cette représentation le domaine de la gouvernance et de la démocratie participative est exclu ;

- L'escalier de la gouvernance, qui permet de représenter la note moyenne obtenue pour la dimension 'gouvernance et démocratie participative' (figure A 47). Selon la note obtenue un certain nombre de marche est mis en couleur.

Tableau A 88 : Questions et recommandations associées au critère 'impact sur l'environnement' dans la RST₀₂ (CERTU, 2006).

| 6.3. IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT | |
|--|--|
| Le projet permet-il de réduire les impacts sur l'environnement ? | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Réduire les pollutions et les nuisances à la source dans tous les compartiments de l'environnement (air, eau, sol) • Combattre l'érosion de la biodiversité • Combattre le morcellement et le mitage des espaces naturels et ruraux • Favoriser la création d'un tiers paysager ou d'un tiers sauvage | |
| Le projet est-il en mesure de faire face à des situations de crise ? | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Anticiper les effets du changement climatique • Anticiper les dysfonctionnements potentiels en cas de situations de crise • Anticiper l'évolution des besoins en fonction de nouvelles exigences • Corriger les dysfonctionnements manifestes | |
| Le projet est-il susceptible de mettre en valeur l'environnement ? | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Réduire les nuisances sonores et préserver les zones calmes • Requalifier les espaces soumis à une forte pression • Minimiser le volume des déchets à traiter, améliorer leur gestion au quotidien, favoriser le recyclage et la valorisation des déchets • Valoriser les paysages, les milieux naturels et ruraux en diversifiant leurs modes de gestion | |

Tableau A 89 : Exemple du tableau des performances pour les neuf premiers critères de la grille RST₀₂. Cas d'une grange requalifiée en logements locatifs et en café de pays (CERTU, 2006).

| Grille RST ₀₂ : tableau des performances | | | | | | | |
|---|------------|----------------|-----|-------|------------|------|-------------|
| Liste des critères à passer en revue | échelle | pris en compte | | | | | valeur |
| | | mal | non | moyen | assez bien | bien | |
| | | -3 | 0 | 1 | 2 | 3 | |
| 1. Gouvernance et démocratie participative | | | | | | | |
| 1.1. management | bien | | | | | | 3 |
| 1.2. concertation et participation | assez bien | | | | | | 2 |
| 1.3. règles du jeu | moyen | | | | | | 1 |
| 1.4. évaluation, suivi et bilan | assez bien | | | | | | 2 |
| 1.5. respect des valeurs humaines | bien | | | | | | 3 |
| ensemble | | | | | | | 2,25 |
| 2. Dimension sociale | | | | | | | |
| 2.1. liens sociaux | bien | | | | | | 3 |
| 2.2. solidarité | bien | | | | | | 3 |
| 2.3. identité culturelle | bien | | | | | | 3 |
| 2.4. impact social | moyen | | | | | | 1 |
| ensemble | | | | | | | 2,5 |

Tableau A 90 : Exemple d'une courbe de température avec la grille RST₀₂. Cas d'une grange requalifiée en logements locatifs et en café de pays (CERTU, 2006).

| Grille RST ₀₂ : courbe de température | | | | | | | |
|--|-----|-----|-------|------------|------|------------|---|
| Liste des critères | mal | non | moyen | assez bien | bien | légende | |
| 6.3. impact sur l'environnement | | | | | | mal | ■ |
| 6.1. dynamique naturelle | | | | | | non | ■ |
| 5.2. précaution-prévention | | | | | | moyen | ■ |
| 4.2. dynamique économique | | | | | | assez bien | ■ |
| 3.4. compensation des préjudices | | | | | | bien | ■ |
| 3.3. partage des richesses | | | | | | hors sujet | ■ |
| 2.4. impact social | | | ■ | | | | |
| 1.3. règles du jeu | | | ■ | | | | |
| 7.2. effet sur la santé et la sécurité | | | | ■ | | | |
| 6.2. gestion économe des ressources naturelles | | | | ■ | | | |
| 5.4. robustesse des choix | | | | ■ | | | |
| 5.3. responsabilisation | | | | ■ | | | |
| 5.1. adaptabilité | | | | ■ | | | |
| 4.4. impact financier | | | | ■ | | | |
| 4.3. coût global | | | | ■ | | | |
| 4.1. cohérence économique | | | | ■ | | | |
| 3.2. équité entre les générations | | | | ■ | | | |
| 1.4. évaluation, suivi et bilan | | | | ■ | | | |
| 1.2. concertation et participation | | | | ■ | | | |
| 7.4. mode de vie | | | | | ■ | | |
| 7.3. acceptation de la population | | | | | ■ | | |
| 7.1. cadre de vie | | | | | ■ | | |
| 6.4. pratiques environnementales | | | | | ■ | | |
| 3.1. accessibilité | | | | | ■ | | |
| 2.3. identité culturelle | | | | | ■ | | |
| 2.2. solidarité | | | | | ■ | | |
| 2.1. liens sociaux | | | | | ■ | | |
| 1.5. respect des valeurs humaines | | | | | ■ | | |
| 1.1. management | | | | | ■ | | |

Cet outil permet d'interroger un projet sur ses qualités en termes de développement durable. Il n'offre cependant pas un accompagnement aussi important que l'AEU développé par l'ADEME. De plus, à l'heure actuelle, les questions permettant de traiter de la problématique du climat urbain reste vague et très générale (exemple : 'anticiper les effets du changement climatique').

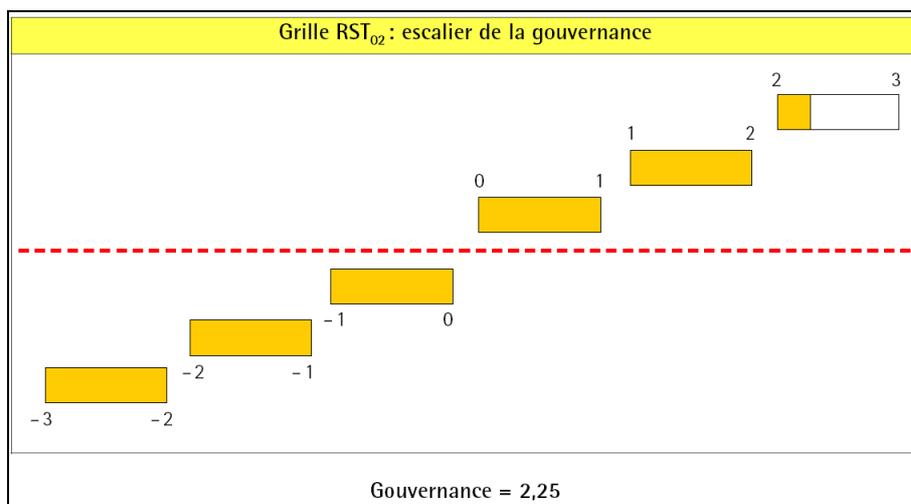


Figure A 47 : Exemple d'un escalier de la gouvernance avec la grille RST₀₂. Cas d'une grange requalifiée en logements locatifs et en café de pays (CERTU, 2006).

Annexe 16 Dépliant 'Pour ma santé, pour mon milieu de vie, je verdis'

Le Conseil régional de l'environnement de Montréal a réalisé un dépliant 'Pour ma santé, pour mon milieu de vie, je verdis' qui introduit des conseils visant à diminuer l'îlot de chaleur urbain (<http://www.cremtl.qc.ca/fichiers-cre/files/pdf476.pdf>).

En été, la Ville suffoque !

La minéralisation des villes (asphalte, briques, goudron) fait que les températures ont tendance à y être plus élevées de 2 à 8 °C qu'à la campagne. La température peut varier de plusieurs degrés d'un quartier à l'autre et même à l'intérieur d'un quartier. C'est ce que l'on appelle des îlots de chaleur urbains.

L'asphalte domine à Montréal !

La ville la plus dense au Québec.

80 % de la surface du territoire construite ou asphaltée.

Une perte d'espaces naturels d'environ 3000 hectares depuis 1966, c'est 14 fois le parc du Mont-Royal.

L'asphalte, un des plus puissants accumulateurs de chaleur

Les matériaux de construction utilisés pour les routes, les trottoirs, les toits, les stationnements et les murs des bâtiments absorbent beaucoup la chaleur qui est ensuite renvoyée dans l'air, surtout durant la nuit.

La circulation automobile et les activités industrielles participent aussi au phénomène des îlots de chaleur.

Quand l'environnement étouffe, la santé en prend un coup !

Plus il fait chaud, plus il y a :

- d'épisodes de smog et de journées de mauvaise qualité de l'air
- de composés organiques volatils dans l'air (ex. vapeurs des tuyaux d'échappement et des peintures à base de solvants)
- de pollens dans l'air, responsables des allergies

Les épisodes de canicule augmentent en température et en fréquence dans les villes.

La chaleur accablante¹ a des impacts sur la santé physique et psychologique ainsi que sur la qualité de vie de la population :

- source de stress
- augmentation du taux d'hospitalisation
- augmentation de la mortalité chez les personnes âgées souffrant de maladies chroniques

1. Environnement Canada met un avis de chaleur accablante lorsqu'il prévoit des températures égales ou supérieures à 30 °C et un indice humidité égal ou supérieur à 40.

La chaleur en ville est plus dangereuse pour :

- les jeunes enfants de moins de 4 ans
- les personnes âgées
- les personnes souffrant de maladies chroniques
- les personnes pratiquant des activités physiques à l'extérieur (travailleurs manuels, sportifs)

Pour en savoir plus

- Effets de la chaleur accablante : www.santepub-mtl.qc.ca
- Dépliant *Quand il fait chaud pour mourir* de la DSP : <http://www.santepub-mtl.qc.ca/Environnement/chaleur/pdf/depliantchaleur2004.pdf>
- Qualité de l'air à Montréal : www.rspa.qc.ca
- Info-smog : http://www.qcqc.ca/atmos/smog/estud_fhtml
- Fondation canadienne de l'arbre : www.tcf-fca.ca
- Guide pour la plantation d'arbres : www.tcf-fca.ca/publications/guide_fhtml
- Plantes grimpantes : www.2ville.montreal.qc.ca/pref/info_verte/grimpant/accueil.htm
- Agriculture urbaine : Alternatives et le Sontropol Roulant, 266-5115, www.roofpoppardens.ca
- Trots verts : Association des maîtres coureurs du Québec (450) 973-2322, www.amcq.qc.ca
- Trots verts : Centre d'écologie urbaine, 261-8301, www.urbecologie.net/french-version/UEC/indexuec.html
- Projets de verdissement : Votre éco-quartier (coordonnées disponibles au 872-1111)
- Jardins communautaires et collectifs : Votre arrondissement (coordonnées disponibles à www.ville-montreal.qc.ca ou au 872-1111)

JE VERDIS !
pour ma santé
pour mon milieu de vie

494, rue de la Vérité Est
Montréal (Québec) H2T 1E7
Téléphone : 514 842-2050
Télécopieur : 514 842-6352
Courriel : cremtl@cmr.org
Site Web : <http://www.cremtl.qc.ca>

La production de ce document a été rendue possible grâce à une contribution financière de la Direction de santé publique de Montréal et du Fonds pour la santé de la population de l'Agence de santé publique du Québec.

Les opinions exprimées dans ce document sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement les points de vue officiels de l'Agence de santé publique du Québec ni celles de la Direction de santé publique de Montréal.

Ce dépliant a été réalisé par le Conseil régional de l'environnement de Montréal (CREM-Montréal). Dans le cadre du projet de lutte aux îlots de chaleur urbains, les auteurs collaboreront prochainement avec l'Association des Plantes Mont-Royal, les éco-quartiers Plantes Mont-Royal et Jardin-Montréal.

Juin 2011 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/> Crédits : VALMA inc.

Une solution : verdifier son milieu de vie !

Verdifier c'est ...

- rafraîchir son environnement
- créer de l'ombre qui protège du soleil
- améliorer la qualité de l'air et fixer les polluants (métaux lourds, poussières, CO₂) grâce aux feuilles et aux racines
- accroître l'absorption des eaux de pluie afin d'éviter les débordements des égouts qui polluent les rives par temps de grosses averses
- embellir son milieu
- diminuer le stress
- réduire les coûts de consommation d'énergie (climatisation et chauffage)
- accroître la valeur foncière de la propriété

Protégeons les arbres existants, leur valeur est inestimable !

En moyenne, un arbre adulte abaisse la température de l'air (effet de plusieurs climatiseurs) durant l'été

fournit les besoins quotidiens en oxygène pour 4 personnes

purifie l'air en captant les poussières et les polluants atmosphériques (dont une grande quantité de CO₂)

prélève dans le sol et incorpore dans son bois une quantité de métaux lourds néfastes à la santé (ex. : plomb, cadmium, etc.)

atténue le bruit ambiant

masque les odeurs désagréables

diminue la vitesse des vents

cache l'éclairage des réverbères et des voitures

L'air d'une rue bordée d'arbres contient de 3 à 7 fois moins de poussières que l'air d'une rue sans arbres. Le couvert arboréscant peut intercepter de 7 à 22 % des mm de pluie.

Les trucs pour agir !

Planter des arbres, des arbustes et des végétaux

Le bon arbre au bon endroit

- 1 Prévoir la hauteur de l'arbre à maturité et son déploiement.
- 2 Vérifier la présence de fils électriques et autres installations publiques. Téléphoner à Info-excavation, service gratuit au 1 800 663-9228.
- 3 Planter des arbres adaptés au milieu urbain. Il existe des espèces dites *indigènes* qui se retrouvent naturellement dans la région montréalaise : Frêne, Sorbier, Tilleul d'Amérique, Épinette, Chêne, Thuja occidental, Noyer cendré, Amelanchier, Miconchouier occidental, Cerisier, Orme d'Amérique, Saule et Pin.
- 4 Planter des conifères au nord de son terrain (ou de la maison) pour protéger des vents en hiver et des feuillus au sud pour faire un écran solaire en été tout en permettant l'ensoleillement en hiver.

La vigne et les plantes grimpantes sur les murs, les clôtures ou les balcons

Les vignes grimpantes croissent assez rapidement (de 2 à 3 mètres par année) et demandent peu d'entretien. La vigne absorbe la pollution de la circulation automobile, offre fraîcheur à l'intérieur de la maison en été et embellit le milieu de vie.

Pour une croissance plus rapide, planter la vigne du côté sud-ouest de votre bâtiment en préférant la Vigne vierge *Engelmanni* (ou woodbine) ou la Vigne *Parthenocissus quinquefolia*.



Ce n'est qu'un mythe !

Contrairement à la croyance populaire, les racines des arbres :

- ne percent pas les tuyaux d'égouts
- ne soulèvent pas les trottoirs
- n'abîment pas les fondations
- ne causent pas de fissures aux résidences

Les vignes ne causent aucun dommage aux murs des bâtiments, s'ils sont en bon état.

Des terrasses et des balcons verts

Aménager des terrasses avec des pots de fleurs et des jardins suspendus pour cultiver des légumes et des fines herbes en ville.

Des cours arrière et des devantures de maison verdies

Enlever l'asphalte ou le ciment et planter des végétaux ! Quantité de plantes couvrent le sol ajoutant couleurs et demandant peu d'entretien (ex. Lotier corniculé, Géranium vivace, Myosotis du Caucase et Anémone du Canada).

Utiliser des matériaux réfléchissants de couleur pâle !

Les surfaces foncées (comme les toits noirs) absorbent beaucoup plus de chaleur que les surfaces blanches, qui réfléchissent les rayons du soleil. Les surfaces noires ou foncées peuvent être plus chaudes de 21 °C que les surfaces de couleur pâle.

Remplacer les surfaces foncées (cours privées, stationnements et devantures des maisons) par des surfaces claires qui n'emmagasinent pas de chaleur. Par exemple le béton réfléchit plus les rayons solaires que l'asphalte.

Le toit devient réfléchissant

Sur un toit traditionnel, on peut aménager une membrane élastomère recouverte d'un enduit réfléchissant ou encore recouvrir le toit de petits cailloux blancs.

Les avantages

- 1 Ces toits demeurent 50 à 60 % plus frais que les toits conventionnels.
- 2 Les rayons solaires dégradent l'asphalte. L'aménagement d'un toit réfléchissant prolonge la durée de vie des toits de 30 à 50 %.

Et pourquoi pas un toit vert ?

Un toit vert est un espace muni de plusieurs membranes imperméables et isolantes qui permettent d'installer une couche de terre où pousseront des végétaux (plantes, arbres).

Un toit vert :

- 1 climatise naturellement en été
- 2 accroît l'efficacité énergétique du bâtiment en été et isole en hiver
- 3 absorbe en moyenne 75 % des eaux de pluie reçues
- 4 offre des espaces de verdure supplémentaires
- 5 atténue le bruit
- 6 retarde la propagation du feu lors d'incendies
- 7 prolonge la durée de vie des toits

Une journée où la température extérieure atteint 35 °C, un toit traditionnel peut atteindre 70 °C alors que le toit vert ne dépasse pas 25 ou 30 °C.



Montréal c'est aussi

Des toits verts sur la Faculté d'aménagement de l'Université de Montréal, l'hôtel de la Place Bonaventure, l'Institut de génétique de Montréal et le bâtiment de Mountain Equipment Coop.

Un projet d'agriculture urbaine sur le toit de la Tolu (Télé-université) par Alternatives et le Saitropol roulant.

Un toit réfléchissant au pavillon Lassonde de l'École Polytechnique de Montréal.

Participer aux projets de verdissement de votre quartier

- des projets de plantation d'arbres et d'aménagement dans les ruelles, les cours d'écoles et les milieux de travail
- des résidents qui se regroupent pour verdifier et entretenir leur milieu de vie

Alors sensibilisez vos voisins, vos collègues et amis !

La Ville de Montréal se dote de politiques :

Politique de l'arbre : http://www2.villemontreal.qc.ca/services_citoyens/politique_arbres.htm

Politique de protection et de mise en valeur des milieux naturels : http://www2.villemontreal.qc.ca/services_citoyens/protectionmil.htm

Informez-vous auprès de votre arrondissement pour connaître la réglementation municipale afin de protéger les arbres publics et privés ainsi que les espaces verts.



