



EHESP



**Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme
d'ingénieur de l'ENGEES**

Promotion : 2007 - 2008

Date du Jury : septembre 2008

PREVENTION DES EFFETS SANITAIRES DES VAGUES DE CHALEUR

Élaboration d'une méthodologie d'identification des îlots de chaleur urbains sur le territoire du Grand Lyon

Clément CHAMPIAT

**Lieu du stage :
DDASS du Rhône**

**Référent professionnel :
Marc MAISONNY**

**Référent pédagogique :
Séverine DEGUEN
Jean-Luc POTELON**

Remerciements

J'adresse mes sincères remerciements à Marc MAISONNY, IGS responsable du service Santé Environnement de la DDASS du Rhône, pour son accueil, son encadrement, sa disponibilité et son aide tout au long du mémoire.

Je tiens à remercier Séverine DEGUEN et Jean-Luc POTELON, enseignants-chercheurs à l'EHESP, pour leurs conseils, leurs observations et leurs propositions qui ont guidé ma démarche au cours de ce mémoire.

Je souhaite adresser mes remerciements à Pierre CREPEAUX, chargé de mission air/plan climat/bruit à la Mission Ecologie Urbaine du Grand Lyon, pour avoir soutenu ce projet au Grand Lyon et pour avoir rendu possible l'étape d'extraction et de traitement des données cartographiques.

Julie VALLET, chargé de mission bruit à la Mission Ecologie Urbaine du Grand Lyon, trouvera ici l'expression de ma gratitude pour son aide précieuse lors de l'utilisation des outils géomatiques.

Merci à toutes les personnes qui ont participé à la réalisation de mes travaux au Grand Lyon : Anne LESVIGNES, Management Organisation Informatique de la Délégation Générale au Développement Urbain ; Richard BOUSSUGE, de l'unité Géo-Services, et Fabien GOMEZ, de l'unité voirie ; Remi CORFINI, formateur à DigiTech International, et Isabelle MALLET, responsable de la formation informatique au Grand Lyon.

Je remercie Bruno FABRES, IGS à la CIRE Rhône Alpes, et Grégoire REY, épidémiologiste au CEPI Dc, pour leur implication dans l'approche de validation sanitaire.

Merci à David SAILOR, chercheur à l'université de Portland, pour ses éclairages en micro climatologie urbaine.

Je remercie Karine LAAIDI de l'InVS, Audrey SMARGIASSI et Patrice PITRE du centre Léa-Roback de Montréal pour m'avoir fait part de leurs travaux.

Je remercie Jean CARRE, enseignant chercheur à l'EHESP, et Laurence BRIAND, du centre de documentation de l'EHESP, pour m'avoir procuré les références bibliographiques utilisées dans ce mémoire.

Enfin, je remercie chaleureusement toute l'équipe du service Santé Environnement de la DDASS du Rhône pour son accueil.

Sommaire

INTRODUCTION	1
1 VAGUES DE CHALEUR ET SANTE	3
1.1 EFFETS DES FORTES CHALEUR SUR LA SANTE : ASPECTS CLINIQUES	3
1.2 NOTIONS EPIDEMIOLOGIQUES	3
1.2.1 Décès par coup de chaleur	4
1.2.2 Décès lié à la chaleur	4
1.3 FACTEURS FAVORISANT L'IMPACT SANITAIRE DE LA CHALEUR	4
1.3.1 Facteurs individuels	4
1.3.2 Facteurs environnementaux	6
1.4 PREVENTION ET LUTTE CONTRE L'IMPACT SANITAIRE DES VAGUES DE CHALEUR : LE PLAN NATIONAL CANICULE	6
2 ILOTS DE CHALEUR URBAINS	7
2.1 DEFINITION	7
2.2 INTENSITE DU PHENOMENE	8
2.3 CONDITIONS OPTIMALES DE DEVELOPPEMENT DU PHENOMENE	8
2.4 LES DIFFERENTES ECHELLES D'ETUDE DES ILOTS DE CHALEUR URBAINS	8
2.4.1 La couche limite urbaine (UBL)	9
2.4.2 La couche de canopée urbaine (UCL).....	9
2.4.3 La couche de surface (SL).....	10
2.5 CAUSES DU PHENOMENE D'ILOT DE CHALEUR URBAIN	11
2.5.1 Rétention de la chaleur par le tissu urbain	11
A) Rôle des propriétés radiatives et thermiques des matériaux.....	11
B) Rôle de la géométrie des canyons urbains.....	11
C) Rôle de l'exposition des surfaces au rayonnement solaire.....	12
D) Pollution atmosphérique	14
2.5.2 Perturbations de la dynamique des masses d'air	14
A) Rôle de la topographie.....	14
B) Rôle de la géométrie des canyons urbains.....	15
C) Rôle de la rugosité du tissu urbain	15
2.5.3 Réduction de l'évapotranspiration	15
A) Rôle de l'imperméabilité des surfaces	15
B) Rôle de l'eau.....	16

C) Rôle de la végétation.....	16
2.5.4 Émission de chaleur par les activités anthropiques	16
A) Rôle des bâtiments.....	17
B) Rôle des transports	17
C) Métabolisme humain	17
2.6 METHODES EMPLOYEES DANS L'IDENTIFICATION DES ICU	18
2.6.1 Mesures in situ	18
2.6.2 Télédétection.....	18
2.6.3 Modélisation	19
2.6.4 Géomatique.....	19
3 ELABORATION D'UNE METHODOLOGIE D'IDENTIFICATION DES ILOTS DE	
CHALEUR URBAINS SUR LE TERRITOIRE DU GRAND LYON	20
3.1 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET CLIMATOLOGIQUE DU GRAND LYON	20
3.2 CHOIX DE LA METHODE	20
3.3 SELECTION DES ZONES D'ETUDE	21
3.4 DEMARCHE METHODOLOGIQUE	22
3.4.1 Hypothèses	22
3.4.2 Outils utilisés	23
3.4.3 Choix des paramètres	23
A) Critères de sélection.....	24
B) Paramètres exclus.....	25
C) Paramètres sélectionnés.....	26
3.4.4 Choix des indicateurs	26
3.4.5 Extraction des indicateurs	28
3.4.6 Attribution des scores.....	28
3.4.7 Hiérarchisation des paramètres	29
3.4.8 Pondération des indicateurs.....	30
3.4.9 Choix de l'unité géographique.....	31
3.4.10 Construction du modèle.....	32
3.4.11 Représentation des résultats	32
3.5 RESULTATS	32
3.5.1 Cartes d'ICU.....	32
3.5.2 Distribution des scores.....	33
3.5.3 Comparaison des zones.....	34
3.6 DISCUSSION	35
3.6.1 Limite du modèle	35
3.6.2 Adéquation des résultats avec les objectifs du mémoire	37

4	DEMARCHES DE VALIDATION DE LA METHODE.....	38
4.1	APPROCHE METROLOGIQUE	38
4.1.1	Mesures in situ.....	38
4.1.2	Apports de la télédétection	39
4.1.3	Apport de la modélisation météorologique	39
4.2	APPROCHE SANITAIRE.....	40
4.2.1	Méthodologie	40
4.2.2	Période étudiée.....	40
4.2.3	Données nécessaires	40
4.2.4	Evaluation de la surmortalité : calcul différentiel de mortalité.....	41
4.2.5	Comparaison de la cartographie des ICU à la surmortalité	41
5	PERSPECTIVES	42
5.1	ETUDE DES ICU ET PERSPECTIVES SANITAIRES : PROJETS EN COURS	42
5.1.1	Recours à la télédétection : les démarches entreprises en France.....	42
5.1.2	Intégration de la télédétection, de la géomatique et de l'épidémiologie : l'exemple québécois	42
5.2	APPLICATIONS DU MODELE POUR LA PREVENTION ET L'ACTION SANITAIRE	43
5.2.1	Caractérisation de la population exposée : exemple de la zone test n°1	43
5.2.2	Emplacement des établissements sanitaires et sociaux	45
5.3	PERFECTIONNEMENT DU MODELE	45
5.3.1	Extension du modèle au territoire du Grand Lyon	45
5.3.2	Construction d'un modèle 'jour' et d'un modèle 'nuit'	46
5.3.3	Réalisation d'un modèle de risque sanitaire	46
5.4	REDUCTION DU PHENOMENE DES ILOTS DE CHALEUR : PROPOSITIONS D'AMENAGEMENT.....	47
5.4.1	Solutions possibles	47
5.4.2	Modèles de réduction des ICU : exemple d'un scénario d'aménagement de la zone test n°1	49
5.4.3	Propositions d'aménagement pour les zones test les plus chaudes	50
	CONCLUSION.....	51
	BIBLIOGRAPHIE	53
	LISTE DES FIGURES	61
	LISTE DES TABLEAUX.....	62
	LISTE DES ANNEXES.....	63

ANNEXE 1 : PLAN NATIONAL CANICULE	I
ANNEXE 2 : MODELES METEOROLOGIQUES APPLIQUES A L'IDENTIFICATION DES ICU.....	IV
ANNEXE 3 : CARTE DU GRAND LYON	VI
ANNEXE 4 : DESCRIPTION DES LOGICIELS UTILISES.....	VII
ANNEXE 5 : URBAN CLIMATE ZONE	VIII
ANNEXE 6 : ZONES TEST.....	X
ANNEXE 7 : CONSTRUCTION DE I_{TRANS}	XVIII
ANNEXE 8 : EXTRACTION DES INDICATEURS.....	XXII
ANNEXE 9 : ATTRIBUTION DES SCORES	XXV
ANNEXE 10 : BILAN ENERGETIQUE DE LA VILLE	XXX
ANNEXE 11 : CARTES ICU	XXXII
ANNEXE 12 : DISTRIBUTION DES SCORES	XXXVI
ANNEXE 13 : IRIS, ZONE TEST N°1	XL
ANNEXE 14 : ESS.....	XLI
ANNEXE 15 : CARTE DE REDUCTION DES ICU, ZONE TEST N°1.....	XLIII

Liste des sigles utilisés

AASQA : Association Agréée pour la Surveillance de la Qualité de l'Air

AR : Aspect Ratio

BEH : Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire

CNRM : Centre National de Recherche Météorologique

COPARLY : Comité de Coordination pour la Contrôle de la Pollution Atmosphérique dans la Région Lyonnaise

DASS : Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales

EHPA : Etablissements d'Hébergement de Personnes Agées

ESS : Etablissement Sanitaire et Social

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GL : Grand Lyon

IBM : Indicateur Bio Météorologique

IC : Intervalle de Confiance

ICU : Ilots de Chaleur Urbains

INSEE : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

INSERM : Institut National de la Santé Et de la Recherche Médicale

InVS : Institut de Veille Sanitaire

IR : Infra Rouge

IRIS : Ilots Regroupés pour l'Information Statistique

LST : Land Surface Temperature

MEU : Mission Ecologie Urbaine

MIGA : Mise en Garde et Actions

MNT : Modèle Numérique de Terrain

ONERC : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique

OR : Odds Ratio

PNC : Plan National Canicule

SACS : Système d'Alerte Canicule et Santé

SAMU : Service d'Aide Médicale d'Urgence

SDIS : Service D'Incendie et de Secours

SIG : Système d'Information Géographique

SL : Surface Layer

UBL : Urban Boundary Layer

UC : Urban Canyon

UCL : Urban Canopy Layer

UCZ : Urban Climate Zone

USEPA : United States Environmental Protection Agency

WMO : World Meteorological Organization

Introduction

De nombreuses vagues de chaleur ont sévi en Europe au cours de ces 25 dernières années. Ce type d'évènement météorologique, caractérisé par la persistance de températures élevées, a atteint au cours de l'été 2003 une ampleur exceptionnelle en Europe de l'ouest. Le maintien des températures extrêmes rencontrées en France lors du mois d'août 2003 a entraîné une surmortalité considérable, estimée à près de 15 000 décès et touchant particulièrement les personnes âgées.

Les simulations réalisées par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) montrent qu'en Europe, l'occurrence, l'intensité et la durée des vagues de chaleur va très probablement augmenter dans la deuxième partie du 21ème siècle entraînant des impacts sanitaires non négligeables (ONERC, novembre 2007).

Les études épidémiologiques des vagues de chaleur ont révélé un impact sanitaire plus élevé dans les villes que dans leurs régions respectives (InVS, BEH, 16 mai 2006). Cette différence s'explique notamment par le phénomène d'îlots de chaleur urbains (ICU), caractérisé par des températures plus élevées en ville que dans la périphérie rurale (USEPA).

L'impact sanitaire d'une vague de chaleur dépend de trois facteurs : persistance d'une période de forte chaleur, exposition de la population et vulnérabilité de la population exposée. Les évolutions climatiques, la part importante de citadins dans la population française (77%) et le vieillissement de la population amènent à prédire une augmentation de l'impact sanitaire des vagues de chaleur dans les zones urbaines. Actuellement, alors que les prévisions météorologiques permettent de prévoir la survenue d'une vague de chaleur et que l'épidémiologie a bien identifié les facteurs de risques individuels liés aux fortes chaleurs, l'exposition à la chaleur en milieu urbain est estimée indirectement en utilisant des données issues de stations météorologiques implantées en zone suburbaine. Des efforts doivent être menés afin de caractériser avec précision l'exposition aux fortes chaleurs dans les villes, fortement liées au phénomène d'îlot de chaleur urbain.

La ville de Lyon et toute l'agglomération lyonnaise ont particulièrement souffert lors de la vague de chaleur de 2003 (80% de surmortalité à Lyon contre 60% sur l'ensemble du territoire français). La DDASS du Rhône, à travers la lutte contre l'impact sanitaire des vagues de chaleur, et la communauté urbaine de Lyon (Grand Lyon), à travers l'adaptation du territoire aux changements climatiques, ont affiché la volonté de travailler sur la problématique des îlots de chaleur urbains. La première étape de cette démarche

Clément CHAMPIAT - Mémoire de l'Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique - 2008

est la mise en place d'une méthodologie permettant d'identifier les îlots de chaleur sur le territoire du Grand Lyon.

Les travaux présentés dans ce mémoire doivent permettre :

- De déterminer les zones du Grand Lyon les plus à risque en terme de chaleur au sein desquelles des actions de prévention, par la DDASS du Rhône et les collectivités territoriales, pourraient être ciblées;
- de sensibiliser les acteurs en charge de l'aménagement au sein de la collectivité ;
- d'apporter des éléments de réflexion afin de privilégier l'information et la prévention dans les quartiers les plus à risque lorsqu'une alerte canicule a été donnée.

Le présent mémoire propose de mettre en évidence l'implication des îlots de chaleur dans l'impact sanitaire des vagues de chaleur à travers une revue de références en santé publique. Il s'attache ensuite à l'élaboration d'une méthodologie d'identification des îlots de chaleur du Grand Lyon. Cette démarche se décline en trois points : une revue bibliographique de la micro climatologie urbaine, la construction d'un modèle cartographique des îlots de chaleurs urbain du Grand Lyon et une réflexion sur les méthodes à mettre en œuvre afin de valider ce modèle. Le mémoire est clôturé par les perspectives offertes par le modèle, en terme de prévention sanitaire ou d'aménagement du territoire.

1 Vagues de chaleur et santé

1.1 Effets des fortes chaleur sur la santé : aspects cliniques

L'exposition d'un individu à une température environnementale élevée, sans période de fraîcheur nocturne suffisante pour permettre à l'organisme de récupérer, est susceptible d'entraîner des réactions bénignes ou graves, dues à des réponses inadéquates ou insuffisantes des mécanismes de thermorégulation. La surexposition aux fortes chaleur peut entraîner deux types de réactions au niveau de l'organisme : l'épuisement par la chaleur et le coup de chaleur.

L'épuisement par la chaleur est la conséquence d'une perte liquidienne excessive. Il se manifeste par des céphalées, des nausées, des vomissements, une sensation de malaise, une faiblesse musculaire et des vertiges, accompagnés d'une hypotension. L'évolution se fait vers un effondrement de la pression sanguine. L'équilibre hydro-électrolytique du sang est perturbé avec notamment une déshydratation. L'épuisement par la chaleur est généralement transitoire et répond bien à une réhydratation. Le pronostic est favorable si la défaillance circulatoire n'est pas prolongée.

Le coup de chaleur est dû à une défaillance des mécanismes de déperdition de chaleur. Les premiers signes d'un coup de chaleur sont des céphalées, des vertiges et affaiblissement prononcé de l'état général. La sudation est généralement diminuée et la température corporelle s'élève rapidement à 40-41°C. Un épisode de désorientation peut précéder le coma et les convulsions. Les autres signes comprennent accélération du rythme cardiaque, hyperventilation, vomissements et hypotension artérielle. Le coup de chaleur constitue une urgence médicale majeure, rapidement mortelle en l'absence de traitement. Des lésions cérébrales définitives ou une insuffisance rénale peuvent survenir lors de la phase aiguë.

1.2 Notions épidémiologiques

Les conséquences sanitaires de l'exposition des populations aux fortes chaleurs ne sont pas toutes directement liées à la chaleur. L'augmentation de la morbidité et de la mortalité lors de ce type d'évènement, n'est pas uniquement la traduction de l'épuisement par la chaleur ou du coup de chaleur. L'évaluation de la morbidité liée à la chaleur restant une notion difficile à déterminer et souvent relative à une notion d'inconfort chez les sujets, elle ne fait pas l'objet d'une définition épidémiologique. La morbidité liée à la chaleur n'étant pas normée, son investigation, lors d'enquêtes épidémiologiques fait l'objet de questionnaires et ne repose pas sur un diagnostic médical. Concernant les décès, on distingue décès par coup de chaleur et décès liés à la chaleur. Si la définition clinique

d'un décès par coup de chaleur est assez consensuelle, ce n'est pas le cas pour la définition épidémiologique d'un décès lié à la chaleur.

1.2.1 Décès par coup de chaleur

Aux Etats-Unis, la National Association of Medical Examiners a proposé de noter décès par coup de chaleur ou hyperthermie tout décès répondant aux conditions suivantes :

- Température corporelle au moment du décès au moins égale à 40,6°C.
- Température corporelle au moment du décès inférieure à 40,6°C, lorsque des tentatives ont été entreprises pour faire baisser la température ou lorsque le sujet avait présenté une altération de l'état mental et un taux sérique élevé d'enzymes hépatiques et musculaires.

Cette définition a été utilisée dans les investigations épidémiologiques de plusieurs vagues de chaleur. Cependant elle apparaît très spécifique, ne prenant pas en compte tous les décès indirectement associés à la chaleur, et sous-estime donc le nombre de décès liés à la chaleur.

1.2.2 Décès lié à la chaleur

La National Association of Medical Examiners définit un décès lié à la chaleur, tout décès survenant quand l'exposition à des températures élevées a causé le décès ou a fortement contribué à ce décès. Cette définition très large peut être sujette à des biais de classification et être à l'origine d'une surestimation des décès liés à la chaleur au moment d'une vague de chaleur. Les décès liés directement à la chaleur ou indirectement liés à la chaleur sont généralement sous-représentés dans les statistiques. Au moment d'une vague de chaleur au contraire, ils peuvent être surreprésentés. La **mortalité totale** est donc l'indicateur sanitaire le plus souvent utilisé pour évaluer l'impact d'une vague de chaleur (Fouillet et al., INSERM, décembre 2006).

1.3 Facteurs favorisant l'impact sanitaire de la chaleur

Les études épidémiologiques menées ces 30 dernières années en Europe et aux Etats-Unis ont mis en évidence les facteurs de risque de décéder lors d'une vague de chaleur.

1.3.1 Facteurs individuels

Age : les études épidémiologiques menées suite à la vague de chaleur d'août 2003 ont permis d'identifier les personnes âgées comme la principale population à risque de décéder (BEH n°19-20, 2006). Le besoin de boire est de moins en moins bien perçu avec l'âge, une déshydratation modérée n'entraînant peu ou pas de sensation de soif après 70

ou 75 ans (Besancenot, 2002). Les personnes âgées constituent la population la plus sensible à la déplétion hydrique et présentent des mécanismes de régulation thermique fragiles.

Sexe : La surmortalité due aux vagues de chaleur touche différemment les hommes et les femmes selon les études. D'une façon générale, alors que les femmes sont plus touchées en Europe, cette tendance est inversée aux Etats-Unis ou au Canada (Besancenot, 2002). Pour la canicule d'août 2003 (InVS, octobre 2003), la surmortalité observée chez les femmes (+70 %) est sensiblement plus élevée que celle qui a été observée chez les hommes (+40 %).

Etat général de santé : les études de cohorte de personnes âgées réalisées par l'InVS (InVS, février 2006) sur les facteurs de risque individuels pendant la vague de chaleur de 2003 montrent que les sujets atteints d'affections cardiovasculaires, respiratoires, neurologiques ou psychiatriques sont plus à risque de voir leur état de santé se dégrader en période de canicule.

Prise de médicaments et de drogues : certains médicaments interfèrent avec les mécanismes de thermorégulation (diurétiques, neuroleptiques, antiparkinsoniens, antidépresseurs, etc.). La prise de tels traitements constitue un facteur de risque lors d'une vague de chaleur. La consommation d'alcool pourrait également constituer un facteur de risque en favorisant la déshydratation. Des interrogations existent quant à l'impact des vagues de chaleur chez les usagers de drogues (Besancenot, 2002).

Degré d'autonomie : L'étude cas témoin réalisée par l'InVS (InVS, juillet 2004) suite à la vague de chaleur de l'été 2003 en France a mis en évidence un risque accru de décès chez les personnes âgées dont le degré d'autonomie est faible (personnes confinés au lit ou au fauteuil, personnes ne pouvant s'habiller ou se laver seules).

Mode de vie et contact sociaux : Les modes de vie et les contacts sociaux constituent des facteurs pouvant moduler l'impact d'une vague de chaleur. Ainsi les personnes vivant seules présentent un risque accru de décès. L'interrogation de témoins a montré que les personnes ne vivant pas seules buvaient davantage et prenaient des bains. Le fait de pouvoir se déplacer et quitter son domicile est un facteur protecteur.

Statut social : différentes études ont montré que les personnes ayant un revenu faible présentent un risque accru de décéder lors d'une vague de chaleur. Une étude cas témoins (InVS, juillet 2004) montre que les personnes âgées issues des catégories socioprofessionnelles les plus défavorisées sont les plus à risque de décéder lors d'une vague de chaleur.

1.3.2 Facteurs environnementaux

Taille de l'agglomération : la taille de l'agglomération est un facteur de risque en période de fortes chaleurs. L'étude de la vague de chaleur de 1976 a révélée que la variation moyenne du taux de mortalité entre 1975 et 1976 a été de +4 % dans les villes de moins de 50 000 habitants, de +11 % pour les villes hébergeant entre 50 000 et 200 000 habitants et de +18 % pour les agglomérations de plus de 200 000 habitants (Rey, 2007). La surmortalité due à la chaleur se concentre dans les grandes agglomérations en raison des fortes températures liées au phénomène d'îlots de chaleur urbains.

Habitat et climatisation : Une étude cas témoins réalisée suite à la vague de chaleur de l'été 1995 à Chicago a montré que les personnes décédées vivaient plutôt en appartement de petite taille, dépourvus de pièces climatisées, dans les étages supérieurs, et dans des immeubles à toit plat (InVS, février 2006).

Effets de la pollution : les situations anticycloniques, que l'on rencontre lors des vagues de chaleur, entravent la dispersion horizontale et verticale des polluants et participent à la formation massive d'ozone (Besancenot, 2002). Les résultats suggèrent un effet synergique de la pollution atmosphérique et de la température sur la mortalité.

1.4 Prévention et lutte contre l'impact sanitaire des vagues de chaleur : le Plan National Canicule

L'objectif du Plan National Canicule (PNC) est de définir les actions dans les domaines de la prévention et de la gestion de crise afin de réduire les effets sanitaires d'une vague de chaleur. Il comprend trois niveaux d'alerte progressifs:

- un niveau de veille saisonnière, déclenché automatiquement du 1er juin au 31 août de chaque année ;
- un niveau de mise en garde et actions (MIGA), déclenché par les préfets de département, sur la base de l'évaluation des risques météorologiques et sanitaires réalisée par l'InVS en concertation avec Météo France ;
- un niveau de mobilisation maximale.

Le PNC est articulé autour de trois grands axes (détaillés en annexe 1):

- prévention sanitaire des vagues de chaleur ;
- système d'alerte des vagues de chaleur ;
- actions de gestion d'une vague de chaleur.

2 Ilots de chaleur urbains

La littérature épidémiologique met en évidence la relation entre taille de l'agglomération et risque de décès en période de fortes chaleurs (cf. § 1.3.2). Elle présuppose également l'implication de l'effet d'îlot de chaleur dans l'importance de l'impact sanitaire des vagues de chaleur en ville. Or les études menées sur le sujet soulignent le manque de précision de la caractérisation de l'exposition à la chaleur en milieu urbain. Dans le but d'évaluer l'exposition de la population urbaine à la chaleur, il est nécessaire de comprendre les spécificités du microclimat urbain et les mécanismes du phénomène d'îlots de chaleur urbains. Cette partie présente une revue de la bibliographie existante dans le domaine des îlots de chaleur urbains.

2.1 Définition

Le terme îlot de chaleur urbain (ICU) caractérise un secteur urbanisé où les températures de l'air et des surfaces sont supérieures à celles de la périphérie rurale (USEPA).

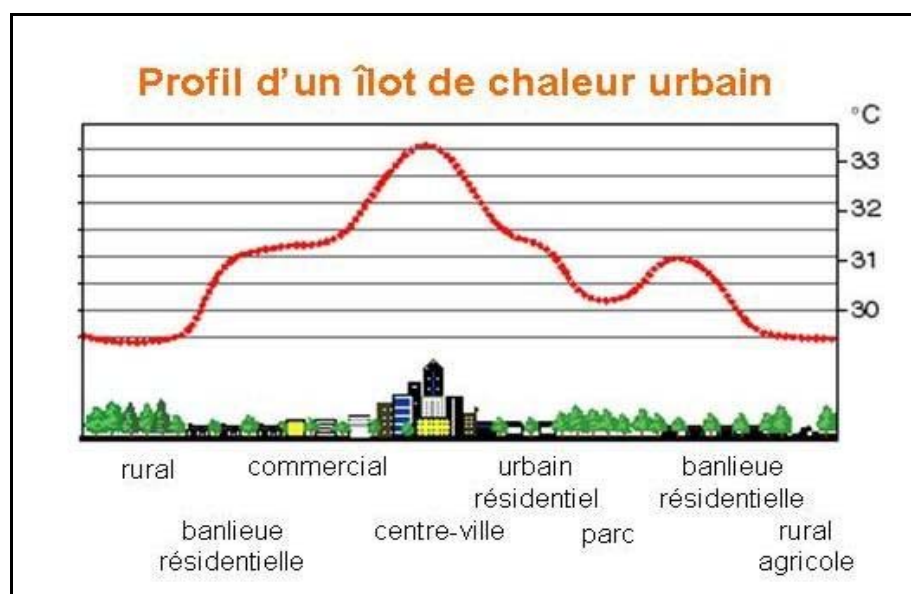


Figure 1 : profil d'un ICU (source: USEPA)

Le phénomène d'ICU apparaît dans toutes les villes. Il s'agit de la manifestation climatique la plus évidente de l'urbanisation. C'est le résultat de la totalité des changements microclimatiques apportés par les modifications humaines sur une zone urbaine (Landsberg, 1981).

2.2 Intensité du phénomène

On définit l'intensité d'un ICU par la différence de température de l'air de la zone urbaine étudiée avec la température d'un point de mesure de référence situé dans la périphérie rurale (Oke, 1973). On la note ΔT_{u-r} et elle s'exprime en degré Celsius.

$$\Delta T_{u-r} = T_u - T_r$$

T_u : température de l'air de la zone urbaine étudiée

T_r : température de l'air du point de mesure de référence dans la périphérie rurale de la zone urbaine étudiée.

L'intensité des ICU varie selon les villes. Elle dépend du climat, de la topographie, de la population, de la morphologie et de l'activité des villes (Fan et Sailor, 2005). En moyenne, sur une année, pour des villes ayant un climat tempéré, l'intensité des ICU est de l'ordre de 2°C (Taha, 1997). En été, ΔT_{u-r} peut s'élever jusqu'à 10°C (Lachance et al., 2006). ΔT_{u-r} augmente avec la superficie et la population de la ville (Arnfield, 2003).

2.3 Conditions optimales de développement du phénomène

Les conditions optimales de développement des ICU sont de nature météorologique. La condition la plus importante permettant au climat urbain de se différencier de celui des zones rurales voisines est une configuration anticyclonique stable (Landsberg, 1981), caractérisée par un ciel dégagé et des vitesses de vents très faibles, inférieures à 3 m/s (Terjung et O'Rourke, 1980). Lorsque ces conditions sont réunies, l'intensité des ICU atteint sa valeur maximale (Landsberg, 1981).

2.4 Les différentes échelles d'étude des îlots de chaleur urbains

L'effet d'ICU peut être envisagé comme un phénomène global, touchant toute l'aire urbaine. Il peut aussi présenter des variations d'intensité en fonction du lieu, de l'heure et de la méthode d'observation. Afin d'appréhender ces variations, il est possible d'aborder la problématique des ICU selon différentes échelles spatiales.

Les méthodes de mesure des phénomènes microclimatiques urbains, ont permis de différencier trois couches dans le tissu urbain et son atmosphère (Oke, 2004):

- la couche limite urbaine ou Urban Boundary Layer (UBL)
- la couche de canopée urbaine ou Urban Canopy Layer (UCL)
- la couche de surface ou Surface Layer (SL)

Ces couches correspondent chacune à une échelle verticale distincte. Selon l'échelle choisie, le ou les ICU vont présenter des caractéristiques et des variabilités différentes.

2.4.1 La couche limite urbaine (UBL)

L'UBL est constituée par la couche d'air située au dessus des bâtiments du tissu urbain (Oke, 2004) (cf. figure 2). Elle présente des caractéristiques différentes des couches d'air situées au dessus des zones rurales : température plus élevée et composition chimique caractérisée par de fortes concentrations en polluants atmosphérique.

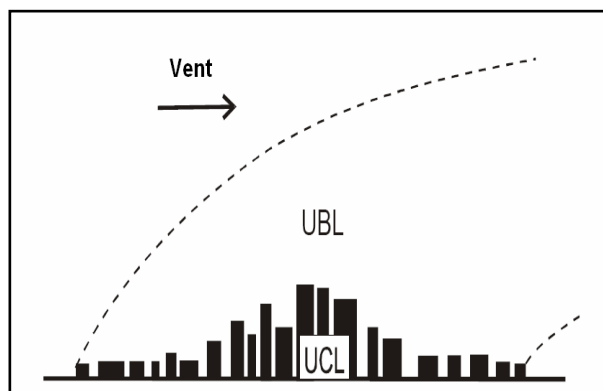


Figure 2 : schéma de l'UBL (source : Voogt, 2007)

L'échelle considérée au niveau de l'UBL est de l'ordre du kilomètre et représente les phénomènes microclimatiques à l'échelle de la ville dans son ensemble. Il s'agit d'une échelle méso urbaine (Oke, 2004) qui ne tient pas compte des variabilités spatiales infra urbaines des phénomènes microclimatiques urbains.

L'étude du phénomène d'ICU au niveau de l'UBL implique de ne considérer qu'un îlot unique, surplombant la ville et caractérisé par une température globale de l'air plus élevée que dans la périphérie rurale (Weng et al, 2004) (cf. figure 3).

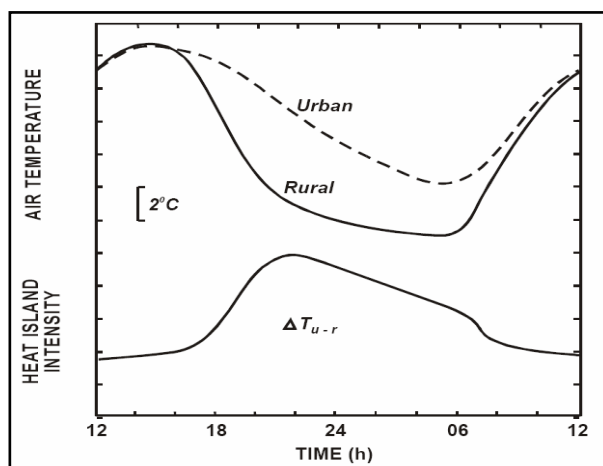


Figure 3 : intensité d'un ICU de l'UBL sur 24 h (source : Mills, 2005)

Un tel ICU va se développer en fin de journée et son intensité va croître durant la nuit pour atteindre un maximum au milieu de la nuit (Landsberg, 1981 ; Ackerman, 2007) (cf. figure 3). Ce qui est caractérisé ici, c'est le retard de refroidissement nocturne du tissu urbain relativement au refroidissement nocturne de sa périphérie rurale.

2.4.2 La couche de canopée urbaine (UCL)

L'UCL est constituée du volume d'air compris entre les bâtiments, le sol et une surface imaginaire située au dessus du toit des bâtiments (Szpirglas et Voogt, 2003).

L'échelle considérée ici est infra urbaine et de l'ordre de la dizaine de mètre (Oke, 2004). L'unité géographique de référence pour l'étude des phénomènes microclimatiques de l'UCL est le canyon urbain (urban canyon : UC). Le canyon urbain est l'espace entre deux bâtiments adjacents, qui s'étend le long d'un tronçon de voie, et dont les limites horizontales sont le sol et le toit de bâtiments (Nunez et Oke, 1977) (cf. figure 4).

L'ICU de l'UCL concerne la manifestation du phénomène dans les canyons urbains. Sa compréhension nécessite l'étude du volume d'air du canyon urbain ainsi que ses échanges avec les surfaces. A cette échelle, le phénomène est caractérisé par une variabilité spatiale importante (Nakamura et Oke, 1988) qui se manifeste particulièrement en journée (Goldreich, 1985), gouvernée par l'hétérogénéité de la morphologie du tissu urbain (Hart et Sailor, 2007). Ainsi, lorsque l'on étudie le phénomène d'ICU au niveau de l'UCL par vents faibles on peut observer des ICU multicellulaires dont les cœurs sont répartis sur toute l'aire urbaine, formant ainsi des archipels de chaleur (Klysiak et Fortuniak, 1999).

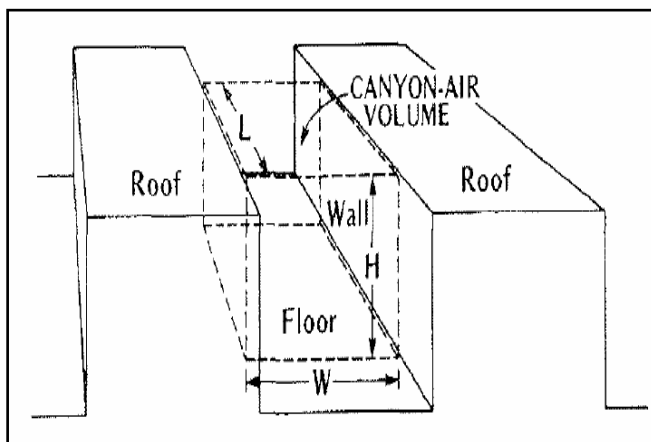


Figure 4 : canyon urbain (source : Nunez et Oke, 1977)

2.4.3 La couche de surface (SL)

La mesure de la température des surfaces en ville grâce à la télédétection a permis de mettre en évidence une troisième couche d'étude des microclimats urbains. Il s'agit de la couche de surface. Elle comprend toutes les surfaces horizontales de la ville et la fine couche d'air (quelques cm) située au dessus de ces surfaces. La température au niveau de cette couche d'air est fortement influencée par les échanges thermiques avec les surfaces (Nakamura et Oke, 1988).

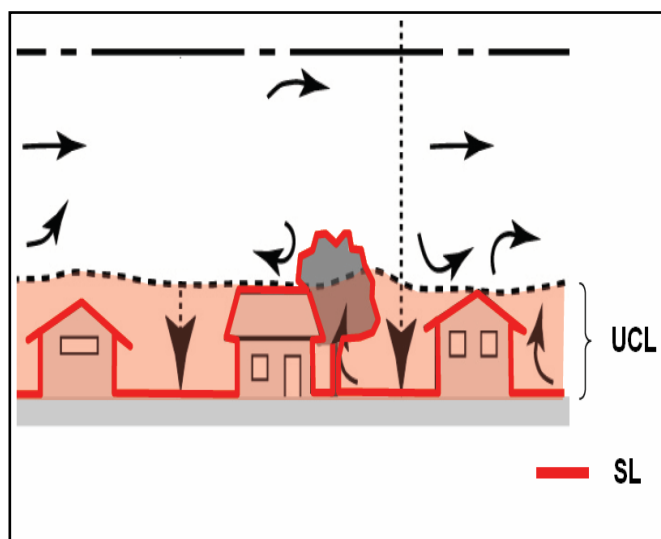


Figure 5 : schéma de l'UCL et de la SL (source : Voogt, 2007)

L'échelle considérée au sein de la SL est micro urbaine (Oke, 2004). Elle est de l'ordre de quelques mètres voire quelques centimètres. Au sein même de la ville, chaque surface et chaque objet, ainsi que leur proche environnement, possèdent un microclimat qui leur est propre. Les températures de surface et les températures de l'air peuvent varier sur des distances très courtes. Ainsi, c'est au sein de la SL que l'on va rencontrer les plus grandes variabilités spatiale du phénomène d'ICU (Chudnovsky et al., 2004).

Dans la SL, la formation et l'intensité des ICU sont gouvernées par les propriétés radiatives et thermiques des matériaux et la géométrie des rues (Arnfield, 2003). La

différence de température entre les surfaces urbaines et rurales est maximale le jour, au cours de l'après-midi.

2.5 Causes du phénomène d'îlot de chaleur urbain

La perturbation du milieu naturel par l'urbanisation engendre des phénomènes microclimatiques à la base des îlots de chaleur urbains.

2.5.1 Rétention de la chaleur par le tissu urbain

De par ces caractéristiques structurelles et morphologiques, la ville est capable de stocker et de piéger la chaleur issue du rayonnement solaire.

A) Rôle des propriétés radiatives et thermiques des matériaux

Les matériaux utilisés dans la construction des bâtiments et le revêtement des sols ont des propriétés optiques et thermiques favorisant la rétention de la chaleur par le tissu urbain. La journée, les propriétés optiques des matériaux de la ville gouvernent le stockage de la chaleur issue du rayonnement solaire incident direct. Ce processus va participer à l'augmentation de la température des surfaces (Oke et Maxwell, 1975) et ainsi au phénomène d'ICU dans la SL. Afin de représenter ces propriétés, les auteurs utilisent une grandeur appelée albédo (A). L'albédo correspond au pouvoir de réflexion d'une surface exposée à la lumière (Taha, 1997). C'est une grandeur sans dimension, comprise entre 0 (pour une surface absorbant la totalité de la lumière incidente : corps noir) et 1 (pour une surface réfléchissant la totalité de la lumière incidente). Plus A est faible, plus la surface considérée va absorber l'énergie provenant du rayonnement solaire. Les matériaux constitutifs des villes présentent des albédos relativement faibles. Pour les villes européennes, l'albédo moyen est de 0,15 (Taha, 1997). Les matériaux de la ville présentent des émissivités, des conductivités thermiques et des capacités thermiques élevées (Mills, 2005). A partir de la fin de la journée et pendant toute la nuit, ces caractéristiques vont être responsables de l'émission, sous forme de rayonnement infra rouge, de l'énergie stockée par les matériaux durant la journée (Ackerman, 2007). Ce processus va se traduire par un transfert de chaleur, des matériaux au volume d'air du canyon urbain et ainsi alimenter le phénomène d'ICU au niveau de l'UCL.

B) Rôle de la géométrie des canyons urbains

La géométrie des canyons urbains contribue à l'accumulation et à la rétention de la chaleur. La journée, les rayons solaires incidents sont piégés dans les canyons par les multiples réflexions qu'ils subissent sur les parois verticales du canyon. Ceci participe au

stockage de la chaleur dans les matériaux constitutifs du canyon (Nakamura et Oke, 1988). A partir de la fin de la journée, et durant toute la nuit, la faible ouverture vers le ciel dans les canyons urbains, va entraîner la capture de la chaleur réémise par les surfaces lors du processus décrit au § 2.5.1.1. (Oke, 1981). C'est la cause de l'absence de refroidissement nocturne de l'air des canyons urbains.

Le Sky View Factor (SVF) est une grandeur qui permet d'apprécier l'interface hémisphérique de contact direct entre une surface située au centre du canyon et le ciel (Nakamura et Oke, 1988). Plus le Sky View Factor est faible plus l'interface est petite. Ainsi dans les canyons urbains, on peut rencontrer des Sky View Factor très faibles, traduisant l'obstruction de l'horizon par les bâtiments. Cette grandeur permet de caractériser la capture de la chaleur s'échappant des surfaces vers le ciel. Plus le Sky View Factor sera faible, plus la chaleur s'échappera difficilement.

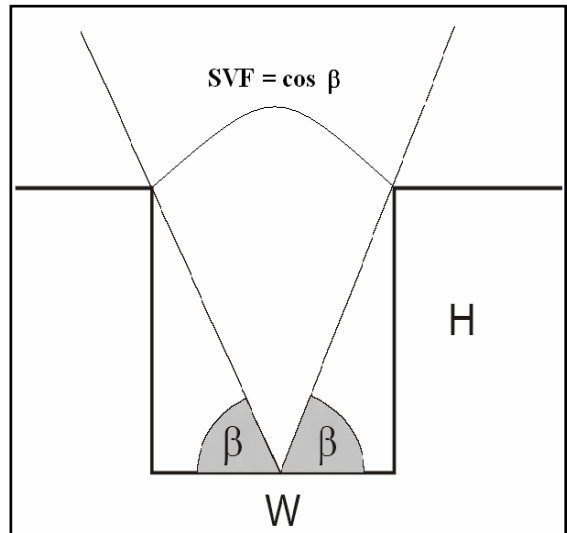


Figure 6 : Schéma d'un canyon urbain (source : Mills, 2005)

La géométrie d'un canyon urbain est caractérisée par son Aspect Ratio (AR) (Oke, 1981). Il s'agit du rapport de la hauteur moyenne des bâtiments délimitant le canyon (H) sur la largeur de la rue (W). Ce rapport permet de caractériser la capture des rayons solaires lors de leurs multiples réflexions sur les façades verticales du canyon. Il constitue également une bonne approximation du Sky View Factor (Mills, 2005). Ainsi, plus ce ratio est grand, plus le canyon aura tendance à capturer les rayons incidents et la chaleur réémise par rayonnement infra rouge à partir des surfaces.

C) Rôle de l'exposition des surfaces au rayonnement solaire

L'exposition des surfaces au rayonnement solaire incident direct va influencer sur l'intensité du phénomène de rétention décrit précédemment. Plus les surfaces seront exposées, plus la chaleur stockée ou piégée sera importante. C'est la topographie et la morphologie du tissu urbain qui gouvernent l'exposition au rayonnement solaire.

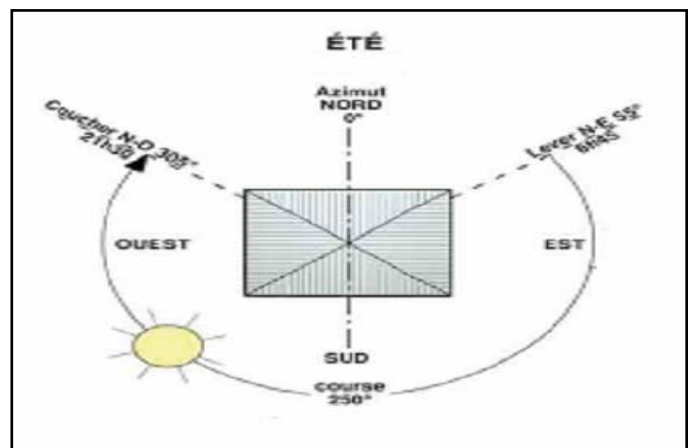


Figure 7 : course solaire d'été (source : AEU d'Albigny/Saône, Grand Lyon)

Si l'on souhaite s'intéresser à l'exposition des surfaces au rayonnement solaire, il faut dans un premier temps connaître la course du Soleil sur une journée. La figure 7 présente la course du Soleil en été, comme on peut la rencontrer aux latitudes des climats tempérés. On constate que les surfaces orientées au sud vont être les plus exposées, alors que le rayonnement solaire direct reçu par celles orientées au nord sera extrêmement faible.

Exposition du relief au rayonnement solaire : pour les lieux présentant un relief important, avec des courbes de niveau relativement resserrées, l'orientation des pentes va déterminer l'exposition du terrain au rayonnement solaire et donc l'exposition des zones urbaines qui y sont implantées. Ce n'est pas un paramètre que l'on retrouve dans toutes les villes. La littérature est assez pauvre au sujet de sa relation avec le phénomène des îlots de chaleur. Toutefois, dans le cadre du Grand Lyon, où l'on rencontre des zones urbanisées implantées sur des reliefs comme la colline de Fourvière ou les pentes de Croix Rousse, la topographie peut jouer un rôle dans l'exposition des surfaces au rayonnement solaire.

Exposition des canyons urbains au rayonnement solaire : l'orientation des rues joue un rôle important dans l'exposition des surfaces au rayonnement solaire (Santamouris et al., 2004). Elle détermine l'énergie solaire interceptée par les façades verticales et horizontales du canyon urbain. Les canyons orientés E-O, vont présenter, sur une journée estivale, des périodes d'exposition au rayonnement solaire direct plus grandes que les canyons orientés NE-SO, NO-SE et N-S, ces derniers représentant les canyons qui ont une période d'exposition la plus courte, concentrée en milieu de journée (Santamouris et al., 2004). Les canyons E-O, dont les façades qui les constituent sont orientées au nord ou au sud, reçoivent le maximum de rayonnement solaire au niveau du sol et des toits (Terjung et O'Rourke, 1980). A contrario, les canyons orientés N-S, dont les façades sont orientées à l'est ou l'ouest, reçoivent la majeure partie du rayonnement solaire direct au niveau des surfaces verticales. Le gain d'énergie au niveau des façades reste toutefois limité car les rayons solaires incidents présentent des angles (par rapport à l'horizontal) faibles (Santamouris et al., 2004).

Ombre : des études sur les températures de surface des zones urbanisées, ont montré que les surfaces à l'ombre pouvaient être jusqu'à 10°C plus froides que des surfaces exposées au rayonnement solaire direct (Chudnovsky et al., 2004). L'ombre prodiguée par les arbres et certains bâtiments, en fonction de la course du Soleil, réduit au niveau des surfaces l'énergie issue du rayonnement solaire en s'opposant à la pénétration des rayons incidents directs.

D) Pollution atmosphérique

Toutes les villes présentent des concentrations de polluants atmosphériques supérieures à celles du milieu rural. Cette pollution interagit avec le rayonnement solaire atteignant le tissu urbain. En absorbant le rayonnement solaire incident dans les faibles longueurs d'onde, la pollution diminue le rayonnement solaire incident reçu par les surfaces mais réémet des rayonnements infra rouge. Ce processus contribue à réduire la quantité d'énergie absorbée par les surfaces (Arnfield, 2007) mais réchauffe l'air des zones urbanisées polluées (atmosphere.mpg.de). Les composants atmosphériques en jeu dans ces processus sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et les particules. Ces deux effets antagonistes rendent difficile l'établissement d'une relation entre la pollution atmosphérique et les ICU. On a longtemps considéré qu'elle restait un facteur relativement faible dans le développement des ICU (Landsberg, 1981). De récentes études ont montré que la différence de température entre une zone polluée et une zone non polluée est faible et peut prendre des valeurs positives ou négatives (Arnfield, 2003). Il est donc difficile d'affirmer aujourd'hui que la pollution atmosphérique est un paramètre favorable aux ICU.

2.5.2 Perturbations de la dynamique des masses d'air

Toute perturbation de la dynamique des masses d'air a des conséquences climatiques. La topographie et la morphologie du tissu urbain sont à l'origine d'obstacles ou de zones d'écoulement préférentiel pour les masses d'air. Les obstacles vont entraîner une diminution de la vitesse du vent et des turbulences dans les phénomènes de convection verticale de l'atmosphère, induisant une mauvaise circulation des masses d'air qui contribue au développement des ICU. Les zones d'écoulement préférentiel, au contraire, vont augmenter la vitesse du vent, limitant ainsi le réchauffement l'air et favorisant le refroidissement des surfaces.

A) Rôle de la topographie

La topographie varie beaucoup selon la ville étudiée. Bien que la littérature fait état d'une relation causale entre topographie et ICU (Landsberg, 1981), aucune des études consultées n'étudie cette relation. Dans le cadre du Grand Lyon, ce paramètre ne doit pas être négligé car ce territoire présente des profils topographiques variés (zones encaissées, collines, plateaux, etc.) qui peuvent influencer sur la perturbation des masses d'air.

B) Rôle de la géométrie des canyons urbains

Le bâti est responsable, de par l'obstacle qu'il représente, de la perturbation des masses d'air au niveau de l'UCL (Chudnovsky, 2004). La géométrie des canyons urbains, caractérisée par l'Aspect Ratio, va gouverner les turbulences dans l'écoulement vertical par convection des masses d'air (Oke, 1999). On constate en effet le développement de turbulences à partir de $H/W=1$ (Nakamura et Oke, 1988). Ainsi, plus l'Aspect Ratio sera élevé plus les turbulences dans le canyon urbain vont contribuer au réchauffement de l'air dans l'UCL.

C) Rôle de la rugosité du tissu urbain

La rugosité du tissu urbain traduit la propension de la ville à s'opposer à l'écoulement de l'air. Cette grandeur caractérise un phénomène macroscopique dont l'échelle est de l'ordre du kilomètre. La rugosité gouverne la diminution de la vitesse du vent au niveau de l'UBL. Plus la rugosité sera importante, plus la circulation de l'air au dessus des toits de la ville sera perturbée, contribuant ainsi au développement de l'ICU au niveau de l'UBL. A l'heure actuelle, les méthodes mises au point pour évaluer la rugosité d'une surface urbanisée (maquettes en soufflerie, dispersion de traceurs dans l'atmosphère, modèles tri dimensionnel, etc.) et son influence sur les ICU ne font pas l'objet d'un consensus (Richard, 2007). Les rugosités du tissu urbain mesuré aujourd'hui sont encore assez peu représentatives de la réalité (Arnfield, 2003).

2.5.3 Réduction de l'évapotranspiration

Dans le milieu naturel, le phénomène d'évapotranspiration (évaporation au niveau du sol et transpiration foliaire (i.e. évaporation de l'eau par les feuilles des plantes) contribue à rafraîchir l'atmosphère. Lors du processus d'évaporation, l'air réchauffé par les rayons du soleil cède de l'énergie à l'eau présente dans le sol ou dans les plantes (Ackerman, 2007).

A) Rôle de l'imperméabilité des surfaces

En ville, les surfaces sont principalement constituées de matériaux imperméables (goudron, ciment, etc.). Ainsi, lorsqu'il pleut, l'eau ruisselle jusqu'aux réseaux de récupération d'eaux pluviales et la surface de la ville sèche rapidement (Taha, 1997). Le phénomène d'évaporation est donc très limité sur les surfaces des zones urbanisées. Cela contribue au stockage, par les matériaux, de l'énergie issue du rayonnement solaire.

B) Rôle de l'eau

Grâce au rafraîchissement induit par l'évaporation, les masses d'eau (plans d'eau, cours d'eau, etc.) jouent un rôle protecteur contre les îlots de chaleur. Comme le montre une étude réalisée à Washington D.C., la surface du fleuve Potomac, qui traverse la ville, présente une coupure au niveau du phénomène d'ICU diurne (Landsberg, 1981). Les mêmes conclusions ont été établies pour les villes de Bonn et Beuel, en Allemagne, avec le Rhin (Landsberg, 1981).

C) Rôle de la végétation

La végétation est défavorable aux ICU pour deux raisons. D'une part, les surfaces accueillant de la végétation sont relativement perméables. L'eau présente dans le sol contribue à rafraîchir l'air et la surface par évaporation (Arnfield, 2003). D'autre part, la végétation, par transpiration foliaire, participe à l'évapotranspiration et donc au rafraîchissement de l'air. Les arbres sont les éléments de la végétation qui s'opposent le plus efficacement aux ICU. Ils présentent en effet une transpiration foliaire importante et apportent un ombrage protégeant du rayonnement solaire direct (cf. § 2.5.1.C). En journée, les parcs urbains sont nettement plus frais que le reste de la ville. Ils présentent même des températures inférieures à la périphérie rurale. Certains auteurs parlent d'îlots de fraîcheur (Spronken-Smith et Oke, 1988). En été, l'après-midi, les parcs peuvent être 1 à 2°C, et jusqu'à 5°C, plus frais que leur environnement urbain (Spronken-Smith et Oke, 1988). La nuit, les zones boisées sont le siège d'îlots de chaleur nocturne de faible intensité, alors que les parcs comprenant de grandes surfaces enherbées restent plus frais que la ville de 1 à 2°C. La nuit, les zones arborées piègent la chaleur libérée par le sol sous forme de rayonnement IR car leur géométrie occulte l'ouverture vers le ciel (Taha, 1997). Les zones boisées sont plus chaudes que la périphérie rurale mais restent néanmoins plus fraîches que le reste de la ville (Spronken-Smith et Oke, 1988). La présence de végétation (arbres et végétation au sol) peut être caractérisée par l'Indice Différentiel de Végétation Normalisé (Normalized Difference Vegetation Index : NDVI). Cet indice est obtenu par télédétection à partir d'images satellites dans le visible et le proche infra rouge (Weng et al., 2004). Sur l'image étudiée, il renseigne sur la quantité et l'activité de la végétation.

2.5.4 Émission de chaleur par les activités anthropiques

Les activités humaines ont également un impact sur la formation et l'intensité des ICU. Les sources de chaleur que représentent les bâtiments (installations industrielles et bâtiments d'habitation), les transports et le métabolisme humain, contribuent à l'augmentation de la température de l'air des villes (Sailor et Lu, 2004).

Dans les études sur la relation entre chaleur anthropique et ICU, cet apport est exprimé sous la forme d'un flux de chaleur en W/m^2 . Il est noté Q_f , flux de chaleur anthropique totale. Cette grandeur est la somme du flux de chaleur émis par chaque source (Sailor et Lu, 2004). L'impact de la chaleur anthropique sur le climat est négligeable en banlieue et à la campagne et n'a une influence sur les ICU que lorsqu'il est combiné avec d'autres paramètres favorables au phénomène. Dans ce cas il peut contribuer au réchauffement des zones urbaines à hauteur de 1 à 3°C (Taha, 1997 ; Ichinose et al., 1999 ; Fan et Sailor, 2005 ; Sailor et Lu, 2004). De tous les paramètres favorables aux ICU, la chaleur anthropique est celui qui contribue le moins au phénomène (Taha, 1997 ; Ichinose et al., 1999 ; Sailor et Lu, 2004).

A) Rôle des bâtiments

Les sources fixes de chaleur anthropiques sont les installations industrielles et les bâtiments d'habitation. La littérature regroupe ces sources sous le terme « bâtiments ». C'est la consommation énergétique des bâtiments qui produit de la chaleur. En été, cette chaleur représente 48% de la chaleur anthropique totale (Sailor et Lu, 2004) et provient des activités industrielles et de la climatisation.

B) Rôle des transports

Dans les villes, la chaleur émise par les transports représente une part importante de la chaleur anthropique totale. En été, cette chaleur représente 50% de la chaleur anthropique totale (Arnfield, 2003 ; Sailor et Lu, 2004). Les études à ce sujet quantifient l'apport des transports à la chaleur anthropique totale grâce au flux de chaleur émis par les véhicules ou grâce au profil horaire du trafic routier et aux caractéristiques des voies circulables (Sailor et Lu, 2004).

C) Métabolisme humain

La chaleur issue du métabolisme humain est aussi prise en compte dans la chaleur anthropique totale. Cet apport peut toutefois être négligé, car il ne représente que 2% de la chaleur anthropique totale (Sailor et Lu, 2004), et n'aura qu'une influence très limitée sur les ICU.

2.6 Méthodes employées dans l'identification des ICU

2.6.1 Mesures *in situ*

La méthode d'étude des ICU la plus classique est la réalisation de mesures de température de l'air au niveau de l'UBL (Oke et al., 1992) ou de l'UCL (Nunez et Oke, 1977 ; Spronken-Smith et Oke, 1998 ; Klysiak et Fortuniak, 1999). Le calcul de l'intensité des ICU nécessite la mesure de T_r en un point de référence de la périphérie rurale. Cette température est sensée représenter la température de la zone étudiée si elle n'avait pas subi l'urbanisation. Il est possible d'utiliser des stations mobiles installées sur des véhicules pour caractériser les variations spatiales du phénomène (Hart et Sailor, 2007 ; Saaroni et al., 2000). Dans les études sur les ICU, de telles mesures ne sont pas utilisées seules. Elles sont souvent utilisées pour le calage de modèles informatiques (Szipirglas et Voogt, 2003), statistiques (Hart et Sailor, 2007) ou cartographiques (Hart et Sailor, 2007).

2.6.2 Télédétection

La télédétection permet d'étudier les ICU de la SL. L'imagerie satellite et les prises de vue aériennes permettent de mesurer trois grandeurs physiques relatives aux ICU de la SL : la température de surface du terrain (Land Surface Temperature : LST) (Weng et al., 2004 ; Yang et Liu, 2005), le NDVI (Weng et al., 2004) et l'albédo (Kim, 1992). La télédétection offre l'avantage de pouvoir travailler à l'échelle de toute une ville et ainsi de pouvoir observer les variations spatiales de la température des surfaces sur un vaste territoire. De plus, les outils actuels offrent de bonnes résolutions (16 cm pour les prises de vue aériennes et 1,1 km pour une image satellite type Landsat ETM+ imagery (Weng et al. 2004)). En contre partie, il s'agit d'une représentation de la réalité à un instant donné. La télédétection présente toutefois un inconvénient majeur. Les images satellites et les prises de vue aériennes verticales ne permettent pas de mesurer la température des surfaces verticales. Les outils de télédétection ne rendent pas compte de la contribution des façades au phénomène des ICU. Ceci peut être corrigé par des prises de vue obliques, à l'aide de caméras IR placées à quelques centaines de mètres d'altitude au sommet de bâtiments (Chudnovsky et al., 2004). Cette méthode se limite à un quartier et on perd l'étendue spatiale et la résolution offerte par l'imagerie satellite et la prise de vue aérienne. En raison des limites de ce type de méthodes, la relation entre température de surface et température de l'air, et donc entre ICU de la SL et ICU de l'UCL, est encore difficile à établir.

2.6.3 Modélisation

Des modèles informatiques ont été développés afin de simuler la répartition des températures et des flux énergétiques au sein d'un secteur urbanisé. Il existe deux type de modèle : les modèles atmosphériques, qui simulent la répartition des températures à l'échelle régionale et les modèles thermodynamiques, basés sur les échanges radiatifs et thermiques entre l'atmosphère et les surfaces du tissu urbain. Ces derniers simulent la répartition des températures à l'échelle intra urbaine. L'annexe 2 présente une description des modèles identifiés dans la littérature.

2.6.4 Géomatique

La géomatique est un outil efficace lorsque l'on souhaite étudier les disparités géographiques de variables liées à un phénomène commun. L'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) dans le champ des ICU est relativement récente et les études à ce sujet sont peu nombreuses. Deux études, réalisées à Lyon (Bridier et al., 2005) et à Rennes (Quénol et al., 2007), proposent de comparer la répartition du bâti et la topographie, supposées comme présentant une relation causale avec les ICU, avec des mesures de températures de l'air in situ et de températures des surfaces issues de la télédétection. Les résultats de ces études montrent une relation étroite entre température élevée et bâti très dense. Au Québec, dans une vaste démarche d'étude des ICU dans une perspective sanitaire, une publication fait état de la mise en évidence des ICU de Montréal en croisant, à l'aide d'un SIG, données sur le tissu urbain et températures des surfaces (Lachance et al., 2006). Les résultats montrent que les températures au sol les plus basses sont observées près des plans d'eau et des parcs urbains, les plus élevées étant observées dans les secteurs industriels et les zones résidentielles présentant une forte densité de bâti. Une quatrième étude s'appuyant sur l'utilisation de la géomatique a été menée à Portland, aux Etat-Unis, entre 2006 et 2007 (Hart et Sailor, 2007). L'objectif de ce travail était de mettre en évidence la variabilité spatiale de l'intensité des ICU. L'étude a comporté trois étapes : campagne de mesures in situ, construction d'un modèle de régression statistique et cartographie des ICU à l'aide d'un SIG. Les résultats du modèle de cette étude montrent qu'une grande proportion de surface de canopée arborée dans une maille réduit le risque d'ICU alors qu'une proportion élevée de surface bâtie favorise le risque d'ICU.

3 Elaboration d'une méthodologie d'identification des îlots de chaleur urbains sur le territoire du Grand Lyon

3.1 Contexte géographique et climatologique du Grand Lyon

L'étude des îlots de chaleur porte sur le territoire de la communauté urbaine de Lyon, le Grand Lyon. Il représente 57 communes et s'étend sur 51 500 hectares. Le territoire du Grand Lyon compte plus de 1 300 000 habitants soit 80% de la population du Rhône. Une carte du Grand Lyon est présentée en annexe 3.

Situation géographique : le territoire du GL est situé en Europe continentale, dans l'Est de la France, au confluent de la Saône et du Rhône. Il est entouré de plusieurs massifs montagneux, le Massif central à l'Ouest et les Alpes à l'Est. Lyon et sa région se situent à un carrefour de l'Europe de l'Ouest, reliant la mer du Nord à la Méditerranée, et l'Europe de l'Est à l'Atlantique. Le Rhône et la Saône sont les deux grands fleuves qui traversent le territoire du GL respectivement par l'est et par le nord. Au nord de Lyon, la Saône encercle L'île-Barbe puis se jette dans le Rhône au sud de l'agglomération.

Climat : le climat du Grand Lyon est de type semi continental avec des influences méditerranéennes. À Bron (station météorologique de la ville de Lyon), la température moyenne annuelle a été, entre 1921 et 2000, de 11,6°C avec un minimum de 2,8°C en janvier et un maximum de 20,9°C en juillet. La température minimale y a été de -24,6°C le 22 décembre 1938 et la plus élevée de 39,8°C le 22 juillet 1983. Cette température fut néanmoins battue, le 13 août 2003 avec 40,5°C. Les hivers sont relativement secs, et dépourvus de neige en plaine. Les frimas sont courants et les températures varient généralement d'une dizaine de degrés pendant la journée. Les étés sont généralement chauds et secs. Les températures moyennes sont généralement supérieures à 30°C. Le mois d'août est habituellement frais et pluvieux, avec quelques orages et une légère brise. Le territoire présente des vents faibles avec des vitesses minimales atteintes à partir de la rive gauche de la Saône.

3.2 Choix de la méthode

La synthèse réalisée au § 2.6 sur les méthodes utilisées dans l'identification des ICU a conduit à une réflexion sur le choix de la méthode qui allait être entreprise dans cette étude. En fonction des outils, du temps et des compétences disponibles il a été choisi de caractériser la distribution spatiale des ICU du Grand Lyon à l'aide d'un modèle cartographique réalisé sous SIG. A travers les études présentées au § 2.6.4, on a pu constater que la géomatique peut être appliquée avec succès à l'étude des ICU pour mettre en évidence ce phénomène et la variabilité de son intensité. L'originalité de la

démarche méthodologique proposée dans ce mémoire repose sur le croisement d'indicateurs présentant une forte corrélation avec le phénomène d'ICU devant mener à l'obtention de résultats précis.

3.3 Sélection des zones d'étude

Sur toute l'étendue du Grand Lyon, l'extraction et le traitement de données cartographiques sous SIG imposent un temps et une puissance de travail considérable. Dans le contexte du mémoire et afin de tester la méthode, il a été choisi de travailler sur quatre zones test, à l'échelle du quartier. La méthode de sélection des sites est basée sur la démarche proposée par l'Organisation Météorologique Mondiale (WMO) dans un guide de bonnes pratiques sur le choix des sites urbains pour les études météorologiques (Oke, 2004). A partir de la classification des secteurs urbanisés mise en place par Ellefsen en 1991, Oke a proposé une classification des zones de climat urbain (UCZ) (cf. annexe 5) (Oke, 2004). Cette classification permet de décrire des secteurs urbanisés, qui présentent une homogénéité dans leur capacité à influencer sur le climat urbain. En pratique, les échelles d'étude du microclimat urbain sont définies en fonction des caractéristiques morphologiques du tissu urbain. Comme nous l'avons vu, les paramètres qui établissent le paysage urbain affectent le climat urbain. L'objectif ici est de sélectionner des secteurs urbanisés homogènes en terme de microclimat urbain. Ceci implique une certaine homogénéité des paramètres qui influencent le climat sur l'aire urbaine étudiée. Les paramètres du tissu urbain rentrant dans la détermination des zones d'études sont : la structure urbaine (dimensions des bâtiments, espaces entre les bâtiments, largeur de la rue) ; l'occupation du sol (bâti, revêtement de chaussées, trottoir, végétation, eau, sol naturel) ; les matériaux du tissu urbain (matériaux de construction, éléments naturels) ; et le métabolisme urbain (eau, pollution, chaleur émis par les activités humaines). La démarche de sélection doit s'appuyer sur des photos aériennes et des plans d'occupation du sol. Dans le cadre de cette étude, la sélection a eut recours à Google Earth et aux PLU des communes du GL (analyse de l'occupation des sols basée sur le diagnostic de l'existant).

La démarche de sélection a aboutie au choix de quatre zones test, décrites en annexe 6 :

- **zone test n°1** : le quartier Gratte-Ciel (commune de Villeurbanne) caractérisé par une forte minéralisation et un bâti dense ;
- **zone test n°2** : l'ensemble Fourvière/Vieux Lyon/Presqu'île caractérisé par un bâti très dense et la présence d'un parc boisé ;

- **zone test n°3** : le plateau des Minguettes et sa couronne ouest (commune de Vénissieux) caractérisé par de grands ensembles d'habitat collectif et une forte densité de résidences pavillonnaires ;
- **zone test n°4** : Meyzieu sud-ouest, caractérisé par de l'habitat pavillonnaire peu dense.

L'étude des ICU du Grand Lyon doit permettre de mettre en évidence la variabilité spatiale au niveau de l'intensité du phénomène et de déterminer les zones les plus à risque en terme de chaleur. Le choix de zones relativement homogènes a permis de mettre en évidence les typologies de quartiers présentant une plus grande tendance à la présence d'ICU intense. Les zones ont également été choisies pour leurs différences. Cela a permis, en comparant les zones, d'étudier la variabilité du phénomène d'ICU sur le territoire du GL.

3.4 Démarche méthodologique

Les paramètres liés au tissu urbain et aux activités anthropiques ayant une influence sur le phénomène des ICU ont été sélectionnés. Afin de rendre compte de l'influence des ces paramètres sur l'intensité du phénomène, plusieurs indicateurs ont été choisis pour chaque paramètre. Un indicateur par paramètre a ensuite été sélectionné. L'extraction et le traitement des indicateurs ont été réalisés à l'aide d'outils géomatiques et de télédétection sur quatre zones test, à partir des bases de données du Grand Lyon. Chaque indicateur, en fonction de son échelle de valeurs et de sa relation avec l'intensité des ICU, a été doté d'une échelle de score sur 10 points. De même, chaque indicateur, en fonction de son influence sur l'intensité des ICU par rapport aux autres indicateurs, a été pondéré par un coefficient multiplicateur. Ces indicateurs ont alors été intégrés à un outil géomatique (Spatial Analyst) afin d'établir un modèle cartographique d'ICU. Chacune des mailles de la carte des îlots de chaleur possède un score ICU qui correspond à la combinaison linéaire des scores des indicateurs de la maille. L'extraction et le traitement des données cartographiques ont fait l'objet d'un rapport détaillant la méthodologie cartographique complète de l'étude, rédigée à l'intention du Grand Lyon pour la poursuite du projet. Le volume de ce rapport n'a pas permis son inclusion dans le présent mémoire.

3.4.1 Hypothèses

La validité du modèle cartographique qui a été mis en place dépend des hypothèses suivantes :

- On suppose que la relation causale entre les paramètres de la littérature et les ICU est vérifiée sur le territoire du Grand Lyon.

- On suppose que les indicateurs sélectionnés sont les plus pertinents pour caractériser l'intensité des ICU (on exclut le recours à une ACP : Analyse en Composantes Principales). La pertinence des indicateurs issus de la littérature est soutenue par une récente publication (Arnfield, 2003), synthétisant l'état de l'art sur les ICU. La pertinence des indicateurs a de plus été discutée et validée au cours d'échanges avec des experts en urbanisme, écologie urbaine, géomatique ou en énergétique.
- Cette réflexion sur la pertinence des indicateurs implique également le fait que les indicateurs sélectionnés mesurent bien un risque d'ICU intense (on exclut le recours à une vérification de l'unidimensionnalité des indicateurs).
- On suppose que les paramètres (et donc leur indicateur) sont indépendants. Il s'agit là d'une hypothèse simplificatrice.
- On suppose, dans un souci de simplification, qu'il existe une relation linéaire (sauf exception) entre la valeur des indicateurs et l'intensité des ICU.
- On suppose que les conditions optimales pour le développement des ICU sont réunies (conditions anticycloniques stables (ciel dégagé et vent très faible ($v < 1\text{m/s}$))
- La saison pour laquelle le modèle est valable est l'été.
- Les échelles d'étude du microclimat urbain qui ont été prises en compte dans ce travail sont la SL et l'UCL. Il s'agit d'échelles permettant d'étudier le phénomène des ICU à l'échelle infra urbaine et ainsi de caractériser les variations intra urbaines des îlots de chaleur. Ce sont également, de par leur caractère intra urbain les échelles les plus adaptées à la caractérisation de l'exposition de la population aux ICU.
- Le modèle présente une analyse globale des ICU sur un cycle de 24 heures.

3.4.2 Outils utilisés

L'étude des ICU du Grand Lyon a été réalisée à l'aide de trois Systèmes d'Information Géographique et d'un logiciel de télédétection et de traitement de l'image (la description de ces logiciels est présentée en annexe 4) :

- **ArcGIS** : plate forme SIG
- **FME** : traitement des données cartographiques
- **ER Mapper** : télédétection et traitement de l'image
- **Spatial Analyst** : traitement spatial de l'information

3.4.3 Choix des paramètres

La revue bibliographique a mis en évidence les phénomènes microclimatiques, liés à l'urbanisation, la topographie et l'impact des activités anthropiques, à la base des ICU (cf.

§ 2.5). Ces phénomènes sont causés par une série de paramètres, présentés dans le tableau 1.

Un travail de sélection de ces paramètres a été réalisé. Il s'est appuyé sur plusieurs réunions et échanges avec des producteurs ou gestionnaires de données, des chercheurs en géographie ou en climatologie, des urbanistes, des géomaticiens et des ingénieurs de la Mission Ecologie Urbaine du Grand Lyon.

Phénomène microclimatique	Paramètres
Rétention de la chaleur	Propriétés radiatives et thermiques des matériaux
	Géométrie des canyons urbains
	Exposition du relief au rayonnement solaire
	Exposition des canyons urbains au rayonnement solaire
	Exposition des façades au rayonnement solaire
	Ombrage
	Pollution atmosphérique
Perturbation de la dynamique des masses d'air	Topographie
	Géométrie des canyons urbains
	Rugosité du tissu urbain
Réduction de l'évapotranspiration	Imperméabilité des surfaces
	Rareté des masses d'eau
	Rareté de la végétation
Emission de chaleur par les activités anthropiques	Chaleur émise par les transports
	Chaleur émise par les bâtiments (hors industrie)
	Chaleur émise par l'industrie
	Chaleur émise par le métabolisme humain

Tableau 1 : paramètres influençant les ICU

A) Critères de sélection

Une série de critères a été défini pour cadrer l'étape de sélection des paramètres.

- Echelle d'étude : les paramètres doivent correspondre aux phénomènes des ICU aux niveau de l'UCL et de la SL

- Zones d'étude : les paramètres doivent décrire la réalité des zones étudiées
- Faisabilité d'extraction d'un indicateur : une réflexion a priori a été menée sur l'extraction des indicateurs devant représenter un paramètre. Si la disponibilité des données brutes et des outils ainsi que les compétences ne permettaient pas d'extraire un indicateur suffisamment pertinent pour quantifier un paramètre, ce paramètre a été exclu.
- Impact du paramètre sur l'intensité des ICU : les paramètres doivent avoir un impact suffisamment élevé sur les ICU pour justifier de la pertinence de leur sélection.

B) Paramètres exclus

Les paramètres ne répondant pas aux critères de sélection ont été exclus. L'exclusion de certains paramètres mérite d'être éclairée :

Rugosité du tissu urbain : la mesure d'un tel paramètre sur une surface urbanisée n'est pas chose aisée (cf. 2.5.2.C). Il avait toutefois été envisagé d'attribuer des classes de rugosité à des sous secteurs délimités à l'intérieur de chaque zone. Ces classes de rugosité sont définies en fonction de la classe d'UCZ (cf. annexe 5). Les classes d'UCZ ont été définies dans l'étape de sélection des zones d'études (cf. § 3.3). Ce paramètre a été exclu car il ne répond pas au critère de l'échelle d'étude. En effet, la rugosité influe sur l'ICU de l'UBL.

Topographie : comme la rugosité, la topographie perturbe les masses d'air au niveau de l'UBL. Ne répondant pas au critère de l'échelle ce paramètre a été exclu.

Exposition des façades au rayonnement solaire : ce paramètre aurait permis de représenter l'influence du rayonnement solaire sur les façades ne bordant pas les canyons urbains (comme les façades de bâtiments situées dans les cœurs d'îlots de bâti). Toutefois, la complexité de l'extraction d'un indicateur caractérisant ce paramètre (orientation des façades) aurait nécessité le recours à une véritable expertise SIG difficile à mobiliser dans le temps imparti.

Industrie : les zones étudiées ne présentent pas d'installations industrielles émettant significativement de la chaleur. Dans le cadre de l'extension de cette étude à tout le territoire du Grand Lyon, il serait toutefois possible de travailler sur ce paramètre avec la base de données SIREN (Système Informatique pour le Répertoire des Entreprises et de leurs Établissements) de l'INSEE qui recense les entreprises, la localisation de leurs installations et leurs activités.

Métabolisme humain : ce paramètre a une influence négligeable sur les ICU (cf. § 2.5.4.C).

Pollution atmosphérique : ce paramètre a une influence négligeable voire nulle sur les ICU (cf. § 2.5.1.D)

Exposition du relief au rayonnement solaire : ce paramètre avait été sélectionné dans un premier temps pour caractériser la spécificité des pentes de Fourvière. L'indicateur choisi pour le représenter était l'orientation des pentes du terrain. Toutefois, le modèle ICU final, lorsqu'il intégrait cet indicateur, présentait des artefacts et de nombreuses valeurs aberrantes. Il s'est avéré que l'image issue du modèle numérique de terrain (MNT) ayant servi à extraire l'indicateur était biaisée (probablement une erreur lors de l'extraction et la conversion de l'image de base). Le temps a manqué pour réaliser une seconde opération d'extraction de l'orientation des pentes à partir d'une image correcte.

C) Paramètres sélectionnés

Les paramètres répondant aux critères de sélection ont été retenus. Ils sont présentés dans le tableau 2.

3.4.4 Choix des indicateurs

Afin de quantifier l'influence des paramètres sur le phénomène des ICU, une série d'indicateurs a été identifiée.

Paramètre	Indicateur(s) possible(s)
Propriétés thermiques et optiques des matériaux	Albédo
Géométrie des canyons urbains	Sky View Factor
	Aspect ratio
Exposition des canyons urbains au rayonnement solaire	Orientation des rues
Ombrage	Surface d'ombres portées
	Surface végétalisée (zone boisée)
Imperméabilité des surfaces	Surface imperméable
Rareté des masses d'eau	Surface en eau
Rareté de la végétation	NDVI
	Surface végétalisée
Chaleur émise par les transports	Flux de chaleur émis
	Profil du trafic
Chaleur émise par les bâtiments (climatisation)	Flux de chaleur émis
	Profil du trafic

Tableau 2 : paramètres sélectionnés et indicateurs possibles

Un indicateur unique a ensuite été sélectionné pour chaque paramètre, en fonction de la disponibilité des données. Les indicateurs retenus sont présentés dans le tableau 3.

Phénomène représenté	Paramètre	Indicateur retenu
Rétention de la chaleur	Propriétés thermiques et optiques des matériaux	Albédo
	Géométrie des canyons urbains	Aspect ratio
	Exposition des canyons urbains au rayonnement solaire	Orientation des rues
	Ombrage	Surface végétalisée (zone boisée)
Perturbation de la dynamique des masses d'air	Géométrie des canyons urbains	Aspect ratio
Réduction de l'évapotranspiration	Imperméabilité des surfaces	Surface imperméable
	Rareté des masses d'eau	Surface en eau
	Rareté de la végétation	Surface végétalisée
Emission de chaleur par les activités anthropiques	Chaleur émise par les transports	Profil du trafic
	Chaleur émise par les bâtiments (climatisation)	

Tableau 3 : indicateurs retenus

Le choix et l'exclusion de certains indicateurs nécessitent une explication :

Sky View Factor : le Sky View Factor n'a pas été retenu, bien qu'il s'agisse de l'indicateur le plus précis pour quantifier la propension d'un canyon urbain à capturer la chaleur, car il est calculé à partir d'une photo 'œil de poisson' et ce pour chaque canyon (Oke, 1988). L'Aspect Ratio a donc été retenu, d'autant plus qu'il permet une bonne approximation du Sky View Factor (cf. § 2.5.1.B).

Surface d'ombres portées : cet indicateur n'a pu être retenu car il nécessite le recours à une modélisation de la course solaire appliquée à une représentation en trois dimensions du bâti des zones étudiées. De tels outils n'étaient pas disponibles lors de la réalisation de l'étude. Le modèle prendra seulement en compte l'ombage offert par les arbres. La surface de canopée arborée a été inclus dans l'indicateur surface de végétation avec le score le plus important pour représenter à la fois l'ombre, la surface perméable et la transpiration foliaire présente au niveau des arbres.

NDVI : cet indicateur n'a pas été retenu car il nécessite l'utilisation d'une image satellite dans le proche infra rouge et le visible. De telles données n'étaient pas disponibles au moment de l'étude. L'exclusion du NDVI implique que le modèle n'inclura pas d'information sur l'activité chlorophyllienne de la végétation. On émet alors l'hypothèse suivante : la végétation des zones étudiées, qui appartient en majorité à des espaces

verts aménagés, est entretenue et arrosée, et maintient en été une activité chlorophyllienne et un phénomène d'évapotranspiration.

Profil du trafic : cet indicateur a été choisi car le Grand Lyon dispose d'une modélisation du trafic. Ces caractéristiques ont permis d'établir une formule caractérisant la chaleur dégagée par le trafic (cf. annexe 7). Cet indicateur a également été sélectionné pour les bâtiments. On considère tout d'abord, qu'en été, la majorité de la chaleur dégagée par les bâtiments est due au rejet de chaleur des systèmes de climatisation des commerces et des bureaux. Il s'est avéré difficile de déterminer pour chacun de ces bâtiments la chaleur dégagée. Toutefois, on connaît la proportion de chaleur dégagée par les transports et par la climatisation (cf. § 2.5.4.A). Il suffit donc d'appliquer aux bâtiments l'indicateur des transports avec un coefficient multiplicateur.

3.4.5 Extraction des indicateurs

Les indicateurs sélectionnés ont été extraits des bases de données du Grand Lyon à l'aide d'outils géomatiques et de télédétection. Les couches cartographiques obtenues à l'issue de ces extractions présentaient des données sous forme de vecteurs (polygones) ou d'images (rasters). L'annexe 8 présente en détails cette étape.

3.4.6 Attribution des scores

Afin de représenter l'influence des indicateurs sur les ICU, des scores leur ont été attribués. Ces scores représentent l'intensité des ICU. Les indicateurs, selon leur valeur ou leur classe ont été dotés d'une échelle de score s'étendant de -10 à 10. Les scores négatifs ont été attribués aux indicateurs défavorables aux ICU et les scores positifs aux indicateurs favorables aux ICU. Les détails de la construction des échelles de scores sont disponibles en annexe 9. Cette étape présente des limites en raison du manque d'information sur les relations existant entre indicateurs et intensité des ICU. L'ensemble des scores est présenté dans le tableau 4.

SCORE	AR	Albédo	Orientation canyon	Qf (ltrans)	Surface en eau	Végétation
-10	-	-	-	-	-	Arbres
-5	-	-	-	-	-	Arbustes
-4	-	-	-	-	-	Végétation au sol
0	[0; 0,2[	1	-	[0-250[	Surface en eau	-
1	[0,2; 0,25[	[0,95-1[	-	[250-500[-	-
2	[0,25; 0,3[	[0,85-0,95[	N-S	[500-750[-	-
3	[0,3; 0,4[	[0,75-0,85[	-	[750-1000[-	-
4	[0,4; 0,5[	[0,65-0,75[	-	[1000-1250[-	-
5	[0,5; 0,65[	[0,55-0,65[	Autre	[1250-1500[-	-
6	[0,65; 0,8[	[0,45-0,55[	-	[1500-1750[-	-
7	[0,8; 1,05[	[0,35-0,45[	-	[1750-2000[-	-
8	[1,05-1,35[	[0,25-0,35[	-	[2000-2250[-	-
9	[1,35; 1,7[	[0,15-0,25[	-	[2250-2500[-	-
10	$\geq 1,7$	[0,05-0,15[	E-O	≥ 2500	-	-

Tableau 4 : scores des indicateurs

3.4.7 Hiérarchisation des paramètres

Tous les paramètres identifiés précédemment n'ont pas la même influence sur les ICU. Pour rendre compte de cette réalité, les indicateurs ont été hiérarchisés. Aucune étude ne donne la hiérarchisation des paramètres en fonction de leur influence sur les d'ICU. On peut toutefois noter les théories suivantes : la géométrie du canyon urbain est le paramètre influent le plus les ICU (Saaroni et al., 2000 ; Arnfield, 2003). De même, certains auteurs soulèvent le fait que les propriétés radiatives et thermiques des matériaux ont approximativement la même influence sur les ICU (Terjung et O'Rourke, 1980; Arnfield, 2003). Comme nous l'avons vu au § 2.5.4, la chaleur anthropique est le paramètre qui influe le moins sur les ICU (Taha, 1997 ; Ichinose et al., 1999 ; Sailor et Lu, 2004). L'influence des autres paramètres n'apparaissant pas dans la littérature, on a considéré qu'ils avaient une influence significative sur les ICU bien qu'inférieure à celle de la géométrie des canyons urbains et des propriétés des matériaux. Pour l'eau, nous savons qu'elle tend à faire disparaître le phénomène d'ICU au niveau des surfaces qu'elle

recouvre (Landsberg, 1981). On a ainsi attribué des rangs aux paramètres afin des les hiérarchiser. Le rang 1 correspond aux paramètres ayant l'influence la plus élevée sur les ICU et le rang 3 l'influence la plus faible. Le rang nul correspond à l'eau.

Rang	Paramètre
1	Propriétés thermiques et optiques des matériaux
1	Géométrie des canyons urbains
2	Exposition des canyons urbains au rayonnement solaire
2	Ombrage
2	Imperméabilité des surfaces
Nul	Rareté des masses d'eau
2	Rareté de la végétation
3	Chaleur émise par les transports
3	Chaleur émise par les bâtiments (climatisation)

Tableau 5 : hiérarchisation des paramètres

3.4.8 Pondération des indicateurs

Il n'existe pas dans la littérature, d'étude intégrant l'influence de tous les paramètres, ni d'étude établissant de rapport chiffré sur la proportion de l'influence d'un paramètre par rapport aux autres sur les ICU.

L'attribution des coefficients de pondération s'est cependant appuyée sur le bilan énergétique et l'équation d'équilibre énergétique (cf. annexe 10). On a ainsi tenté d'établir la proportion de l'influence des indicateurs sur l'intensité des ICU :

$$Q^* = Q_h + Q_e + \Delta Q_s$$

Une étude a montré qu'en été, on pouvait observer la répartition suivante (Arnfield, 2003) : $Q_h = 40\%Q^*$; $Q_e = 30\%Q^*$ et $\Delta Q_s = 30\%Q^*$

Certains des paramètres utilisés dans cette étude ont une influence sur le bilan énergétique. Les membres de l'équation peuvent donc être associés à certains des indicateurs. En s'appuyant sur la répartition des membres de l'équation, un coefficient multiplicateur de pondération a été proposé :

Flux de chaleur	Indicateur	%Q*	Pondération
Q _h	Aspect Ratio	40	8
ΔQ _s	Albédo	30	6
Q _e	Surface imperméable	30	6
	Surface végétalisée		

Tableau 6 : échelle de pondération

Pour la chaleur anthropique, plusieurs études ont évalué la moyenne journalière estivale du flux d'énergie radiative total (Q^*) et de la chaleur anthropique totale (Q_f) (Oke et Maxwell 1975 ; Taha, 1997 ; Arnfield, 2003 ; Sailor et Lu, 2004). A partir des valeurs présentées dans ces différentes études, des valeurs adaptées au contexte du Grand Lyon ont été proposées :

$$Q^* = 400 \text{ W/m}^2 \text{ et } Q_f = 20 \text{ W/m}^2 \text{ soit } Q_f = 5\%Q^*$$

En se basant sur la hiérarchisation réalisée au § 3.4.7, les informations ci-dessus ont été complétées et corrigées pour obtenir les coefficients de pondération suivants :

Rang	Indicateur	Coefficient de pondération
1	Albédo	8
1	Aspect Ratio	8
2	Orientation des rues	6
2	Surface imperméable	6
2	Surface végétalisée	6
3	I_{trans}	1
Nul	Surface en eau	1

Tableau 7 : coefficients de pondération

Ces coefficients constituent un point de départ vers un perfectionnement du modèle. La future méthode de validation du modèle permettra un calage de ces valeurs.

3.4.9 Choix de l'unité géographique

L'unité géographique choisie pour cette étude est une maille carrée de 5 m de côté. La nature de cette unité dépend des outils utilisés, en particulier Spatial Analyst. Le travail de construction du modèle sous Spatial Analyst a été réalisé en travaillant avec des données images de type raster. Les images rasters sont constituées de pixels qui représentent l'unité géographique de l'étude. La taille des pixels fixe la dimension de la maille. La taille des pixels a été choisie en fonction de l'aire des zones étudiées. Ces zones étant relativement peu étendues à l'échelle du GL, une taille relativement faible a été choisie afin de pouvoir observer des variations dans les résultats du modèle cartographique. A l'échelle du GL, l'objectif étant de mettre en évidence les quartiers les plus à risque de présenter des ICU intenses, une maille plus importante devra être choisie, de l'ordre de la centaine de mètres.



Figure 8 : exemple d'image raster (extrait de la classification des toits plans de la zone n°2)
3.4.10 Construction du modèle

La construction du modèle ICU a été réalisée sous Spatial Analyst. Une première étape a consisté à convertir toutes les données vectorielles (polygones) en données rasters. Pour chaque indicateur, on a ainsi obtenu une couche de données rasters où la répartition des pixels représentait la distribution spatiale des indicateurs. A chaque pixel, une valeur a été attribuée. Elle correspond au score que prend l'indicateur à l'endroit où le pixel est localisé.

Toutes les couches rasters on ensuite été intégrées dans Spatial Analyst. Grâce à l'outil 'calculatrice raster' de ce logiciel, les couches ont pu être superposées en réalisant une combinaison linéaire des couches en fonction des coefficients de pondération. On a ainsi obtenu une couche raster des ICU de chaque zone. Elle représente la distribution spatiale de l'intensité des ICU de la SL et de l'UCL confondue, sur un cycle de 24 heures. Chaque pixel de cette couche possède une valeur qui est le SCORE ICU et qui correspond, pour cette localisation, à la combinaison linéaire des scores de chaque indicateur, en fonction de leur coefficient de pondération.

$$\text{SCORE ICU} = 8\text{SCORE}[\text{Albédo}] + 8\text{SCORE}[\text{AR}] + 6\text{SCORE}[\text{Orientation_rue}] + 6\text{SCORE}[\text{Surface_imperméable}] + 6\text{SCORE}(\text{Surface_végétalisée}) + \text{SCORE}[\text{Surface_eau}] + \text{SCORE}[\text{Qf}]$$

Les scores ICU calculés par le modèle ont été standardisés (en divisant le score par le maximum pouvant être atteint) afin d'obtenir des pourcentages. Ces pourcentages ont été regroupés en cinq classes : îlot de fraîcheur (correspondant à un ICU négatif), ICU nul, ICU faible, ICU moyen et ICU intense. Une couleur a été attribuée à chaque classe afin de représenter sur une carte la répartition spatiale des différentes intensités d'ICU.

3.4.11 Représentation des résultats

En fonction de la distribution des scores obtenue sur les quatre zones test, cinq classes de score ICU standardisé ont été définies (cf. cartes ICU annexe 11). Elles représentent 5 catégories d'ICU : ICU négatif ou îlot de fraîcheur, absence d'ICU ou ICU nul, ICU faible, ICU moyen et ICU intense. Chacune de ces classes a été dotée d'une couleur afin de représenter lisiblement la distribution spatiale de l'intensité des ICU.

3.5 Résultats

3.5.1 Cartes d'ICU

Les cartes ICU pour l'ensemble des zones test sont présentées en annexe 11. L'observation et l'analyse de ces cartes permettent de constater des résultats communs à toutes les zones. Toutes les zones présentent des caractéristiques communes. On

constate en effet que les intensités d'ICU les plus élevées sont localisées au niveau des rues. Cela traduit la concentration de facteurs favorables aux ICU au niveau des canyons urbains (géométrie de la rue, matériaux de voirie, absence de végétation, imperméabilité des revêtements, transports, etc.). Il faut également préciser qu'au niveau des rues ce modèle rassemble les ICU de la SL et de l'UCL. Au niveau des bâtiments, le modèle cartographique donne des ICU de faible intensité. Ce qui est traduit ici est l'influence des matériaux de toiture sur la température des surfaces de toits ainsi que sur la température de l'air à proximité de ces surfaces. L'influence de l'imperméabilité des surfaces est également représentée au niveau de ces zones. On constate également la présence d'ICU d'intensité négative ou îlot de fraîcheur. Ces zones correspondent aux zones végétalisées. D'après la définition de l'intensité par la littérature, les ICU d'intensité négative sont des secteurs urbanisés plus frais que la périphérie rurale. On observe au centre de la carte de la zone n°1 des polygones jaunes (ICU faibles) au niveau d'un ICU moyen. Il s'agit d'un canyon urbain comportant des arbres d'alignement. Les arbres d'alignement permettent au niveau des rues de réduire les ICU d'un niveau moyen à un niveau faible. Les ICU intenses se concentrent dans les canyons urbains présentant un fort Aspect Ratio, des trottoirs en asphalté, un trafic important et l'absence d'arbres d'alignement. Il s'agit le plus souvent de canyons orientés est-ouest.

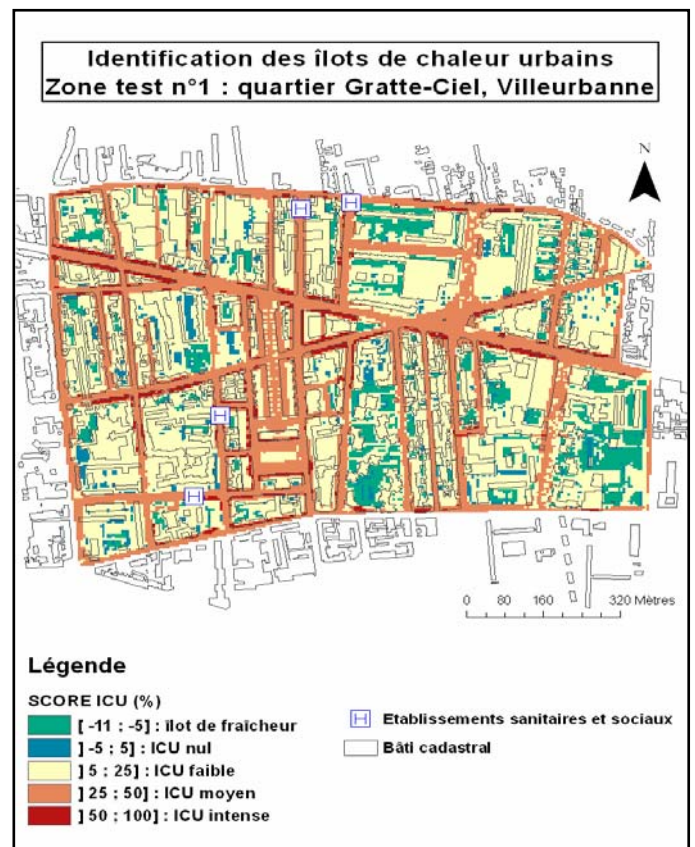


Figure 9 : carte ICU, zone test n°1

3.5.2 Distribution des scores

Il est possible d'étudier la distribution des différentes classes d'ICU en travaillant sur la fréquence d'apparition des pixels en fonction du score ICU qu'ils contiennent. Prenons l'exemple de la zone test n°2, qui possède la plus grande variété de territoires (parcs boisée, hypercentre, cours d'eau, etc.). L'annexe 12 présente les histogrammes des 4 zones.

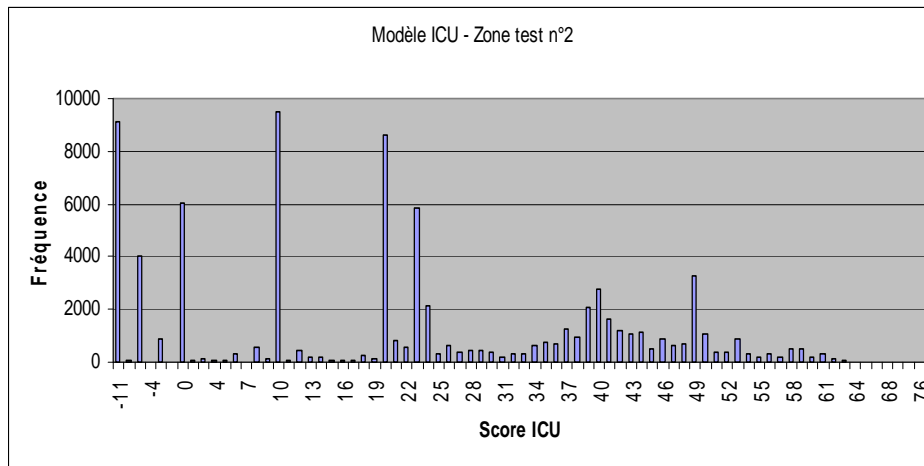


Figure 10 : distribution des scores, zone test n°2

Cet histogramme regroupe un certain nombre de caractéristiques semblable à toutes les zones. En étudiant la distribution spatiale des paramètres et des scores on a établi une relation entre les pics de fréquences et les paramètres. En effet, les pics de fréquence correspondent à des secteurs où se concentre un paramètre en particulier :

- pic à -11% : zone boisée
- pic à -5% : végétation au sol
- pic à 10% : surface imperméable (au niveau des cœurs d'îlots de bâtiments)
- pic à 20% : toiture en tuile claire
- pic à 23% : toiture en tuile sombre

La distribution des scores au-delà de 25% correspond aux ICU situés dans les canyons urbains, où se concentrent plusieurs paramètres.

3.5.3 Comparaison des zones

Afin de comparer les zones entre elles, les fréquences d'apparition des classes ont été standardisées et exprimées en pourcentage.

SCORE ICU	CLASSE	FREQUENCE RELATIVE (%)			
		Zone test n°1	Zone test n°2	Zone test n°3	Zone test n°4
[-11;-5]	llot de fraîcheur	7,90	16,63	35,62	35,62
] -5; 5]	ICU nul	3,78	9,20	6,04	6,04
] 5; 25]	ICU faible	54,40	38,16	44,45	44,45
] 25; 50]	ICU moyen	30,88	30,52	13,78	13,78
] 50; 100]	ICU intense	3,03	5,49	0,11	0,11

Tableau 8 : fréquence relative d'apparition des pixels scorés pour les quatre zones test

L'histogramme de la figure 12 représente la distribution des classes pour les quatre zones test :

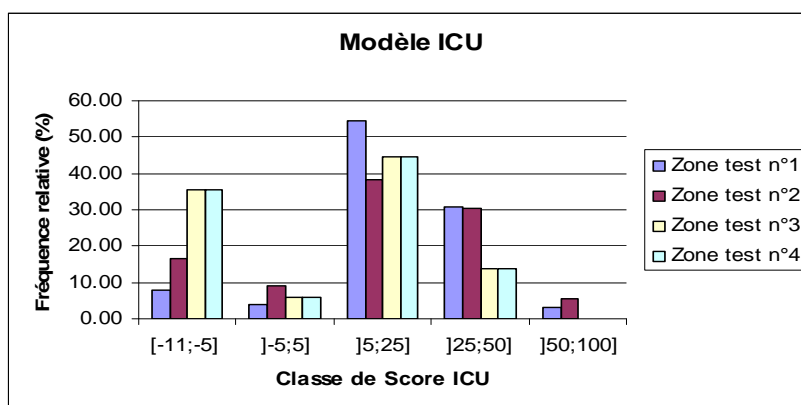


Figure 11 : histogramme de distribution des classes de score ICU pour les quatre zones test

On constate que ce sont les zones test 1 et 2 qui présentent le plus de risque de voir apparaître des ICU intenses. Cela est dû à une forte minéralisation de ces zones, ce qui induit une faible fréquence d'ICU négatif (la zone deux présente cependant environ 15% d'ICU négatif grâce au parc des hauteurs situé sur la colline de Fourvière). La fréquence d'ICU faible est d'environ 40 à 50% pour les quatre zones. Ce type d'ICU traduit la minéralisation des surfaces et l'imperméabilité qui en découle. Dans les zones 1 et 2 la fréquence d'ICU moyens et intenses est plus élevée principalement en raison de la géométrie des canyons urbains, qui présente dans ces zones de forts AR. A contrario, la fréquence d'apparition d'ICU moyens et intenses dans les zones 3 et 4 est quasi nulle car dans ces secteurs pavillonnaires ou ces grands ensembles l'aspect ratio est faible en raison de rues larges ou de bâtiments bas. La fréquence d'ICU nul est inférieure à 10% pour toutes les zones Elle est principalement liée à la végétation au sol. Un maximum de 9,20% est atteint dans la zone n°2 avec l'apport de la Saône. L'étude des Minguettes nous a permis de caractériser le phénomène d'ICU au niveau de grand ensemble d'habitats collectifs. Ce type d'occupation du sol n'apparaît pas dans les études des ICU. Les résultats montrent de faibles ICU et des îlots de fraîcheur au niveau de ce quartier. Cela est lié à l'espacement entre les immeubles et à la végétation les séparant. Bien que le risque de chaleur soit faible en dehors de l'habitat, l'exposition au rayonnement solaire et à la chaleur à l'intérieur de ce type d'habitat devrait être étudiée dans des perspectives sanitaires.

3.6 Discussion

3.6.1 Limite du modèle

Afin de rendre l'exploitation de ce modèle possible, il est indispensable de réduire les incertitudes qu'il présente. La plus grande lacune de ce modèle est le fait que les scores

et les coefficients de pondération ne soient pas calés sur la réalité du Grand Lyon. La mise en place d'une campagne de mesure de la température est donc nécessaire pour rendre exploitable ce modèle (cf. § 4.1). Le modèle ne prend pas en compte la relation entre les paramètres (orientation des rues et chaleur emmagasinée par les matériaux, orientation des rues et géométrie de la rue). Le modèle ne prend pas en compte l'influence de certains paramètres (eau, végétation, phénomène au niveau de la rue) en dehors de leur emprise surfacique. On a négligé le gradient d'influence que pouvait avoir un paramètre sur l'air ou les surfaces proches. Le modèle n'est pas assez précis lorsqu'il rend compte de l'exposition des surfaces au rayonnement solaire. Il devrait prendre en compte l'orientation des pentes (pour les zones présentant du relief), l'orientation des façades des bâtiments et une modélisation des surfaces à l'ombre (toits, façades, rues) en fonction des bâtiments pour la période estivale (nécessité d'un modèle d'ensoleillement en fonction de la course du soleil). Les différentes origines des données utilisées pour extraire les indicateurs ont entraîné quelques biais, notamment liés aux différentes dates d'acquisition des données brutes (classification de la végétation datant de 1997, quelques décalages entre les toits, le bâti et la voirie et l'ortho photo de 2003). Les études ayant permis la mise en évidence de ces indicateurs ont été réalisées sous des climats tempérés semblables à celui du Grand Lyon. Toutefois, dans la plupart des cas, la morphologie des villes étudiées est de type nord américaine et présente des différences avec les villes européennes comme Lyon. On observe sur les cartes obtenues des superficies non négligeables d'îlots de fraîcheur (en particulier pour les zones 3 et 4). L'apport de fraîcheur par la végétation a probablement été surestimé. Car, même si, en ville, des îlots de fraîcheur peuvent apparaître au niveau de zones boisées, l'apport de la végétation au sol à un rafraîchissement du tissu urbain de cette ampleur reste limité. Cette surestimation vient probablement du fait que l'on a considéré que même en été l'herbe n'était pas sèche et participait activement au phénomène d'évapotranspiration (score de -4/10 pour la végétation au sol). La zone test n°2 présente au niveau du Vieux Lyon et de la Presqu'île un nombre relativement élevé de canyon à forte intensité d'ICU. Cela est dû aux Aspect Ratios très élevés (jusqu'à 9) rencontrés dans cette zone. Or des Aspect Ratios aussi élevés devraient favoriser via l'ombrage une diminution de l'intensité des ICU. Cela n'est pas pris en compte dans le modèle. Des campagnes de mesure pourraient être réalisées afin de déterminer un seuil d'Aspect Ratio au-delà duquel l'influence de cet indicateur sur les ICU est défavorable. A partir d'une certaine valeur d'Aspect Ratio le rayonnement solaire pénètre moins facilement dans les canyons urbains. Les rues sont alors ombragées et fraîches comme cela est réputé dans le Vieux Lyon.

3.6.2 Adéquation des résultats avec les objectifs du mémoire

Le modèle cartographique des ICU a été bâti afin de déterminer les zones du Grand Lyon les plus à risque en terme de chaleur au sein desquelles des actions de prévention, par la DDASS et les collectivités territoriales, pourraient être ciblées. A ce stade du mémoire il convient de vérifier si les fonctionnalités du modèle cartographique mis en place peuvent répondre à cela.

Les résultats du modèle permettent bien de mettre en évidence les variabilités spatiales de l'intensité des ICU. Une fois calé et étendu au territoire du Grand Lyon, avec une résolution plus élevée, le modèle permettra de déterminer les secteurs du Grand Lyon présentant des ICU plus ou moins intenses. Il sera également possible d'extraire les résultats de la carte ICU du Grand Lyon en fonction d'un périmètre souhaité (IRIS par exemple) et de comparer différentes zones (cf. § 5.2.1) afin de prioriser des zones de prévention et d'action. Enfin, des établissements recevant du public, des ESS (cf. § 5.2) ou des adresses spécifiques (clusters de cas de décès lors d'une canicule par exemple) pourront être localisés sur la carte afin de déterminer le type d'ICU possible dans la zone où ils se situent.

4 Démarches de validation de la méthode

Afin d'être exploitables, les résultats du modèle mis en place doivent être validés.

- Afin de vérifier que les résultats du modèle représentent bien l'intensité des ICU de la réalité du territoire du GL, un protocole de mesure doit être envisagé.
- Dans une perspective de santé publique, il convient de vérifier si les zones à risque en terme d'exposition aux fortes chaleurs sont corrélées à la réalité de l'impact sanitaire observé en période de vagues de chaleur sur le GL.

Le temps imparti a contraint à exclure des objectifs du mémoire la réalisation de ces validations. Cependant, une réflexion a été menée sur les méthodologies à mettre en œuvre.

4.1 Approche métrologique

4.1.1 Mesures *in situ*

Une campagne de mesure *in situ* permettrait :

- La détermination d'une échelle de correspondance entre les valeurs des indicateurs liés à la température de l'air et l'intensité des ICU mesurée sur le territoire du GL. Il s'agirait alors de sélectionner des points de mesures en fonction de la valeur de l'indicateur étudié et d'y mesurer la température.
- Le calage des coefficients de pondération des indicateurs liés à la température de l'air. Il s'agirait ici d'établir un protocole de mesure permettant d'obtenir une cartographie de la température de l'air mesurée. Pour caler les coefficients de pondération, il s'agirait, en procédant par itération, de faire varier les coefficients du modèle pour que la carte des ICU du modèle corresponde à celle issue des mesures.
- La correspondance entre les valeurs des SCORE ICU exprimés en pourcentage et des intensités d'ICU exprimées en degrés Celsius.

La campagne de mesure peut être envisagée en partenariat avec :

Météo France : la station météorologique de Lyon Bron, dans le cadre de la Climathèque, centralise, produit et distribue des données horaires ou quotidiennes de température de l'air. Le réseau maillé comprend 20 postes de mesure de la température dans le département du Rhône, dont 2 à Lyon (Tête d'or et St Rambert) et une dizaine sur le territoire du GL (<http://climatheque.meteo.fr/>). Il s'agit d'une solution peu coûteuse (0.39 € H.T. les 10 données horaires) permettant de disposer de données fiables avec une grande variabilité temporelle. Toutefois, le maillage des stations sur le territoire du GL est

trop lâche pour être appliqué à l'étude des ICU qui nécessite une résolution intra urbaine relativement fine.

Un organisme de mesure (type AASQA) : la réalisation de campagnes de mesures par micro stations ou stations mobiles peut permettre d'obtenir des données relativement simplement, sur maillage pré déterminé. Le protocole le plus adapté pour mesurer les variations spatiales de l'intensité des ICU semble être la mesure de la température de l'air lors de parcours réalisé en véhicule (Hart et Sailor, 2007). Sur toute l'étendue du territoire du GL, cette option semble difficile à réaliser. Il s'agirait alors de sélectionner des zones types, représentant des secteurs urbanisés aux paramètres identiques. La sélection de ces zones pourrait se baser sur les critères des UCZ (Oke, 2004). Des mesures de jour et de nuit devraient être réalisées afin de prendre en compte les variations temporelles des ICU. Afin de répondre aux objectifs sanitaires de l'étude, les mesures devront être réalisées en période estivale, lorsque le niveau d'alerte MIGA, voire le niveau de mobilisation maximale, du PNC est déclenché. Le recours à cette méthode nécessite des corrections de la température mesurée afin de soustraire l'excès de chaleur généré par le véhicule sur lequel la sonde est installée.

4.1.2 Apports de la télédétection

L'utilisation des outils de mesure offerts par la télédétection permettrait de déterminer avec une grande précision les échelles de score et les coefficients de pondération des indicateurs liés à la température des surfaces, en particulier l'albédo. La mesure du NDVI permettrait également de déterminer les surfaces végétalisées avec une information sur leur activité chlorophyllienne et donc sur leur propension à participer au phénomène d'évapotranspiration. Dans une perspective de prévention sanitaire des fortes chaleurs, il conviendra de réaliser une prise de vue lors d'une vague de chaleur. L'acquisition d'une image prise dans l'après-midi et d'une seconde prise au milieu de la nuit permettrait de distinguer les ICU diurnes et nocturnes au niveau de la SL.

4.1.3 Apport de la modélisation météorologique

Dans le cadre de cette étude, le recours à la modélisation thermodynamique ou atmosphérique ne représente qu'une indication sur la validité du modèle cartographique qui a été mis en place. Le calage du modèle devra se baser sur une démarche météorologique basée sur des mesures *in situ* et la télédétection.

4.2 Approche sanitaire

4.2.1 Méthodologie

Smargiassi a récemment mis en évidence une association significative entre surmortalité liée à la chaleur en période de canicule et îlots de chaleur urbains (Smargiassi, 2008). La petite taille des échantillons étudiés ici (échelle de l'arrondissement ou de la commune) ne permettra sans doute pas une puissance statistique suffisante pour mettre en évidence une telle association sur le territoire du Grand Lyon. Toutefois, dans le but d'utiliser les travaux sur les îlots de chaleur à des fins sanitaires, une comparaison entre probabilité de présence d'îlots de chaleur urbains et surmortalité dans chaque arrondissement ou commune, pourrait être, en première approche, une façon intéressante de croiser données sanitaires et données liées à l'environnement urbain. De plus, cette démarche permettrait d'apporter une première validation à l'investigation des îlots de chaleur du Grand Lyon.

4.2.2 Période étudiée

La période étudiée est la période épidémique d'excès de mortalité, qui a eu lieu à Lyon, au cours de la vague de chaleur d'août 2003. Cette période s'étend du **7 au 15 août 2003** (InVS, octobre 2003).

4.2.3 Données nécessaires

Les données nécessaires peuvent être acquises auprès de l'INSERM (laboratoire CEPI Dc).

Données de mortalité relatives à la canicule de 2003 : il conviendra dans un premier temps de recueillir les mortalités enregistrées dans chaque commune ou arrondissement du Grand Lyon du 7 au 15 août 2003. Ces données constitueront les **mortalités observées (O_i)** lors de la canicule de 2003 sur le territoire du Grand Lyon. La commune ou l'arrondissement recensé devra correspondre au lieu de résidence et non au lieu de décès. Dans la perspective de l'étude présentée précédemment, il serait logique, à première vue, de ne prendre en compte que les décès directement imputable à la chaleur. Toutefois, en France, la prise en compte des décès dus uniquement à la chaleur (coup de chaleur, hyperthermie, déshydratation) ne suffit pas à fournir une bonne estimation de l'excès de mortalité associé aux vagues de chaleur. La mortalité pour d'autres causes (affections cardiovasculaires, respiratoires, circulatoires, etc.) augmente également au cours des périodes de fortes chaleurs. Il est donc important de considérer la mortalité toutes causes pour obtenir une estimation fiable de la mortalité associée à la chaleur (Fouillet et al., INSERM, décembre 2006).

Données de mortalité de 2000 à 2002 : les mortalités de chaque commune et arrondissement du Grand Lyon, enregistrées au cours de la période du 7 au 15 août, pour les années 2000, 2001 et 2002 seront également nécessaires. La commune ou l'arrondissement recensé devra correspondre au lieu de résidence et non au lieu de décès. Les mortalités de ces trois années seront moyennées pour constituer les **mortalités attendues (A_i)** (rapports InVS, octobre 2003 et juillet 2004).

4.2.4 Evaluation de la surmortalité : calcul différentiel de mortalité

Il s'agira ici de calculer l'excès de mortalité relatif (rapports InVS, octobre 2003, juillet 2004, octobre 2006) d'après la formule suivante :

$$\text{Excès relatif (\%)} = (O_i - A_i) * 100 / A_i \quad \text{avec } i : \text{commune ou arrondissement étudiée}$$

Zone d'étude	COMMUNE	dc2000	dc2001	dc2002	mortalité attendue	dc2003 = mortalité observé	Excès relatif de mortalité (%)
1	Lyon 1er arrondissement	1	3	2	2,00	7	250,00
	Lyon 2ème arrondissement	0	4	5	3,00	17	466,67
	Lyon 5ème arrondissement	10	12	16	12,67	31	144,74
2	Villeurbanne	19	17	22	19,33	60	210,34
3	Vénissieux	10	7	12	9,67	17	75,86
4	Meyzieu	2	2	3	2,33	9	285,71

Tableau 9 : calcul de l'excès relatif de mortalité du 7 au 15 août 2003 (source : CEPI Dc)

4.2.5 Comparaison de la cartographie des ICU à la surmortalité

Une association significative entre surmortalité liée à la chaleur en période de canicule et îlots de chaleur urbains a été mise en évidence à Montréal (Smargiassi, 2008). En supposant que cela est vérifié sur le territoire du Grand Lyon, la vérification de l'adéquation du modèle avec ses objectifs sanitaires consisterait à comparer, dans chaque commune et chaque arrondissement, les pourcentages d'excès de mortalité relatif avec la distribution des scores ICU. Toutefois, la non prise en compte des facteurs de risque individuels représente un biais trop important pour être négligé. Cette méthode ne peut pas valider un risque sanitaire où seule l'exposition au risque environnemental est prise en compte. Cette méthode pourra être appliquée à un modèle de risque sanitaire qui intégrera exposition et facteurs de risque.

5 Perspectives

5.1 Etude des ICU et perspectives sanitaires : projets en cours

L'application des connaissances sur les ICU à la caractérisation de l'exposition au risque sanitaire environnemental que représente la chaleur est un champ encore peu exploré. Le présent paragraphe propose une revue des études et démarches entreprises dans ce domaine.

5.1.1 Recours à la télédétection : les démarches entreprises en France

En réponse à l'appel d'offres de la Fondation MAIF : « Evolution climatique, risques engendrés et impact sur la société », l'InVS et le laboratoire Géomer UMR 6554 CNRS-LETG ont proposé un projet d'étude intitulé « Evolution climatique et canicule en milieu urbain : apport de la télédétection à l'anticipation et à la gestion de l'impact sanitaire » (Dousset et al., Laaidi et al, 2008). Ce projet a pour objectif d'apporter des connaissances permettant de déterminer des zones et des périodes présentant des températures significativement plus élevées. Il propose de produire de nouveaux indices thermiques, calculés à partir des données satellitaires d'août 2003, sur la région parisienne ; d'intégrer ces indices dans un modèle de régression logistique pertinent (ils seront pris en compte dans la gestion locale des risques sanitaires pour la ville de Paris) et d'élaborer une méthodologie d'intégration des données satellitaires à l'étude et à la gestion de l'impact sanitaire des vagues de chaleur dans les grandes agglomérations urbaines.

5.1.2 Intégration de la télédétection, de la géomatique et de l'épidémiologie : l'exemple québécois

Les études les plus intéressantes et les plus prometteuses, dans l'optique de l'application des études sur les ICU à des fins sanitaires, ont été réalisées au Québec par le Centre de recherche Léa-Roback sur les inégalités sociales et de santé de Montréal, l'Agence Nationale de Santé Publique et l'Université de Montréal. La réalisation d'une study crossover a permis de mettre en évidence une association significative entre surmortalité liée à la chaleur en période de canicule et îlots de chaleur urbains (Smargiassi, 2008). Un modèle cartographique a été bâti à l'aide d'un SIG, pour construire des cartes de risque lié à la chaleur en période de canicule à Montréal (Pitre, 2008). Ce modèle croise la cartographie des zones les plus exposées à la chaleur (déterminée par télédétection) et la cartographie des facteurs individuels de risque (déterminée lors d'enquêtes) afin de produire une carte de risque sanitaire en période de forte chaleur. Une étude réalisée à Montréal en juillet 2005 a permis d'étudier l'exposition à la chaleur à l'intérieur de l'habitat (Smargiassi et al., 2008). Un modèle de régression réalisé à partir de mesures de

températures intérieures et de déterminants géo référencés permet d'obtenir de manière très précise la distribution des températures intérieures sur tout le territoire de Montréal.

5.2 Applications du modèle pour la prévention et l'action sanitaire

Le modèle mis en place dans le § 3 permet de caractériser l'exposition aux fortes chaleurs par la mise en évidence de la variabilité spatiale de l'intensité des ICU. Lorsque le modèle sera opérationnel, il constituera un outil d'information, de prévention, d'aide à la décision et à l'intervention pour les autorités sanitaires et les collectivités territoriales.

Voici les fonctionnalités offertes par ce modèle :

- information du public sur l'exposition à la chaleur d'un quartier ou d'une adresse ;
- mise en évidence des secteurs où le travail physique sur les chantiers et les ateliers types pressing, fonderies doit être arrêté lors d'une vague de chaleur ;
- mise en évidence des secteurs où des salles d'accueil climatisées doivent être prévues ;
- mise en évidence des ESS qui doivent être particulièrement en alerte ;
- aide au choix d'un site pour l'implantation d'un nouvel ESS sensible (maison de retraite, établissement pour personnes handicapées, etc.)
- aide aux collectivités pour le recensement des personnes à risque lors d'une vague de chaleur ;
- mise en évidence de zones de fraîcheur dont la fréquentation peut être conseillée lors d'une vague de chaleur.

Les deux paragraphes suivants présentent en détail deux possibilités d'application du modèle à la prévention sanitaire des vagues de chaleur.

5.2.1 Caractérisation de la population exposée : exemple de la zone test n°1

Une des possibilités offerte par le modèle cartographique qui a été mis en place dans cette étude est l'extraction des scores ICU d'une zone particulière. Cela permet notamment de caractériser l'exposition à la chaleur dans une zone d'étude en analysant la distribution des scores ICU. Une fois cette exposition connue il est possible de caractériser la population exposée. Une méthode de caractérisation de la population exposée est présentée ici avec l'exemple de la zone test n°1. Il s'agit d'une application sanitaire du modèle, qui pourra être étendue à tout le Grand Lyon. La cartographie des IRIS de Villeurbanne a été croisée avec la carte ICU de la zone test n°1 (cf. annexe 13). La distribution des scores de chaque IRIS contenu dans le périmètre de la zone 1 a ensuite été extraite (cf. figure 14).

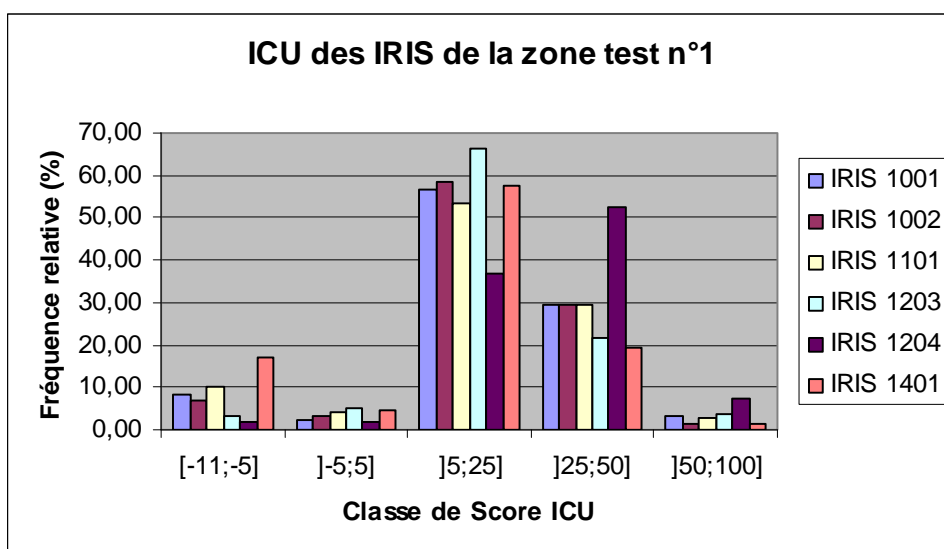


Figure 12 : ICU des IRIS de la zone n°1

Le pourcentage d'ICU moyen et intense a été calculé pour chaque IRIS. Les données démographiques infra communales à l'échelle de l'IRIS ont été acquises auprès de l'INSEE. Pour chaque IRIS on a ainsi pu disposer de la caractérisation de l'exposition à la chaleur (extérieure) et des caractéristiques de la population (sexe, tranche d'âge, population des collectivités, etc.). En ne gardant que les caractéristiques en lien avec les risques individuels en période de forte chaleur on obtient le tableau suivant :

Code de l'IRIS	Risque d'ICU moyen et intense (%)	Population totale par sexe			Population totale par âge			Population des collectivités
		Ensemble	Hommes	Femmes	< 15 ans	de 15 à 59 ans	60 ans et +	Maison de retraite
1001	32,72	2 493	1 141	1 352	369	1 375	749	0
1002	31,13	2 552	1 107	1 445	295	1 374	883	0
1101	32,53	3 618	1 695	1 923	705	2 285	628	0
1203	25,37	2 188	1 011	1 177	343	1 425	420	0
1204	59,67	3 621	1 543	2 078	449	2 214	958	13
1401	20,84	1 824	864	960	381	1 023	420	0

Tableau 10 : caractérisation de la population exposée aux ICU moyens et intenses

Le modèle cartographique a permis de mettre en évidence un IRIS particulièrement plus à risque de développer des ICU moyens et intenses, l'IRIS 1204 'Gratte Ciel est' (surligné en rouge dans le tableau 12), avec environ 60% de la zone occupé par des ICU moyens et intenses. Il convient alors de s'intéresser aux caractéristiques de la population de cet IRIS. Les études épidémiologiques sur les épisodes caniculaires en France ont montré que dans les facteurs de risque individuels de décès lors d'une vague de chaleur, le sexe

féminin et l'âge élevé était des facteurs prépondérants (cf. § 1.3.1). Dans l'IRIS 1204, la proportion de femme est d'environ 57% et le nombre de personnes âgées de plus de 60 ans est le plus élevé de toute la zone n°1. De plus, cet IRIS comprend une maison de retraite de 13 résidents. Ces éléments incitent à la priorisation de cet IRIS pour toutes préventions et interventions sanitaires relatives aux vagues de chaleur dans la zone test n°1. Le Plan National Canicule actuel comprend le repérage des personnes à risques isolées. En se basant sur le type de démarche développée ci-dessus, le Plan National Canicule pourrait également inclure le repérage des personnes à risques exposées.

5.2.2 Emplacement des établissements sanitaires et sociaux

Dans une perspective de santé publique, les établissements sanitaires et sociaux ont été représentés sur les cartes ICU. Il est ainsi possible de localiser les établissements situés dans des zones plus à risque en terme de chaleur. Les établissements sanitaires et sociaux (ESS) et leur localisation sont issus de la base de données FiNESS (Fichier National des Etablissements Sanitaires et Sociaux). La liste des établissements sanitaires et sociaux des quatre zones test est présentée en annexe 14. Ces établissements représentent des lieux regroupant des populations à risques lors de vagues de chaleur : personnes âgées, personnes handicapées, toxicomanes, personnes atteintes de maladies mentales, personnes atteintes d'affections respiratoires, cardiovasculaires et circulatoires. Le repérage des établissements les plus exposés à la chaleur doit permettre d'adapter la prévention et de prioriser les actions et les moyens en période de déclenchement du Plan National Canicule. Un tel repérage peut apporter des éléments d'information supplémentaires dans l'élaboration des plans « bleus » qui fixent les modalités organisationnelles en cas de crise des maisons de retraites et des établissements recevant des personnes handicapées (cf. annexe 1). Si l'on reprend l'exemple de la zone test n°1 (cf. § 5.2.1), la maison de retraite « Résidence Alternative », située dans l'IRIS 1204, doit faire l'objet d'une attention particulière, notamment au niveau de ces installations de climatisation.

5.3 Perfectionnement du modèle

5.3.1 Extension du modèle au territoire du Grand Lyon

Afin de répondre totalement aux objectifs de l'étude, le modèle mis en place sur les quatre zones test doit être étendu à l'ensemble du Grand Lyon. Il conviendra alors de modifier le maillage du modèle afin d'obtenir des résultats à l'échelle du quartier. Des mailles carrées de l'ordre d'une centaine de mètres de côté devraient permettre d'observer des variations spatiales de l'intensité des ICU sur le territoire du GL en fonction des quartiers. Avec une telle résolution, l'influence des paramètres concentrés dans les UC et dans les îlots de

bâtiments devraient être moyennée au sein de la même maille. La mise en place de ce modèle devra également s'attacher à inclure les indicateurs qui ont été exclus de la présente étude pour des impératifs de contexte, de moyens et de temps, à savoir : l'orientation des pentes du terrain, l'orientation des façades, les surfaces d'ombres portées et la chaleur émise par les activités industrielles. Une attention particulière devra être portée sur l'AR et une valeur limite devra être déterminée pour caractériser les canyons urbains encaissés qui favorisent l'ombrage.

5.3.2 Construction d'un modèle 'jour' et d'un modèle 'nuit'

La revue bibliographique a mis en évidence des variations du phénomène d'ICU sur un cycle de 24 heures. Ces différences sont particulièrement marquées entre le jour et la nuit. En supplément du modèle global (développé au § 3) il pourrait être judicieux, pour adapter la prévention et l'intervention sanitaire, de construire un modèle 'jour' et un modèle 'nuit'. Il suffit pour cela de modifier les coefficients de pondération des indicateurs en fonction de l'influence qu'ils ont sur les ICU diurnes et nocturnes (cf. § 2.5).

Les coefficients pourraient prendre les valeurs suivantes :

Indicateur	Pondération 'jour'	Pondération 'nuit'
AR	8	8
Albédo	3	8
Orientation des rues	6	0
Surface imperméable	8	0
Surface végétalisée	8	0
ltrans	1	1
Surface en eau	1	0

Tableau 11 : pondération possibles pour les modèles ICU 'jour' et 'nuit'

5.3.3 Réalisation d'un modèle de risque sanitaire

Dans une perspective sanitaire, les travaux menés pour caractériser l'exposition à l'aide de la géomatique et de la télédétection doivent être poursuivis. Il est important de garder à l'esprit que chacun des outils utilisés impliquent des biais et des incertitudes. La démarche qui semble la plus intéressante serait de croiser les approches relatives à la télédétection, à la métrologie in situ, à l'aménagement urbain et à l'épidémiologie afin de construire un modèle de risque sanitaire en milieu urbain en période de vague de chaleur, exploitable sous SIG. La construction d'un tel modèle pourrait reprendre le modèle cartographique lié à l'aménagement urbain et aux activités humaines de la présente étude. Les coefficients des indicateurs pourraient être calés pour différentes périodes du jour ou de la nuit. La télédétection permettrait alors de caler les indicateurs liés à la

température des surfaces (matériaux, imperméabilité, etc.). Les mesures de la température de l'air in situ permettraient le calage des paramètres influant sur la température de l'air. De plus, la télédétection permettrait d'obtenir des informations précises sur la végétation avec la mesure du NDVI. Des enquêtes pourraient être menées pour établir sur le territoire du Grand Lyon les facteurs de risque individuels de décéder lors d'une vague de chaleurs. La distribution spatiale de ces facteurs serait croisée sous SIG avec la cartographie des expositions afin d'obtenir une carte de risques sanitaires en milieu urbain en période de vague de chaleur lié à la température extérieure. L'étude épidémiologique des variations intra urbaines de décès en période de fortes chaleurs permettrait d'obtenir les variations intra urbaines de l'impact sanitaire des vagues de chaleur. Le croisement sous SIG de la cartographie des risques sanitaires avec la cartographie des impacts sanitaires permettrait de vérifier que le modèle de cartographie des risques est correct. Afin d'affiner cela, une réflexion similaire pourra être engagée sur l'exposition à la chaleur à l'intérieur de l'habitat.

5.4 Réduction du phénomène des îlots de chaleur : propositions d'aménagement

La réduction des îlots de chaleur par l'organisation des zones urbaines, des transports et par la modification de l'utilisation des terrains est une des stratégies envisagées par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat pour diminuer l'impact sanitaire d'un épisode caniculaire (ONERC, novembre 2007). Il s'agit également d'un moyen de réduire la consommation énergétique liée à la climatisation, de réduire la pollution photochimique de l'air (la formation de l'ozone est favorisée par la chaleur) et d'augmenter la qualité de vie des citoyens.

5.4.1 Solutions possibles

Afin de réduire l'intensité des ICU il faut agir sur les différents paramètres qui influencent ce phénomène. Ce paragraphe présente les éléments du tissu urbain sur lesquelles des aménagements sont possibles.

Les matériaux : une diminution de l'intensité des ICU est possible lorsque l'on a recours à des matériaux réfléchissants, caractérisés par des albédos élevés (Santamouris et al., 2004). L'albédo typique des villes européennes et américaines est de 0,15 à 0,30 alors que des chiffres beaucoup plus élevés ont été mesurés dans des villes nord africaines allant de 0,45 à 0,60 (Taha, 1997). Aux latitudes des villes européennes et nord américaines, une augmentation de l'albédo moyen de des villes de 0,20 à 0,45 permettrait de réduire la température jusqu'à 4°C les après-midi en d'été. Les revêtements de route,

de cours de récréation de place ou de parkings peuvent être modifiés afin de présenter des albédos plus élevés. Beaucoup de villes remplacent leurs espaces extérieurs périodiquement pour prolonger la vie d'une route ou d'une aire de stationnement. Si le granulat utilisé dans le matériaux de revêtement est légèrement coloré voire blanc (Chudnovsky et al., 2004), l'ajout d'une couche de surface mince de ce matériaux est un moyen d'augmenter l'albédo d'une surface pavée. La réfection d'une route ou d'un parking peut être l'occasion de remplacer l'ancien revêtement par un revêtement à granulats clairs. Pour les trottoirs ou les places, si une surface pavée est structurellement endommagée et doit être remplacée, ou si une nouvelle surface est construite, utiliser l'asphalte ou le béton permet aussi d'augmenter l'albédo et se traduit par des coût similaires. L'utilisation du béton doit donc être préférée.

Les arbres : il s'agit du paramètre le plus défavorable aux ICU (les zones boisées urbaines sont 2 à 8°C plus fraîches que le reste de la ville (Taha, 1997)). Les parcs de stationnement, les places, les milieux de rue, les trottoirs, les jardins privés, les parcs, les centres commerciaux sont autant de lieux potentiels pour la plantation d'arbres. Il est important d'encourager les chefs de projets urbains et les entrepreneurs à conserver les plantations existantes et à inclure l'aménagement de végétation dans tous les programmes de développement urbain. La conception de la rue peut également permettre plus d'espaces verts avec notamment la plantation d'arbres d'alignement, dont le modèle développé dans cette étude montre qu'ils permettent de réduire l'intensité des ICU concentrés au niveau des canyons urbains. Il serait également possible de créer des cheminements verts au milieu des grands boulevards ou avenues. Chaque kilomètre d'un tel boulevard pourrait porter environ 250 arbres (Santamouris et al., 2004). Pour les arbres d'alignement, l'utilisation d'arbres à large tronc est recommandée pour augmenter l'ombrage (Chudnovsky et al., 2004).

Les toits : la végétalisation des toits est également un moyen d'atténuer les ICU. Le principe de toiture végétalisée est encore peu développé en France, alors qu'il est largement utilisé en Allemagne, en Suisse, au Japon et en Amérique du Nord. Cette technique consiste en un système d'étanchéité installé sur la surface d'un toit terrasse ou en pente jusqu'à 60°, et recouvert d'un complexe drainant accueillant un tapis de plante pré cultivées. La plantation de végétation au niveau du toit rafraîchit l'air et les surfaces grâce au phénomène d'évapotranspiration et de rétention des eaux pluviales dans le substrat (Santamouris et al., 2004). Pendant la période d'été, les surfaces extérieures recouvertes d'un toit végétalisé sont sensiblement moins chaudes que les toitures traditionnelles. Les toits végétalisés contribuent aussi au rafraîchissement de l'air proche des toits et de manière générale à l'air de l'UCL. Il régule également le flux solaire entrant par le toit offrant ainsi une isolation thermique au bâtiment. Le recours à ce type de toiture module nettement la température de l'air dans les espaces intérieurs du bâtiment.

5.4.2 Modèles de réduction des ICU : exemple d'un scénario d'aménagement de la zone test n°1

Un scénario de réduction des ICU a été testé avec le modèle cartographique mis en place au § 3. Les hypothèses de ce scénario sont les suivantes :

- végétalisation de tous les toits terrasse de la zone, soit 46% de la totalité des toits ;
- remplacement des revêtements de voirie en enduit superficiel et en l'asphalte par de l'enrobé à granulats clairs ou du béton (albédo identique pour ces deux derniers matériaux, $A= 0,25$).

Afin de simuler ces hypothèses, des modifications au modèle initial ont été apportées :

- remplacement de la couche 'albédo des toits plans' par une couche surface de 'végétation au sol des toits plans' ;
- soustraction de l'emprise surfacique des toits plans à la couche 'surface imperméable' pour modéliser la perméabilité du substrat des toits végétalisés ;
- remplacement des surfaces 'enduit superficiel' et 'asphalte' par des surface 'béton'.

La carte obtenue est présentée en annexe 15. On constate sur la carte un net rafraîchissement des îlots de bâtiments, du à la végétalisation des toitures. Les rues, bien que présentant des scores ICU moindres restent le siège d'ICU moyens. Cela est du à la forte influence de la géométrie des canyon qui reste inchangée et aux hypothèses pessimistes quant à l'augmentation de l'albédo (passage d'un albédo de 0,05 à 0,25 soit par rapport à l'échelle de score d'un score de 10/10 à 9/10). Les distributions de scores du modèle de réduction et du modèle ICU classique sont présentées en figure 16.

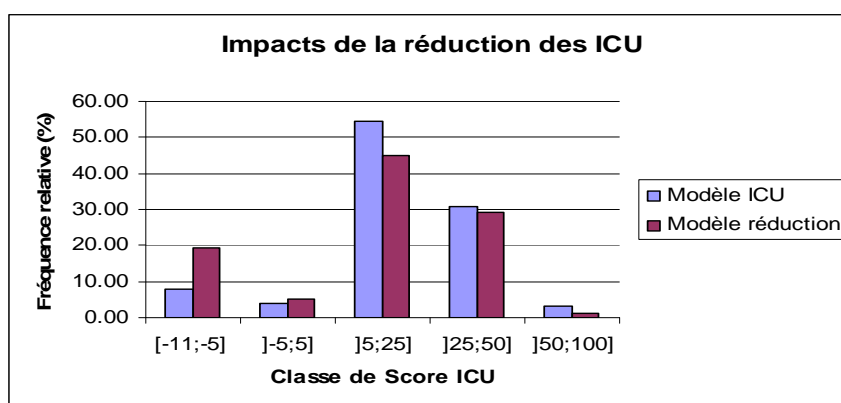


Figure 13 : distribution des score du modèle de réduction et du modèle classique

On constate une nette augmentation des îlots de fraîcheur liées à l'apport des toits végétalisés (les remarques sur l'optimisme des hypothèses sur la végétation au sol restent valable pour ce modèle) et une diminution importante des ICU faibles lié à la

diminution des surfaces imperméables au niveau des toits plan remplacés par un substrat végétalisé perméable. La diminution des ICU moyens et intenses, concentrés au niveau des canyons urbains, est plus liée aux matériaux de voirie. D'après le modèle, la végétalisation des toits terrasses et le remplacement des matériaux de voirie permettrait de réduire les ICU de 13% au niveau de la zone n°1.

Cet exemple montre que le modèle peut être utilisé afin de d'évaluer l'impact d'un projet aménagement sur le phénomène d'ICU. Dans le cadre d'une politique d'atténuation des îlots de chaleur urbains, il pourra constituer un outil d'aide à la décision très utile.

5.4.3 Propositions d'aménagement pour les zones test les plus chaudes

D'après le modèle, les zones 1 et 2 présentent une fréquence importante d'ICU moyens et intenses. C'est sur ces zones que des actions d'aménagement visant la réduction des ICU doivent être initiées.

Zone test n°1 : au niveau du quartier Gratte-Ciel à Villeurbanne trois actions de réduction des ICU sont envisageables :

- végétalisation des toits terrasses ;
- remplacement des revêtements de voirie par des matériaux à albédo plus élevés ;
- plantations d'arbres d'alignement sur le cours Emile Zola et la rue Anatole France.

Il s'agit en effet de deux axes relativement large qui coupe la zone en diagonale et qui présente des ICU intenses.

Zone test n°2 :

- La plupart des toits de la zone test n°2 sont des toits non plans en tuile. Bien qu'il soit techniquement possible de réaliser des toits végétalisés sur des pentes allant jusqu'à 60°, il semble difficilement concevable d'installer ce type de toiture sur les bâtiments du Vieux Lyon ou les immeubles de la Presqu'île dont les charpentes ne sont pas adaptées à la charge que constitue un toit végétalisé.

- Les quais qui sont les voies les plus larges de cette zone sont déjà dotés d'arbres d'alignement. Les autres rues sont trop étroites pour y planter des arbres d'alignement

- Le remplacement des matériaux de la voirie semble donc être ici la seule solution envisageable.

- Il serait également intéressant d'encourager la végétalisation et la plantation d'arbres, en particulier dans les cœurs d'îlots de bâtiments. Car même si ces zones ne présentent que des ICU faibles, elles pourraient constituer une fois végétalisées, des zones fraîches propices au repos lors d'une vague de chaleur.

Conclusion

Les travaux réalisés au cours de ce mémoire ont permis d'appréhender la problématique des îlots de chaleur urbains d'un point de vue sanitaire et d'appliquer les connaissances de la micro climatologie urbaine à la caractérisation de l'exposition aux fortes chaleurs en milieu urbain.

Dans le but de mettre en évidence les variations spatiales intra urbaines des îlots de chaleur au sein de la ville, un modèle cartographique a été élaboré sur quatre zones test. Les résultats indiquent l'importance de l'exposition au niveau des canyons urbains et le rôle protecteur des zones boisées. Une réflexion a été menée afin de mettre en exergue les limites, biais et incertitudes du modèle. En vue de son perfectionnement, des méthodologies de validation ont été proposées. Les applications du modèle en terme de caractérisation de la population exposée, de repérage des établissements sanitaires et sociaux exposés et d'atténuation des îlots de chaleur ont également été développées. La méthodologie élaborée offre ainsi des éléments d'information pour la priorisation de secteurs ou d'établissements et permet d'évaluer l'impact de *scénarii* d'aménagement du territoire sur le phénomène d'îlots de chaleur urbains. Des recommandations ont alors été proposées. Elles portent notamment sur le repérage des personnes à risque exposées dans les secteurs les plus chauds et la prise en compte de l'exposition des établissements dans l'élaboration des plans « bleus ». Concernant la réduction des îlots de chaleur, la végétalisation des toits et la plantation d'arbres d'alignement constituent les meilleures solutions d'aménagement.

Lorsque le modèle élaboré dans ce mémoire sera opérationnel sur le territoire du Grand Lyon, il constituera pour la DDASS du Rhône et le Grand Lyon un outil d'information et d'aide à la décision efficace.

En France, l'application des connaissances de la micro climatologie urbaine à des fins sanitaires n'en est encore qu'aux prémices. La volonté de poursuite des travaux de ce mémoire par le Grand Lyon, en partenariat avec la DDASS du Rhône, et les études initiées par l'InVS sur l'apport de la télédétection offrent des perspectives intéressantes. L'intérêt croissant des collectivités territoriales pour les îlots de chaleur devra s'inscrire dans une harmonisation des projets. Enfin, la maîtrise des aspects liés à l'exposition aux températures extérieures devra mener à des réflexions sur l'exposition à la chaleur dans l'habitat.

Bibliographie

Articles

ARNFIELD J.A., 2003, «Two decades of urban climate research: a review of turbulences, exchanges of energy and water ant the urban heat islands », *International journal of climatology*, n°23, pp. 1-26.

BESANCENOT J.P., septembre-octobre 2002, « Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines », *Environnement, Risques et Santé*, vol. 1, n°4, pp. 229-240.

CHUDNOVSKY A., E. BEN-DOR E., SAARONI H., novembre 2004, « Diurnal thermal behaviour of selected urban objects using remote sensing measurements », *Energy and Buildings*, vol. 36, n° 11, pp. 1063-1074.

ELLEFSEN R., 1991, « Mapping and measuring buildings in the urban canopy boundary layer in ten US cities », *Energy and Buildings*, n°15-16, pp. 1025-1049.

FAN H., SAILOR D. J., 2005, « Modelling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes », *Atmospheric environment*, n° 39, pp. 73-84.

GOLDREICH Y., 1985, « The structure of the ground-level heat island in a central business district. Journal of climate and applied meteorology », *American Meteorological Society*, vol. 24, n°11, pp. 1237-1244.

ICHINOSE T., SHIMODOZONO K., HANAKI K., octobre 1999, « Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo », *Atmospheric Environment*, vol. 33, n° 24-25, pp. 3897-3909.

KIM H.H., août 1992, « Urban heat island », *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, n°12 , pp. 2319 – 2336.

KLYSIK K., FORTUNIAK K., octobre 1999, « Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Łódz », *Atmospheric Environment*, vol. 33, n°24-25, pp. 3885-3895.

LACHANCE G., BAUDOIN Y., GUAY F., mai-juin 2006, « Etude des îlots de chaleurs montréalais dans une perspective de santé publique », *Bulletin d'information en santé environnementale* [en ligne], vol. 17, n°3, pp. 1-5 . [visité le 10.05.2008], disponible sur Internet : <http://www.inspq.qc.ca/pdf/bulletins/bise/BISE-17-3.pdf>

MASSON V., 2006, « Urban surface modelling and the mesoscale impact of cities », *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 84, n°1-3, pp. 35-45.

NAKAMURA Y., OKE T.R., 1988, « Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon », *Atmospheric Environment*, vol. 22, n°12, pp. 2691-2700.

NUNEZ M., OKE T.R., 1977, « The energy balance of an urban canyon », *Journal of Applied Meteorology*, vol. 16, pp. 11-19.

OKE T. R., août 1973, « City size and the urban heat island », *Atmospheric Environment*, vol. 7, n°8, pp. 769-779.

OKE T.R., MAXWELL G.B., février 1975, « Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver », *Atmospheric Environment*, vol. 9, n° 2, pp. 191-200.

OKE T.R., KALANDA B.D., STEYN D.G., 1981, « Parameterization of heat storage in urban areas », *Urban Ecology*, vol. 5, pp. 45-54.

OKE T.R., 1981, « Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations », *International Journal of Climatology*, vol. 1, n°3, pp. 237-254.

OKE T. R., mars 1988, « Street design and urban canopy layer climate », *Energy and Buildings*, vol. 11, n°1-3, pp. 103-113.

OKE T. R., ZEUNER G., JAUREGUI E., décembre 1992, « The surface energy balance in Mexico City », *Atmospheric Environment: Part B. Urban. Atmosphere*, vol. 26, n° 4, pp. 433-444.

OKE T.R., SPRONKEN-SMITH R.A., JAUREGUI E., GRIMMOND C.S.B., octobre 1999, « The energy balance of central Mexico City during the dry season », *Atmospheric Environment*, vol. 33, n°24-25, pp. 3919-3930.

SMARGIASSI A., FOURNIER F., GRIOT C., BAUDOUIN Y., KOSATSKY T., 2008, « Prediction of the indoor temperatures of an urban area with an in-time regression mapping approach », *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, vol. 18, pp. 282–288.

SAARONI H., BEN-DOR E., BITAN A., POTCHER O., avril 2000, « Spatial distribution and microscale characteristics of the urban heat island in Tel-Aviv, Israel », *Landscape and Urban Planning*, vol. 48, n° 1-2, pp. 1-18.

SAILOR D. J., LU L., juin 2004, « A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas », *Atmospheric environment*, vol. 38, n°17, pp. 2737-2748.

SPRONKEN-SMITH R. A., OKE T.R., 1998, « The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates », *International Journal of Remote Sensing*, 19, 2085-2104.

TAHA H., 1997, « Urban Climates and heat islands : albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat », *Energy and buildings*, vol. 25, n°2, pp. 99-103.

THIRION X., SIMONET J., SERRADIMIGNI F., DALMAS N., SIMONIN R., MORANGE S., SAMBUC R., SAN MARCO J.L., 1992 , « La vague de chaleur de juillet 1983 à Marseille. Enquête sur la surmortalité - essai de prévention », *Santé Publique*, vol. 4, n° 7, pp 58-64.

WENG Q., LU D., SCHUBRING J., février 2004, « Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies », *Remote Sensing of Environment*, vol. 89, n°4, pp. 467-483.

TERJUNG W. H., O'ROURKE P.A., août 1980, « Simulating the causal elements of urban heat islands », *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 19, n°1.

Périodiques

INVS, 6 juillet 2004, « Numéro thématique : plan national canicule », *BEH* [en ligne], n°30-31, pp 133-139. [visité le 03.05.2008], disponible sur Internet : http://www.invs.sante.fr/beh/2004/30_31/beh_30_31_2004.pdf

INVS, 16 mai 2006, « Numéro thématique : après la vague de chaleur d'août 2003, une meilleure connaissance au service d'une meilleure prévention », *BEH* [en ligne], n°19-20, pp 129-140. [visité le 03.05.2008], disponible sur Internet : http://www.invs.sante.fr/BEh/2006/19_20/beh_19_20_2006.pdf

INVS, 5 juin 2007, « Été 2006 : premier épisode caniculaire majeur après la catastrophe de 2003 », *BEH* [en ligne], n°22-23, pp 189-204. [visité le 03.05.2008], disponible sur Internet : http://www.invs.sante.fr/beh/2007/22_23/beh_22_23_2007.pdf

Ouvrages

LANDSBERG H.E., 1981, *The urban climate*, Academic Press, 275 p.

SANTAMOURIS M., ADNOT J., ALVAREZ S. et al., 2004, *Cooling the cities*, Paris : Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 263 p.

Thèse

REY G., 2007, *Surmortalité liée aux vagues de chaleur : facteurs de vulnérabilité sociodémographiques et causes médicales de décès*, Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université Paris XI, spécialité épidémiologie, 206 p.

Conférence

AGENCE LOCALE DE L'ENERGIE DE L'AGGLOMERATION LYONNAISE, *Les ateliers techniques de l'ALE : adaptation au changement climatique et végétalisation du bâti et des espaces publics*, 17 juin 2008, Lyon, Lyon : ALE, 2008.

Communications à une conférence

BRIDIER S., QUENOL H., KERMADI S., « Méthode d'analyse de la répartition des températures et de l'îlot de chaleur urbain à Lyon » in ASSOCIATION INTERNATIONALE DE CLIMATOLOGIE, XX^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Gènes, 2005, 4 p.

PITRE P., « Une approche SIG pour l'identification des zones et des populations à risque en période de canicule », in CENTRE LEA-ROBACK, 23 mai 2008.

QUENOL H., BRIDIER S., VERGNE O., DUBREUIL V., « Apport de la géomatique pour la caractérisation de l'îlot de chaleur urbain à Rennes » in INPE, *13è symposium annuel brésilien de télédétection*, 21-26 avril 2007, Florianópolis, Brésil : INPE, 2007, 3 p.

RICHARD Y., « La ville : climat, pollutions et politiques » in RHONALPENERGIE ENVIRONNEMENT, 12 juin 2007, Lyon.

SMARGIASSI A., « Variation intra urbaine des risques de mortalité associés à la chaleur à Montréal » in OURANOS, consortium Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatique, 14 mai 2008, Montréal, 32 p.

SZPIRGLAS J., VOOGT J.A., « A validation and performance assessment of the surface heat island model » in FACULTY OF GEOGRAPHICAL SCIENCES, *Fifth International Conference on Urban Climate*, 1-5 septembre 2003, Lodz, Lodz, Poland : University of Lodz, 2003.

YANG H., LIU Y., « A satellite sensing based assessment of urban heat island in Lanzhou city, northwest China » in INTERNATIONAL SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, *3rd International Symposium Remote Sensing and Data Fusion Over Urban Areas*, 2005, 6 p.

Document réglementaire

GRAND LYON, DELEGATION GENERALE AU DEVELOPEMENT URBAIN, PLANIFICATION URBAINE ET URBANISME APPLIQUE. Plans locaux d'urbanisme des communes du Grand Lyon. Approbation 2005.

Sites Internet

ACKERMAN S., 2007. *Urban Heat Island, University of Wisconsin, Space Science and Engineering Center* [visité en mai 2008].

Disponible sur Internet : http://icecap.us/images/uploads/URBAN_HEAT_ISLAND.pdf

AUDIENCE. *Auto formation à distance au contrôle d'environnement des constructions et des équipements*. [visité le 22.06.2008], disponible sur Internet :

http://audience.cerma.archi.fr/cerma/pageweb/theorie/solaire/rayont_solaire.html

COMITE FRANÇAIS DES CONSTRUCTEURS AUTOMOBILES. *caractéristiques techniques des voitures en 2006*. [visité le 09.07.2008], disponible sur Internet : <http://www.ccfa.fr/>

GRAND LYON. *Plan Climat Local*. [visité le 03.05.2008], disponible sur Internet: www.ale-lyon.org/aleinfos/download/20.pdf

HART M., SAILOR D.J. *Assessing causes in spatial variability in urban heat islands magnitude, Portland State University*. [visité le 15.05.2008], disponible sur Internet: <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/127284.pdf>

LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, UNIVERSITY OF CALIFORNIA. *Heat Island Group*. [visité le 05.05.2008], disponible sur Internet : <http://eetd.lbl.gov/HeatIsland/>

INSEE. *Données démographiques à l'échelle infra communale*. [visité le 12.08.2008], disponible sur Internet: http://www.insee.fr/fr/insee_regions/rhone-alpes/zoom/infra_com/commune_iris_accueil_infracommunal.htm

INTERNATIONAL MAX PLANCK RESEARCH SCHOOL FOR ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS. *Atmospheric Chemistry Department*. [visité le 22.05.2008], disponible sur Internet: <http://www.atmosphere.mpg.de/enid/2.html>

KALKSTEIN L.S., SHERIDAN S.C. *The impact of heat islands reduction strategies on health-debilitating oppressive air masses in urban areas, a report to the US EPA Heat Islands Reduction Initiative*. [visité le 10.05.2008], disponible sur Internet: http://www.udel.edu/SynClim/MM5_complete.pdf

MILLS G., 2005. *The Urban Canopy Layer Heat Island*. *IAUC Teaching Resources*. [visité le 10.05.2008], disponible sur Internet: http://www.epa.gov/hiri/resources/news_Jan05.html#story1

MINISTERE DE LA SANTE, DE LA JEUNESSE, DES SPORTS ET DE LA VIE ASSOCIATIVE. *Fichier National des Etablissements Sanitaires et Sociaux*. [visité le 11.08.2008], disponible sur Internet : <http://finess.sante.gouv.fr/index.jsp>

MINISTERE DE LA SANTE, DE LA JEUNESSE, DES SPORTS ET DE LA VIE ASSOCIATIVE. *Plan National Canicule 2008*. [visité le 20.06.2008], disponible sur Internet : <http://www.sante-jeunesse-sports.gouv.fr/IMG/pdf/PNC-2008.pdf>

PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY, NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH. *MM5 Community Model*. [visité le 05.08.2008], disponible sur Internet : <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>

RENAULT. Renault Trucks en France. [visité le 09.07.2008], disponible sur Internet : <http://www.renault-trucks.fr>

TAHA H., AKBARI H., SAILOR D., RITSCHARD R., 1992. *Causes and effects of heat islands: sensitivity to surface parameters and anthropogenic heating*, Lawrence Berkeley Lab. [visité le 06.06.2008], disponible sur Internet: <http://eetd.lbl.gov/HeatIsland/>

USEPA. *Heat Island Site*. [visité le 28.04.2008], disponible sur Internet : www.epa.gov/heatisd/index.html

VOOGT J., 2007. *How researchers measure urban heat islands*. [visité le 10.05.2008], disponible sur Internet: <http://www.epa.gov/heatisd/resources/news.html>

WEBER C., HIRSCH J., SERRADJ A. *Classification Pixel et classification par zones : test sur images spot en milieu urbain. Caractérisation et suivi d'espaces urbains*. [visité le 03.07.2008], disponible sur Internet : http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/colloques2/34618.pdf

Rapports

DOUSSET B., GOURMELON F., GIRAUDET E., LAIDI K., BRETIN P., VANDENTORREN S., ZEGHNOUN A., 2008, « Evolution climatique et canicule en milieu urbain : apport de la télédétection à l'anticipation et à la gestion de l'impact sanitaire », réponse à l'appel d'offre de la fondation MAIF : « Evolution climatique, risques engendrés et impact sur la société », Laboratoire Géomer UMR 6554 CNRS-LETG/InVS.

INVS, octobre 2003, « Impact sanitaire de la vague de chaleur d'août 2003 en France. Bilan et perspectives », rapport en ligne [visité le 26.05.2008], disponible sur Internet : http://www.invs.sante.fr/publications/2003/bilan_chaleur_1103/index.html

INVS, juillet 2004, « Étude des facteurs de risque de décès des personnes âgées résidant à domicile durant la vague de chaleur d'août 2003 », rapport en ligne [visité le 26.05.2008], disponible sur Internet :

http://www.invs.sante.fr/publications/2004/chaleur2003_170904/rapport_canicule.pdf

INVS, janvier 2005, « Etude des facteurs de risque de décès des personnes âgées résidant en établissement durant la vague de chaleur d'août 2003 », rapport en ligne [visité le 26.05.2008], disponible sur Internet :

http://www.invs.sante.fr/publications/2005/canicule_etablissement/rapport.doc

INVS, février 2006, « Étude des facteurs individuels et des comportements ayant pu influencer la santé des personnes âgées pendant la vague de chaleur de 2003 », rapport en ligne [visité le 26.05.2008], disponible sur Internet :

http://www.invs.sante.fr/publications/2006/personnes_agees_canicule_2003/rapport_canicule.pdf

INVS, juin 2006, « Système d'alerte canicule et santé 2006 (Sacs 2006). Rapport opérationnel », rapport en ligne [visité le 07.06.2008], disponible sur Internet :

http://www.invs.sante.fr/publications/2006/sacs_2006/sacs2006.pdf

INVS, octobre 2006, « Evaluation de l'impact sanitaire de la vague de chaleur de juillet 2006 », rapport en ligne [visité le 10.05.2008], disponible sur Internet :

http://www.invs.sante.fr/surveillance/canicule/evaluation_impact_vague_chaleur_2006.pdf

OKE T.R., 2004, « Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites », World Meteorological Organisation, Instruments and observing methods, report n°81.

ONERC, novembre 2007, « Bilan 2007 des changements climatiques, rapport de synthèse, contribution au quatrième rapport d'évaluation du groupe expert intergouvernemental sur l'évolution du climat », rapport en ligne [visité le 03.05.2008], disponible sur Internet :

http://www.ecologie.gouv.fr/rubrique.php3?id_rubrique=639

FOUILLET A., REY G., JOUGLA E., HEMON D., décembre 2006, « Estimation de la surmortalité observée et attendue au cours de la vague de chaleur du mois de juillet 2006 », INSERM.

Liste des figures

Figure 1 : profil d'un ICU (source: USEPA)	7
Figure 2 : schéma de l'UBL (source : Voogt, 2007).....	9
Figure 3 : intensité d'un ICU de l'UBL sur 24 h (source : Mills, 2005)	9
Figure 4 : canyon urbain (source : Nunez et Oke, 1977).....	10
Figure 5 : schéma de l'UCL et de la SL (source : Voogt, 2007)	10
Figure 6 : Schéma d'un canyon urbain (source : Mills, 2005).....	12
Figure 7 : course solaire d'été (source : AEU d'Albigny/Saône, Grand Lyon)	12
Figure 8 : exemple d'image raster (extrait de la classification des toits plans de la zone n°2)	32
Figure 9 : carte ICU, zone test n°1	33
Figure 10 : distribution des scores, zone test n°2.....	34
Figure 11 : histogramme de distribution des classes de score ICU pour les quatre zones test.....	35
Figure 12 : ICU des IRIS de la zone n°1.....	44
Figure 13 : distribution des score du modèle de réduction et du modèle classique	49
Figure 14 : périmètre de la zone test n°1 (en rouge)	X
Figure 15 : périmètre de la zone test n°3 (en rouge)	XII
Figure 16 : périmètre de la zone test n°3 (en rouge)	XV
Figure 17 : périmètre de la zone test n°4 (en rouge)	XVII

Liste des tableaux

Tableau 1 : paramètres influençant les ICU	24
Tableau 2 : paramètres sélectionnés et indicateurs possibles	26
Tableau 3 : indicateurs retenus	27
Tableau 4 : scores des indicateurs	29
Tableau 5 : hiérarchisation des paramètres	30
Tableau 6 : échelle de pondération	30
Tableau 7 : coefficients de pondération	31
Tableau 8 : fréquence relative d'apparition des pixels scorés pour les quatre zones test	34
Tableau 9 : calcul de l'excès relatif de mortalité du 7 au 15 août 2003 (source : CEPI Dc)	41
Tableau 10 : caractérisation de la population exposée aux ICU moyens et intenses	44
Tableau 11 : pondération possibles pour les modèles ICU 'jour' et 'nuit'	46
Tableau 12 : classe de matériaux et albédos correspondants	XXII
Tableau 13 : classes d'orientation des rues	XXIII
Tableau 14 : échelle de score de l'albédo	XXV
Tableau 15 : score des matériaux	XXVI
Tableau 16 : relation entre l'AR et l'intensité des ICU	XXVI
Tableau 17 : scores de l'AR	XXVII
Tableau 18 : scores de l'orientation des rues	XXVII
Tableau 19 : scores des surfaces imperméables	XXVII
Tableau 20 : scores de la végétation	XXVIII
Tableau 21 : scores d' I_{trans}	XXIX
Tableau 22 : influence des paramètres urbains sur le bilan énergétique de la ville (source : d'après Mills, 2005)	XXXI

Liste des annexes

- Annexe 1 Plan National Canicule
- Annexe 2 Modèles météorologiques appliqués à l'étude des ICU
- Annexe 3 Carte du Grand Lyon
- Annexe 4 Description des logiciels utilisés
- Annexe 5 Urban Climate Zone
- Annexe 6 Zones test
- Annexe 7 Construction de I_{trans}
- Annexe 8 Extraction des indicateurs
- Annexe 9 Attribution des scores
- Annexe 10 Bilan énergétique de la ville
- Annexe 11 Cartes ICU
- Annexe 12 Distribution des scores
- Annexe 13 IRIS, zone test n°1
- Annexe 14 ESS
- Annexe 15 Carte de réduction des ICU, zone test n°1

Annexe 1 : Plan National Canicule

1. Prévention des vagues de chaleur

Afin de prévenir les impacts sanitaires des vagues de chaleur, le Plan National Canicule 2008 s'est doté de plusieurs outils :

- **Recommandations en cas de fortes chaleurs** : les conséquences sanitaires d'une vague de chaleur nécessitent de rappeler les effets de la chaleur, les risques qu'ils engendrent et les mesures de prévention à adopter. Des recommandations ont été préparées pour la protection des personnes fragiles et de publics spécifiques (sportifs, travailleurs, personnes en situation précaire...). Ces recommandations sont diffusées auprès des publics concernés, de leur entourage, des professionnels sanitaires et sociaux et des bénévoles au contact de ces populations.
- **Préparation des acteurs et adaptation des plans** : aux différents échelons, communal, départemental, régional, zonal et national, sont réalisés régulièrement des exercices destinés à préparer les différents acteurs et à tester la mise en œuvre du plan canicule et à adapter ses dispositions en fonction du retour d'expérience.
- **Vérification de l'opérationnalité des ESS** : les EHPA et les établissements de santé disposent d'équipements et de procédures adaptés aux besoins des personnes à risque. Avant l'été, les préfets recensent les services de soins infirmiers à domicile, les associations et services d'aide à domicile, les associations de bénévoles et vérifient leurs dispositifs de permanence estivale.
- **Repérage des personnes à risques isolées** : le maire recueille les éléments relatifs à l'identité des personnes âgées et des personnes handicapées qui en font la demande, afin de faciliter l'intervention ciblée des services sanitaires et sociaux en cas de déclenchement du plan d'alerte et d'urgence instauré par la loi n°2004-626 du 30 juin 2004 relative à la solidarité pour l'autonomie des personnes âgées et des personnes handicapées.

2. Système d'alerte des vagues de chaleur

Dans le cadre du système d'alerte canicule et santé (SACS), l'InVS surveille les prévisions météorologiques recueillies auprès de Météo France. Les prévisions de températures sont analysées en fonction des probabilités d'atteinte ou de dépassement des indicateurs biométéorologiques, qui constituent le fondement du système d'alerte, et d'autres indicateurs considérés comme des facteurs aggravants (écarts aux seuils de températures, durée de la vague de chaleur, humidité relative de l'air, pollution atmosphérique, facteurs conjoncturels). Cette analyse lui permet de proposer une alerte si nécessaire. De plus, l'InVS collecte des données sanitaires auprès de l'Etat civil, SDIS, des SAMU et des services d'urgence. Il a également mis en place un recueil des décès directement liés à la chaleur (coups de chaleur et déshydratation) afin d'en avoir une estimation réactive sinon exhaustive. L'InVS a la charge d'avertir le ministère chargé de la santé. Dans les départements concernés, c'est alors le préfet qui déclenche le plan départemental de gestion d'une canicule et prend les mesures adaptées dans ce cadre.

Les indicateurs météorologiques correspondent à la moyenne, sur trois jours, des températures minimales (indicateur biométéorologique minimale ou **IBMn**) et maximales (indicateur biométéorologique maximal ou **IBMx**). Ils tiennent compte de la persistance de la chaleur et du rôle des températures nocturnes. La valeur des indicateurs a été établie à partir d'une analyse rétrospective, sur 30 ans, des données sanitaires et météorologiques dans 14 villes pilotes (BEH n°30-31, 2004). Le SACS présente cependant des incertitudes. Les températures enregistrées dans des stations météorologiques situées dans des parcs ou des aéroports, à l'écart des zones bâties ; ce qui peut nuire à sa fiabilité en milieu très urbanisé. De plus, le réseau de stations est trop lâche pour estimer les gradients d'amplitude du cycle diurne de température dans les agglomérations urbaines. Il serait donc nécessaire de pouvoir caractériser avec une plus grande précision l'exposition à la chaleur dans les villes.

Pour le département du Rhône, l'alerte d'une vague de chaleur est déclenchée lorsque la moyenne sur trois jours des prévisions de température dépasse 20°C la nuit et 34 °C le jour (SACS, 2006).

3. Actions de gestion d'une vague de chaleur

Lorsque le SACS prédit la survenue d'une vague de chaleur, le Plan National Canicule passe en niveau d'alerte Mise en Garde et Action (MIGA) et une réponse organisationnelle est déclenchée. Cette réponse comprend :

- **la mise en oeuvre de mesures de protection des personnes à risques hébergées en institutions (EHPA, établissements pour personnes handicapées, établissements de soins) :** l'accès régulier a des locaux rafraîchis, constitue une réponse efficace pour lutter contre les très fortes chaleurs et les risques d'hyperthermie qu'elles entraînent notamment pour les personnes âgées. L'installation d'au moins une pièce rafraîchie dans tous les établissements de soins, maisons de retraite, logements foyers, unités de soins de longue durée est une mesure prioritaire. De plus, pour les établissements d'hébergement de personnes âgées, le dispositif de veille et d'alerte repose sur la mise en place d'un plan «bleu» fixant le mode général d'organisation en cas de crise ou de déclenchement de l'alerte. Par assimilation, avec ces dispositifs opérationnels dans les établissements pour personnes âgées, il a été demandé que les établissements pour personnes handicapées mettent en place des plans «bleus».

- **la communication :** à l'échelon national comme à l'échelon local, un dispositif d'information est prévu, à destination du grand public, des professionnels de santé, des professionnels assurant la prise en charge de personnes fragiles ou dépendantes et des établissements de santé. Durant l'été, la population reçoit des conseils pour se protéger de la chaleur et est tenue informée du niveau d'alerte déclenché par le préfet. La carte de vigilance météorologique émise par Météo France chaque jour prend en compte le phénomène canicule. En cas d'alerte, les chaînes du service public de radiotélévision diffusent les messages de recommandations sanitaires du ministère chargé de la santé.

- **Les mesures pour les personnes sans abri :** en cas de canicule, la vulnérabilité des publics sans abri, isolés est aggravée par le manque de commodités et de logement. Les équipes mobiles de type « SAMU social » contribuent au repérage et au soutien des personnes à la rue, fragilisées par leur mode de vie et leur état de santé. Elles assurent leur orientation vers un lieu d'accueil adapté pour les personnes qui le souhaitent (accueil de jour, centre d'hébergement) et en cas d'urgence elles font appel au 15 Les centres d'hébergement et les accueils de jour mettent en place des protocoles de prévention et de surveillance pour prévenir les risques que la canicule fait courir au personnes fragilisées par leur désocialisation et leurs problèmes de santé.

Annexe 2 : modèles météorologiques appliqués à l'identification des ICU

CSU MM : le Colorado State University Mesoscale Model est un modèle mathématique mis au point à partir d'équations d'équilibre énergétique de la ville. Il s'agit d'une simulation des phénomènes atmosphériques permettant d'obtenir la distribution de température ou de chaleur (en W/m^2) au sein d'un système tridimensionnel. Il est utilisé dans de nombreuses études et investigations des îlots de chaleur, en particulier lorsque l'on souhaite traiter la question de la chaleur anthropique, de l'évapotranspiration ou de l'albédo, par une approche thermodynamique et atmosphérique (Taha, 1997 ; Ichinose et al., 1999 ; Mills, 2005).

Modèle URBAN 3 : ce modèle simule les émissions IR de la ville en régime permanent. Il permet d'obtenir une représentation des ICU nocturnes en conditions optimales (Terjung et O'Rourke, 1980). Ce modèle n'est valable que pour des vitesses de vent proche de 0 m/s.

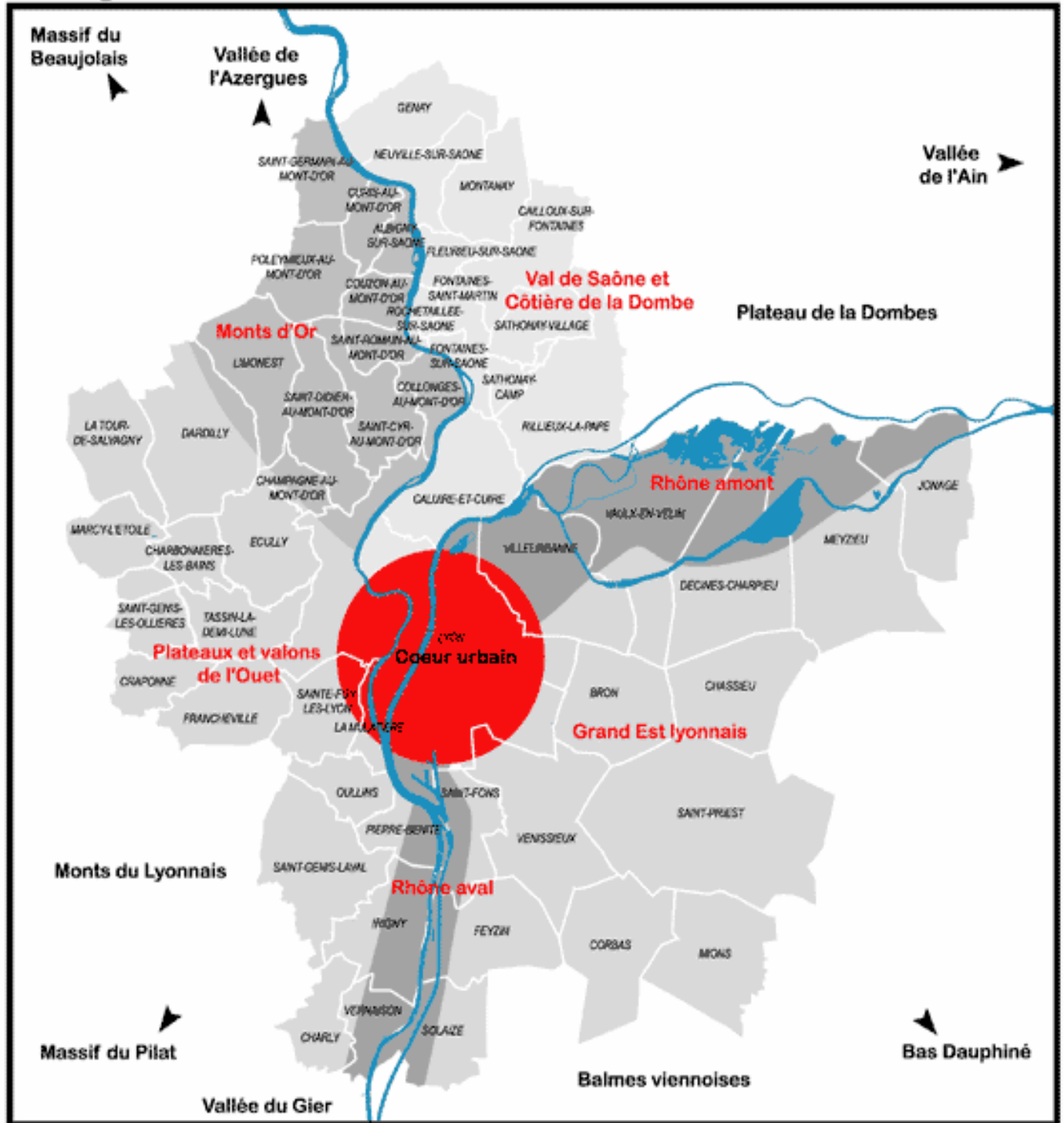
SHIM : le Surface Heat Island Model (SHIM), simule le refroidissement nocturne des murs, des toits et des routes à l'intérieur d'un canyon urbain, c'est-à-dire les émissions IR de la ville en régime permanent (Szpirglas et Voogt, 2003). Il permet d'obtenir une représentation des ICU nocturnes en conditions optimales. Ce modèle n'est valable que pour des vitesses de vent proche de 0 m/s.

Modèle TEB : le modèle Town Energy Balance, développé par le CNRM (Masson, 2006), permet d'obtenir des prévisions de température à l'échelle infra urbaine. Il modélise les échanges thermiques entre surfaces urbaines et atmosphère. TEB prend en compte un schéma simplifié du bâti en 2D, de typologie de routes, de murs et de toits pour chaque quartier, une composition de l'atmosphère simplifiée entre les bâtiments, et les détails de phénomènes physiques influant sur le micro climat urbain (évaporation, échanges radiatif de chaleur, évaporation, etc.). Il est prévu que TEB soit intégré au modèle météorologique AROME de Météo France, permettant de simuler la météo des villes à une résolution de 2 km. Les applications du modèle TEB, développées notamment à Toulouse lors du projet CAPITOU, devraient permettre une démarche de prévision et de mise en évidence des ICU. Un partenariat avec Météo France pourrait être envisagé pour utiliser ce modèle sur le territoire du GL.

L'utilisation des logiciels de prévisions atmosphériques MM5 et WRF pourrait être envisagé pour estimer la température sur le territoire du GL. Il s'agit de modèles régionaux utilisés en routine par COPARLY (AASQA du GL). Toutefois, la résolution, comprise entre 6 et 2 km, n'est pas suffisante pour obtenir des variations de température à l'échelle du quartier. Ce modèle permet de mettre en évidence la différence de température entre toute la ville et sa périphérie rurale (un essai du 14 juillet 2007 à Lyon indique une différence de 2°C). Les modélisations de températures produites par COPARLY grâce à ce modèle ne sont pas diffusables.

Annexe 3 : carte du Grand Lyon

Les grandes unités du **GRAND LYON**



(Source : www.grandlyon.fr)

Annexe 4 : description des logiciels utilisés

ArcGIS : cet outil regroupe un ensemble de logiciel SIG et des modules d'analyse puissants permettant la gestion d'un projet cartographique dans son ensemble, comme cela a été réalisé dans la présente étude. ArcGIS a permis de visualiser, gérer, extraire, traiter et analyser les données de l'étude ICU. La production des cartes d'ICU a également été réalisée sous ArcGIS.

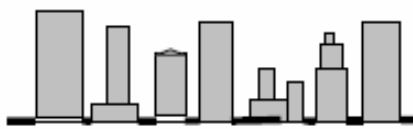
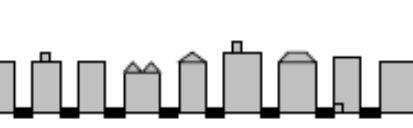





FME : FME est un logiciel de conversion et de transformation de données spatiales. Il intègre tous les formats cartographiques numériques (données vectorielles ou images). FME a été utilisé lorsque l'extraction et le traitement des données brutes ont nécessité une série d'opérations complexes, réclamant une puissance de calcul importante. La construction d'algorithmes de traitement sous FME a permis d'automatiser les opérations de sélection et de transformation des bases de données du GL.

ER Mapper : ER Mapper est un logiciel de télédétection, de photo-interprétation et de traitement de l'image. Cet outil a permis l'extraction d'une classification des matériaux de toitures en fonction de leur albédo, à partir d'une photo aérienne, et l'extraction d'une classification de l'orientation des pentes du terrain, à partir d'un modèle numérique de terrain. La maîtrise de ce logiciel a fait l'objet d'une formation.

Spatial Analyst : Spatial Analyst est une extension d'ArcGIS pour l'analyse et la modélisation spatiale. Il permet le traitement des données sous forme de raster (image). Ce logiciel a été utilisé pour convertir les données vectorielles en données rasters et réaliser le modèle cartographique des ICU.

Annexe 5 : Urban Climate Zone

L'observation des phénomènes microclimatiques urbains nécessite la caractérisation précise des zones d'étude. Oke a proposé une classification des zones de climat urbain (UCZ) (cf. tableau 14) permettant de délimiter des secteurs, à l'échelle du quartier, qui présentent une homogénéité dans leur capacité à influencer sur le climat urbain. En prenant en compte la densité du bâti, la hauteur des bâtiments, la largeur des rues et l'usage du sol, il est possible de déterminer les différentes classes d'UCZ d'un territoire urbain. La sélection des UCZ peut être réalisée à partir d'une photo aérienne (Google Earth par exemple) et d'un plan d'occupation des sols (diagnostic de l'existant d'un plan local d'urbanisme par exemple).

<i>Urban Climate Zone, UCZ¹</i>	<i>Image</i>	<i>Roughness class²</i>	<i>Aspect ratio³</i>	<i>% Built (impermeable)⁴</i>
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, up to >1 with trees	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, depends on trees	< 40
7. <i>Semi-rural development, scattered houses in natural or agricultural area, e.g. farms, estates</i>		4	> 0.05, depends on trees	< 10

Classification UCZ :

- **1** : urbanisation intense, bâti très dense, bâtiments hauts, bâtiments proches les uns des autres (exemple : centre d'affaire nord américain)
- **2** : urbanisation intense, bâti très dense, bâtiments de 2 à 5 étages, très proches voire mitoyens, en pierre ou en brique (exemple : centre ville ancien)
- **3** : urbanisation élevée, bâti dense, bâtiments alignés (maisons, magasins ou petits immeubles), bâtiments proches les uns des autres, (exemple : quartier résidentiel urbain)
- **4** : urbanisation élevée, bâti moyennement dense, bâtiments peu élevés sur de grandes surfaces, présence de parkings (ex : zone commerciale, usine)
- **5** : urbanisation modérée, bâti peu dense, maisons à un ou deux étage (exemple : banlieue pavillonnaire)
- **6** : bâtiments de grande taille intégrés dans un paysage dégagé, différents types d'occupation du sol (exemple : hôpital, campus, aéroport)
- **7** : Aménagement semi rural, maisons isolés en terrain naturel ou agricole (exemple : fermes)

Remarque : cette classification est basée sur l'étude des villes nord américaines. Bien que la méthode de sélection de zones urbaines peut être employée dans un contexte européen, l'utilisation des valeurs d'Aspect Ratio, de surface imperméable et de rugosité proposé dans le tableau 14 doit être discutée.

Annexe 6 : zones test

Zone test n°1 : quartier Gratte-Ciel, Villeurbanne

Périmètre de la zone d'étude

La zone test n°1 est délimitée :

- *au nord* : par la rue Francis de Pressensé
- *au sud* : par la rue du 4 août 1789
- *à l'est* : par la rue du 1^{er} mars 1943 et la rue Roger Lenoir
- *à l'ouest* : par le cours de la République



Figure 14 : périmètre de la zone test n°1 (en rouge)

Description

La zone test n°1 est située au centre de la commune de Villeurbanne, et comprend l'ensemble des Gratte-Ciel. Ce secteur constitue le cœur commercial de Villeurbanne.

Occupation des sols : diagnostic du PLU

Ce quartier est composé en majorité de secteurs d'habitat collectif organisés sous forme d'îlots (construction en continu et alignement). Le bâti y est dense, les bâtiments hauts (entre 10 et 20 m) et la végétalisation assez faible. Il y a également quelques secteurs classés en quartiers à dominante résidentielle constitués principalement sous forme d'immeubles collectifs édifiés en ordre discontinu. La densité de bâti y est moindre et permet la présence de surfaces végétalisées notamment au sud est de la zone avec la présence d'espace boisés classés et d'espace végétalisés à mettre en valeur. Le quartier des Gratte-Ciel est caractérisé par un tissu très minéralisé, comprenant des tours, des immeubles d'habitat collectif, des places et des bâtiments municipaux. De nombreux commerces sont également présents dans ce secteur. Quelques entrepôts sont également disséminés dans cette zone.

Classification UCZ

Cette zone d'étude présente des bâtiments relativement hauts intégrés dans un tissu urbain dense et fortement minéralisé. La comparaison avec les critères de Oke n'est pas

simple car l'ensemble des Gratte-Ciel n'a pas les mêmes caractéristiques qu'un centre d'affaire nord américain ou qu'un centre ancien tel qu'il est défini par Oke. Aucune des Urban Climate Zone ne correspond à la réalité de la zone test n°1. On peut toutefois admettre que le centre de Villeurbanne présente des similitudes avec les UCZ 1 et 2.

Intérêt dans l'étude des îlots de chaleur

L'étude du quartier des Gratte-Ciel permet de tester la méthode d'investigation des îlots de chaleur en travaillant sur un secteur très minéralisé. L'aménagement de ce secteur doit permettre d'étudier l'impact de la géométrie des rues, de la rugosité du tissu urbain, des surfaces imperméables, des matériaux de construction et de la rareté des éléments naturels sur la formation des îlots de chaleur. De plus, la présence du cours Emile Zola (D6a), est l'occasion d'apprécier l'impact d'un trafic important sur les îlots de chaleur.

Zone test n°2 : l'ensemble Fourvière/Vieux Lyon/Presqu'île

Périmètre de la zone d'étude

La zone test n°3 est délimitée :

- *au nord* : par l'axe passant par la rue Sainte Catherine
- *au sud ouest* : par l'axe passant par la montée du Télégraphe
- *au sud* : par la place Bellecour
- *à l'est* : par l'axe passant par le quai Jean Moulin (N6)
- *à l'ouest* : par le parc des Hauteurs



Figure 15 : périmètre de la zone test n°3 (en rouge)

Description

- *La colline de Fourvière (5^e arrondissement) :*

Entre la Saône et le plateau du 5^e arrondissement, la colline de Fourvière compose un paysage harmonieux qui domine l'ensemble de Lyon. Son occupation est constituée de grandes masses boisées protégées ou aménagées (parc des Hauteurs et parc du Rosaire), mais aussi de grands domaines religieux et de sites archéologiques. Développé au dessus du Vieux Lyon et autour de Fourvière, le parc des Hauteurs est le troisième grand parc de l'agglomération lyonnaise après les parcs de la tête d'Or et de Gerland. Son originalité repose sur son caractère diffus : il se présente comme un réseau d'espaces variés qui jalonnent le plateau, en partie reliés entre eux, et centrés sur les sites archéologiques. Ce secteur présente un relief très accentué. La colline de Fourvière plonge à l'est vers le val de Saône.

- *Le vieux Lyon (5^e arrondissement) :*

En bordure de Saône s'étend le Vieux Lyon, comprenant les quartiers Saint Georges, Saint Jean et Saint Paul. Ce secteur est occupé par des immeubles d'habitats anciens (de 2 à 5 étages en moyenne), des commerces et des restaurants. Il présente une densité de bâti très élevée. Historiquement constitué à partir des quais de Saône, ce secteur a perdu progressivement son ouverture sur la rivière au gré des réalisations d'infrastructures de transports occupant les espaces des berges : voie des quais, têtes de ponts, ouvrages de stationnement en sous-sol et surface.

- *La Presqu'île (1er et 2è arrondissement) :*

La partie est de la zone d'étude n°3 s'étend sur la Presqu'île, de la place Bellecour à la place des Terreaux. L'ensemble Bellecour-Terreaux se caractérise par une densité de bâtie importante. Il a connu de profondes mutations au XIXe siècle, avec notamment les percées rectilignes des rues de la République et Herriot. Il en résulte un tissu dense, constitué autour d'anciennes voies (par exemple la rue Mercière), avec des bâtis hauts et imbriqués, ou organisé autour de grands axes haussmannien bordés d'immeubles bourgeois du XIXe siècle. Ce secteur est marqué par une très forte présence de commerces ; il concentre, une activité propre à l'hypercentre de l'agglomération : grands magasins, hôtels, banques, restaurants, mais également activités tertiaires. Cette zone est marquée par la présence de deux grandes places très minéralisées : la place Bellecour et la place des Terreaux. Ce secteur comprend à son extrémité est, la N6 sur les quais du Rhône qui constitue un axe routier important.

Occupation des sols : diagnostic du PLU

- *La colline de Fourvière :*

Ce secteur est principalement occupé par de bâtiments religieux et des sites archéologiques. Ce secteur comprend le parc des Hauteurs offrant sur une superficie importante d'espaces boisés classés et d'espaces végétalisés.

- *Le Vieux Lyon :*

Les quartiers St Georges, St Jean et St Paul ne rentre pas dans le PLU du Grand Lyon. Ils sont gérés par un plan de sauvegarde de l'Etat au titre de leur valeur patrimoniale. Ces quartiers peuvent toutefois être caractérisés par un bâti dense, des rues étroites et des bâtiments anciens pouvant atteindre les 10 m de hauteurs. Le cœur des îlots de bâti présentes dans ces quartiers une quasi absence de végétation.

- *La Presqu'île :*

L'ensemble Bellecour-Terreaux est occupé par de hauts îlots de bâtiments (15 à 20m) alignés au sein d'un tissu urbain continu et très dense. Il s'agit d'une zone dense et multifonctionnelle comprenant habitat, commerces et services majeurs, production artisanat et équipements collectifs.

Classification UCZ

De par la faible densité de bâti et la présence de surfaces végétalisées, le secteur de Fourvière se rapproche de la classe d'UCZ n°5. De par la densité du bâti, la hauteur des bâtiments et la nature des matériaux, la classe d'UCZ correspondant aux secteurs Vieux Lyon et Presqu'île est la classe 2. Cette classe d'UCZ intègre les caractéristiques des centres ville anciens.

Intérêt dans l'étude des îlots de chaleur

La colline de Fourvière constitue une zone de test de l'impact des surfaces boisées sur les îlots de chaleur. L'étude des îlots de chaleur du secteur Vieux Lyon/Presqu'île doit permettre de caractériser le phénomène des îlots de chaleur au sein d'un tissu urbain dense et ancien. Les résultats de l'étude au niveau de cette zone permettront de comparer les morphologies du Vieux Lyon et de la Presqu'île. La configuration de cette zone, avec le passage de la Saône, constitue l'opportunité d'intégrer le paramètre 'eau' dans l'étude des ICU.

Zone test n°3 : le plateau des Minguettes et sa couronne ouest, Vénissieux

Périmètre de la zone d'étude

La zone test n°2 est délimitée :

- *au nord* : par l'avenue Maurice Thorez
- *au sud est* : par l'avenue du 8 mai 1945
- *au nord est* : par l'avenue Jean Cagne
- *à l'ouest* : par le boulevard Yves Farge (D307)



Figure 16 : périmètre de la zone test n°3 (en rouge)

Description

Construit à la fin des années 1960 sous forme de ZUP (Zone Urbaine Prioritaire), le grand ensemble des Minguettes (7400 logements et 55 % du parc locatif social de la commune de Vénissieux) s'est développé sur un plateau dominant le centre-ville de Vénissieux. La zone test n°2 comprend la partie située au sud ouest de l'axe central de l'avenue Jean Cagne avec au nord le quartier Montchaud et au sud le quartier Darnaise. Ces deux quartiers sont pourvus d'espaces verts importants. Les Minguettes sont encadrées à l'ouest par un tissu résidentiel à dominante pavillonnaire. Cette couronne, aujourd'hui entièrement urbanisée, marque la transition avec le quartier des Clochettes sur Saint-Fons, à l'ouest de Vénissieux. Au nord de ce secteur, on retrouve une zone à la densité de bâti élevée. Les maisons sont alignées et mitoyennes et la superficie des terrains est faible. La partie sud de la couronne présente des maisons organisées dans un tissu plus diffus, à la densité de bâti plus faible. Les maisons de ce secteur sont pourvues d'une bonne superficie de terrain, pour la plupart végétalisés.

Occupation des sols : diagnostic du PLU

Le plateau des Minguettes représente des ensembles d'immeubles collectifs conçus dans leur implantation et leur hauteur en rupture avec la trame urbaine les environnant. Les bâtiments constituant ces secteurs sont bien espacés les uns des autres et sont entourés de surfaces enherbées voire d'un parc (Montchaud/La Darnaise). La couronne ouest est une zone banalisée, secteur d'habitat mixte assurant une transition entre les quartiers centraux et les quartiers périphériques de moindre densité.

Classification UCZ

La classe d'UCZ correspondant le mieux à la morphologie du plateau des Minguettes est la classe 6. On y retrouve les paramètres liés à la grande taille des bâtiments et à leur espacement. Le sud de la couronne ouest est typique d'une UCZ de classe 5, correspondant à des zones d'habitat pavillonnaire de banlieue. Le nord de ce secteur, de par son bâti plus dense, est plus proche d'une UCZ de classe 3.

Intérêt dans l'étude des îlots de chaleur

Cette zone permet de mettre en regard le phénomène d'îlots de chaleur au sein de deux morphologies urbaines différentes : les grands ensembles et les quartiers pavillonnaires.

Zone test n°4 : Meyzieu sud ouest

Périmètre de la zone d'étude

La zone test n°4 est délimitée :

- *au nord* : par la voie ferrée qui traverse la commune sur un axe est-ouest
- *au sud est* : par la rue de la République
- *au sud ouest* : par l'axe passant par la rue Paul Cézanne
- *à l'est* : par la rue du 8 mai 1945
- *à l'ouest* : par le rocade est



Figure 17 : périmètre de la zone test n°4 (en rouge)

Description

La zone test n°4 est caractérisée par un important tissu résidentiel ancien et récent, à dominante pavillonnaire organisé sous forme de lotissements (issus d'opérations groupées ou implantés en diffus). Ces zones comprennent quelques espaces végétalisés et boisés. Le complexe de Peyssillieu, au sud ouest de la zone, est un pôle dévolu à l'activité commerciale. Il s'agit du plus important des trois implantés sur la commune. Il concentre une grande surface commerciale et différentes structures annexes.

Occupation des sols : diagnostic du PLU

Ce secteur de Meyzieu est principalement constitué de zones d'habitat mixte, l'habitat est majoritairement pavillonnaire. La densité de bâti reste modérée. Le secteur comprend aussi à son extrémité ouest, le pôle commercial de Peyssillieu.

Classification UCZ

La taille des bâtiments, les parkings et la densité du bâti du pôle commercial de Peyssillieu nous amènent à considérer que ce secteur est une UCZ de classe 4. Le reste de la zone d'étude constitue un tissu résidentielle de type UCZ de classe 5.

Intérêt dans l'étude des îlots de chaleur

Cette zone test constitue l'opportunité d'appliquer la méthode d'investigation des îlots de chaleur à un secteur résidentiel pavillonnaire. Elle doit également permettre l'observation en terme d'impact sur les ICU de l'influence de la présence d'un pôle commercial fortement minéralisé.

Annexe 7 : construction de I_{trans}

L'évaluation de la chaleur dégagée par les transports sous la forme d'un flux de chaleur n'ayant pas été possible (nécessité de mesures ou de modélisations thermodynamiques), un indicateur a été bâti à partir des données disponibles selon des préconisations de la littérature (Sailor et Lu, 2004) (cf. § 2.5.4 B))

1. Données disponibles

A. Modélisation du trafic (Grand Lyon)

Le Grand Lyon dispose d'une modélisation du trafic sur tout son territoire. Elle permet d'obtenir sur chaque tronçon de voie circulaire :

- le nombre de véhicules comptabilisés entre 6 et 18 h = N_{jour} ;
- le nombre de véhicules comptabilisés entre 18h et 22 h = N_{soir} ;
- le nombre de véhicules comptabilisés entre 22 h et 6 h = $N_{\text{nuît}}$;
- le pourcentage de poids lourds (véhicules dont le poids est supérieur à 3,5 t) pour chacune des trois périodes ($\%_{\text{PL}}$) ;
- la longueur du tronçon ;
- la vitesse réglementaire.

B. Données constructeurs

a. Véhicules légers

On désigne comme véhicule léger, tout véhicule dont le poids est inférieur à 3,5 t. Afin de simplifier l'étude, on a assimilé la totalité des véhicules légers aux automobiles. Les caractéristiques techniques moyennes des moteurs de voiture en France ont été acquises auprès du Comité des Constructeurs Français d'Automobiles (ccfa.fr) :

- Puissance mécanique moyenne des voitures en France: $P_{VL}=77\text{kW}$;
- Rendement moyen d'un moteur de voiture (essence et diesel confondu) en conditions optimales (périphérique, autoroute, trafic urbain fluide) : $\eta_{VL \text{ opt}} = 0,35$;
- Rendement moyen d'un moteur de voiture (essence et diesel confondu) en condition de trafic congestionné : $\eta_{VL \text{ cong}} = 0,15$.

b. Poids lourds

On désigne comme véhicule lourd, tout véhicule dont le poids est supérieur à 3,5 t. Les caractéristiques techniques moyennes des moteurs de poids lourds ont été acquises auprès de Renault Trucks (renault-trucks.fr) :

- Puissance mécanique moyenne des poids lourds en France : **$P_{PL} = 300 \text{ kW}$** ;
- Rendement moyen d'un moteur de poids lourd en conditions optimales :
 $\eta_{PL \text{ opt}} = 0,40$;
- Rendement moyen d'un moteur de poids lourd en condition de trafic congestionné : **$\eta_{PL \text{ cong}} = 0,20$** .

2. Calcul de la chaleur dégagée par un véhicule

A partir des données véhicules il a été possible de calculer la chaleur théorique dégagée par un véhicule. On a considéré que la chaleur dégagée par un véhicule ne provenait que du moteur, négligeant ainsi la chaleur issue des frottements :

$$\mathbf{P_{consommée (kW)} = P_{mécanique (kW)} + P_{chaleur (kW)}$$

Le rendement d'un moteur s'écrit : **$\eta = P_{mécanique} / P_{consommée}$**

D'où : $P_{consommée} = P_{mécanique} / \eta$

La formule de la chaleur dégagée par un véhicule s'écrit donc :

$$\mathbf{P_{chaleur} = P_{mécanique} (1/\eta - 1)}$$

En appliquant les données constructeurs présentées précédemment on a obtenu les valeurs suivante :

- Chaleur dégagée par un véhicule léger en conditions optimales :
 $P_{chaleur_{VLopt}} = 143 \text{ kW}$
- Chaleur dégagée par un véhicule léger en condition de trafic congestionné :
 $P_{chaleur_{VLcong}} = 436 \text{ kW}$
- Chaleur dégagée par un poids lourd en conditions optimales :
 $P_{chaleur_{PLopt}} = 450 \text{ kW}$
- Chaleur dégagée par un poids lourd en condition de trafic congestionné:
 $P_{chaleur_{PLcong}} = 1200 \text{ kW}$

A partir de ces valeurs, les rapports suivants ont été établis :

- un poids lourds dégage environ trois fois plus de chaleur qu'un véhicule léger ;

- la conduite en condition de trafic congestionné dégage environ trois fois plus de chaleur qu'en condition optimale, quelque soit le véhicule considéré.

3. Calcul de I_{trans}

L'objectif est d'établir un indicateur permettant de caractériser la propension d'un tronçon à produire de la chaleur en fonction du trafic routier qu'il reçoit. On suppose que la chaleur dégagée par les véhicules traversant un tronçon présente une relation linéaire avec la chaleur que présente le tronçon. L'indicateur utilisé peut alors être bâti en réalisant une combinaison linéaire du nombre de véhicule comptabilisés sur un tronçon en distinguant les véhicules légers et les poids lourds ainsi que les conditions de circulation.

Différenciation des véhicules:

Nombre de véhicules légers : $N_{VL} = N(1 - \%_{oPL})$

Nombre de poids lourds: $N_{PL} = N\%_{oPL}$

N_{PL} a été doté d'un coefficient multiplicateur égal à 3 afin de représenter la plus grande quantité de chaleur émise par les poids lourds.

Différenciation des conditions de circulation :

Les calculs réalisés précédemment indiquent une importante différence de chaleur selon les conditions de circulation. Il est donc nécessaire de prendre ce paramètre en compte. Afin de différencier les conditions de circulation optimale ou congestionnées, on s'est appuyé sur les horaires de pointes. Une classification des axes en fonction de leur encombrement aurait pu être utilisées mais nous ne disposions pas de ce paramètre. On a donc considéré qu'en période de pointe, toutes les voies étaient congestionnées, ce qui constitue un biais. Les périodes de pointes sont comprises entre 7h et 9h et entre 17h et 18h, soit trois heures de la période jour (6h-18h). On a donc, dans la période jour, trois heures de pointe caractérisée par un trafic congestionné et 9 heures de trafic fluide. Les véhicules comptabilisés lors des périodes de pointe on été doté d'un coefficient multiplicateur égal à 3.

Afin d'obtenir le profil horaire du trafic (préconisé par Sailor et Lu, 2004), on a ramené le nombre de véhicule par période à un nombre de véhicule par heure en divisant le nombre de véhicule par période par le pas de temps de chaque période :

- période jour fluide : 9 heures ;
- période jour pointe : 3 heures ;
- période soir : 4 heures ;
- période nuit : 8 heures.

Pour chaque période on a réalisé les combinaisons linéaires suivantes :

$$I_{\text{jour}} = (1/9) (N_{\text{VL}} + 3N_{\text{PL}})_{\text{jour}}$$

$$I_{\text{pointe}} = 3(1/3) (N_{\text{VL}} + 3N_{\text{PL}})_{\text{jour}}$$

$$I_{\text{soir}} = (1/4) (N_{\text{VL}} + 3N_{\text{PL}})_{\text{soir}}$$

$$I_{\text{nuit}} = (1/8) (N_{\text{VL}} + 3N_{\text{PL}})_{\text{nuit}}$$

La somme des ces quatre indicateurs donne I_{trans} pour un tronçon :

$$I_{\text{trans}} = I_{\text{jour}} + I_{\text{pointe}} + I_{\text{soir}} + I_{\text{nuit}}$$

La valeur de I_{trans} correspond à un nombre d'équivalent véhicule calorifique horaire par heure et par tronçon.

Annexe 8 : extraction des indicateurs

1. Albédo

La valeur de l'albédo des matériaux est bien documentée dans la littérature (Taha 1997 ; Audience). L'extraction de cet indicateur a consisté à classifier les matériaux de revêtement du sol et des toitures. Les matériaux des façades ne sont pas identifiés dans la littérature comme jouant un rôle dans le stockage de la chaleur. Ils ont donc été négligés. La surface des matériaux du sol a été extraite des bases de données du GL (voirie pour la chaussée et les trottoirs, classification de la végétation pour la terre nue) où les matériaux constitutifs des surfaces sont renseignés. On a ainsi obtenu des polygones représentant les matériaux du sol avec un champ attributaire 'Albédo'. La surface des matériaux de toiture a été extraite par photo interprétation à l'aide de ER Mapper, à partir de l'ortho photo des zones étudiées. On a ainsi obtenu des images où chaque pixel contient la valeur de l'albédo du matériau qu'il représente.

Matériau	Couleur	Utilisation	Albédo retenu
Sol nu, terre	Brun	Surfaces naturelles	0,2
Enrobé bitumeux	Gris-noir	Chaussée	0,07
Asphalte	Noir	Trottoir	0,05
Béton	Gris	Trottoir	0,25
Béton bitumeux	Gris-noir	Trottoir	0,15
Dalles Pavées	Gris clair-Beige	Trottoir	0,45
Enduits Superficiels	Noir	Trottoir	0,05
Sable	Brun clair	Trottoir	0,15
Métal	Argenté/Bleu/Vert	Toitures industrielles	0,5
Tuile sombre	Gris-noir	Toitures d'habitation	0,15
Tuile claire	Rouge/Brun-Rouge	Toitures d'habitation	0,35
Béton	Gris	Toits terrasse	0,25
Béton revêtu	Gris-noir	Toits terrasse	0,1

Tableau 12 : classe de matériaux et albédos correspondants

2. Aspect ratio

L'AR a été calculé à partir des bases de données du Grand Lyon sous FME. La méthode suivie est celle proposée par Oke en 1981. Elle a consisté à moyenner la hauteur des bâtiments bordant un tronçon de voie (H) et à calculer la largeur des rues à partir des bases de données de la voirie (W). Une fois ces valeurs calculées, le rapport hauteur

moyenne des bâtiments sur largeur des rues a été calculé : $AR = H/W$. On a ainsi obtenu des polygones représentant l'emprise au sol de la chaussée, des trottoirs et des sols nus avec un champ attributaire 'AR'.

3. Orientation des rues

Chaque rue a été classée selon trois classes en fonction de son orientation : nord-sud, est-ouest et autre (nord ouest - sud est et nord est - sud ouest). Cette classification a été réalisée à l'aide de FME, à partir des bases de données cartographiques de la voirie. Pour chaque tronçon de voie, l'angle formé par le tronçon avec l'axe nord (α), dans le sens horaire, a été calculé. On a ainsi obtenu des polygones représentant l'emprise au sol de la chaussée avec un champ attributaire 'Classe d'orientation'.

Orientation	Classe	α
N-S	1	]-22,5 ; 22,5[+]157,5 ; 202,5[
Autre	2	[22,5 ; 67,5] + [112,5 ; 157,5] + [202,5 ; 245,5] + [292,5 ; 337,5]
E-O	3	]67,5 ; 112,5[+]247,5 ; 292,5[

Tableau 13 : classes d'orientation des rues

4. Surface imperméable

Cet indicateur a été extrait sous ArcGIS à partir de la classification des espaces végétalisés du GL. On a considéré que tout ce qui appartenait au 'domaine artificialisé' dans cette classification (bâti, voirie, etc.) était imperméable, ainsi que dans une moindre mesure, les surfaces plantées imperméables. On a ainsi obtenu des polygones représentant les surfaces imperméables avec un champ attributaire 'classe de surface imperméable' (surface artificialisée ou surface plantée imperméable).

5. Surface en eau

Cet indicateur existait déjà dans la base de donnée du GL. On dispose de polygone représentant les cours d'eau. Dans le cas de notre étude, pour la zone test n°2, il s'agit de la Saône.

6. Surface végétalisée

Les surfaces végétalisées ont été extraites sous ArcGIS à partir de la base de données 'classification de la végétation du GL'. Chaque surface végétalisée a été classée selon trois classes en fonction du type de végétation : végétation au sol (classe 1), végétation

arbustive (classe 2) et zone boisée (classe 3). Chaque polygone dispose d'un champ attributaire 'Classe de végétation'.

7. Profil du trafic

Une formule a été construite à partir des données de modélisation du trafic (cf. annexe 6). Cette formule permet de calculer le nombre d'équivalent véhicule calorifique horaire exprimé en d'équivalent véhicule/tronçon/heure et noté Itrans. Itrans est calculé sous ArcGIS à partir de données issues d'une modélisation du trafic et des bases de données cartographiques de la voirie. Pour chaque tronçon de voie circulaire, Itrans permet de quantifier la propension d'un tronçon à émettre de la chaleur en fonction du trafic qu'il présente. On a ainsi obtenu des polygones représentant la surface des chaussées avec un champ attributaire 'Itrans'.

8. Profil du trafic attribué aux bâtiments

On a considéré que sur les zones étudiées, les bâtiments émettant significativement de la chaleur en été sont les commerces et les bureaux en raison de leurs importants systèmes de climatisation. Ces bâtiments ont été extraits sous ArcGIS à partir des bases de données cartographiques des PLU du GL. Les transports représentent 50% de la chaleur anthropique totale en été (cf. § 2.5.4.2) contre 48% pour les bâtiments (cf. § 2.5.4.1). En négligeant le métabolisme humain on suppose que les bâtiments représentent 50% de la chaleur anthropique totale en été. Afin de quantifier la chaleur émise par les commerces et les bureaux, les Itrans des tronçons ont été moyennés sur chaque zone et attribués aux bâtiments. On a ainsi obtenu des polygones représentant les commerces et les bureaux avec un champ attributaire 'Itrans moyen'.

9. Chaleur anthropique totale (Qf)

La représentation de la chaleur anthropique totale a été obtenue en superposant les polygones représentant les routes et ceux représentant les bâtiments. On a obtenu des polygones représentant les sources de chaleur anthropique dotés d'un champ attributaire 'Itrans total' qui quantifie la chaleur émise par ces sources.

Annexe 9 : attribution des scores

Peu d'éléments bibliographiques ont pu être dégagés afin d'établir des relations entre la valeur des indicateurs et l'intensité des ICU. Les échelles de score des indicateurs ont donc été établies en supposant l'existence d'une relation linéaire entre la valeur des indicateurs et l'intensité des ICU, sauf lorsque la littérature proposait des relations plus précises. Pour les relations linéaires, les valeurs extrêmes des indicateurs ont été dotées de score 0 et 10, puis des classes ont été définies pour réaliser les échelles de score.

1. Albédo

L'échelle de score de l'albédo a été établie en supposant une relation linéaire entre la valeur de l'albédo et l'intensité de l'ICU. Dix classes ont été définies avec un minimum de 0,05 (albédo de l'asphalte) et un maximum de 1 (valeur maximale de l'albédo).

Classe A	SCORE
1	0
[0,95-1[	1
[0,85-0,95[	2
[0,75-0,85[	3
[0,65-0,75[	4
[0,55-0,65[	5
[0,45-0,55[	6
[0,35-0,45[	7
[0,25-0,35[	8
[0,15-0,25[	9
[0,05-0,15[	10

Tableau 14 : échelle de score de l'albédo

Connaissant l'albédo d'un matériau on peut ainsi lui attribuer un score.

Matériau	Albédo	SCORE
Sol nu, terre	0,2	9
Enrobé bitumeux	0,07	10
Asphalte	0,05	10
Béton	0,25	8
Béton bitumeux	0,15	9
Dalles Pavés	0,45	6
Enduits Superficiels	0,05	10
Sable	0,15	9
Métal	0,5	6
Tuile sombre	0,15	9
Tuile claire	0,35	7
Béton	0,25	8
Béton revêtu	0,1	10

Tableau 15 : score des matériaux

2. Aspect Ratio

L'échelle de score de l'Aspect Ratio est basée sur le modèle de Oke (Oke, 1981). Pour les villes européennes, ce modèle présente toutefois un coefficient de corrélation inférieur à celui des villes nord américaines.

$$\Delta(T_{u-r}) = 7,45 + 3,97 \ln(H/W)$$

Voici la représentation graphique de ce modèle :

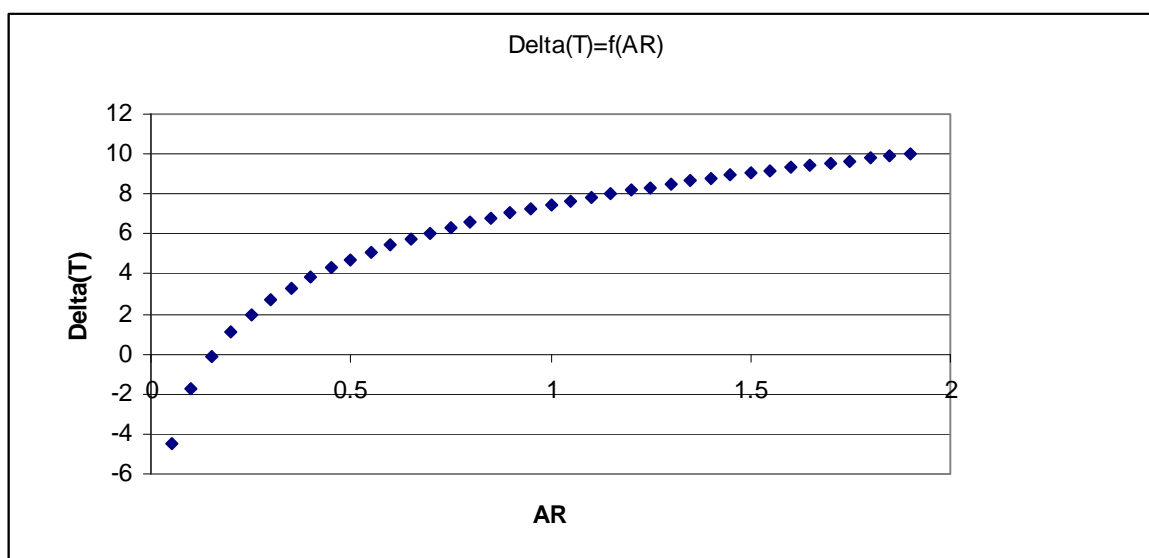


Tableau 16 : relation entre l'AR et l'intensité des ICU

AR	SCORE
[0; 0,2[	0
[0,2; 0,25[	1
[0,25; 0,3[	2
[0,3; 0,4[	3
[0,4; 0,5[	4
[0,5; 0,65[	5
[0,65; 0,8[	6
[0,8; 1,05[	7
[1,05-1,35[	8
[1,35; 1,7[	9
$\geq 1,7$	10

Tableau 17 : scores de l'AR

3. Orientation des rues

Les scores des trois classes d'orientation des rues ont été établis en considérant que les rues orientées nord-sud avaient l'influence minimale sur l'intensité d'un ICU alors que les rues orientées est-ouest avaient l'influence maximale.

ORIENTATION	CLASSE	SCORE
N-S	1	2
Autre	2	5
E-O	3	10

Tableau 18 : scores de l'orientation des rues

4. Surface imperméable

Les scores des deux classes de surfaces imperméables ont été établis en considérant que les surfaces du domaine artificialisées avaient une influence maximale sur l'intensité des ICU alors que les surfaces plantées imperméables présentaient une influence moindre.

SURFACE IMPERMEABLE	SCORE
Surface plantée imperméable	8
Domaine artificialisé	10

Tableau 19 : scores des surfaces imperméables

5. Surface en eau

Les surfaces en eau annihilent le phénomène d'ICU (cf. § 2.5.3.B). Ainsi tous les polygones représentant une surface en eau ont été doté d'un score nul.

6. Surface végétalisée

Les scores des surfaces végétalisées s'appuient sur une étude menée sur l'influence de différents types de végétation sur l'effet de rafraîchissement de l'air en milieu urbain (Spronken-Smith et Oke, 1988). Cette étude donne la différence de température de l'air entre une zone végétalisée en milieu urbain et la ville (ΔT_{u-veg}). Ramenées à une échelle de dix et arrondies à l'entier supérieur ces valeurs nous permettent d'établir des scores. Les scores attribués sont négatifs car la végétation est défavorable aux ICU.

VEGETATION	CLASSE	ΔT_{u-veg}	SCORE
Végétation au sol	1	1,5	-4
Arbustes	2	2	-5
Arbres	3	4	-10

Tableau 20 : scores de la végétation

7. I_{trans}

L'échelle de score de I_{trans} a été établie en supposant une relation linéaire entre la valeur de cet indicateur et l'intensité de l'ICU. Dix classes ont été définies avec un minimum de 0 et une classe maximale dont la borne inférieure est 2500 équivalents véhicules calorifiques/tronçon/heure.

l_{trans}	SCORE
[0-250[	0
[250-500[	1
[500-750[	2
[750-1000[	3
[1000-1250[	4
[1250-1500[	5
[1500-1750[	6
[1750-2000[	7
[2000-2250[	8
[2250-2500[	9
>= 2500	10

Tableau 21 : scores d' l_{trans}

Annexe 10 : bilan énergétique de la ville

Afin d'appréhender les échanges radiatifs et thermiques qui ont lieu dans les villes et qui sont impliqués dans l'effet d'ICU, la littérature propose un bilan énergétique des surfaces de la ville. Ce bilan peut être représenté par l'équation d'équilibre énergétique des surfaces (Oke, Nunez et Oke, 1977). Cette équation s'applique aux surfaces des canyons urbains. Elle n'est valable que pour une surface plane et homogène en terme de propriétés thermiques (Taha, 1997). L'équation renseigne sur la chaleur au niveau des surfaces et de l'air qui les entoure (Mills, 2005).

Equation d'équilibre énergétique des surfaces urbaines :

$$Q^* + Q_f = Q_h + Q_e + \Delta Q_s \quad (1)$$

Avec :

$Q^* = K^* + L^* = K \text{ incident} + K \text{ sortant} + L \text{ incident} + L \text{ sortant}$

Q^* : flux d'énergie radiative total, toutes longueurs d'ondes (W/m^2)

K^* : flux d'énergie radiative faibles longueurs d'onde (W/m^2)

L^* : flux d'énergie radiative hautes longueurs d'onde (IR) (W/m^2)

Q_f : flux de chaleur anthropique totale (W/m^2)

Q_h : flux de chaleur sensible (W/m^2) = quantité de chaleur échangée, sans transition de phase physique, entre les surfaces et l'air du canyon urbain, induisant un changement de température.

Q_e : flux de chaleur latente (W/m^2) = quantité de chaleur absorbée par l'eau présente dans ou sur les surfaces lors de son évaporation. Cette transformation n'induit pas de changement de température.

ΔQ_s : flux de chaleur stockée niveau du sol (W/m^2)

Les paramètres du tissu urbain, recensés au paragraphe 2.5, vont avoir une influence sur les membres de l'équation (1) et donc sur la formation et l'intensité des ICU.

Membre de l'équation	Ordre de grandeur (W/m ²)	Paramètre	Effet sur le microclimat urbain
Augmentation de Q*	700 en été (Taha, 1997)	Exposition au rayonnement solaire	Pénétration du rayonnement solaire dans le tissu urbain (Chudnovsky et al., 2004)
Augmentation de K*	-	Géométrie de l'UC	Réflexions des rayons incidents sur les surfaces de l'UC
Augmentation de L incident	-	Pollution atmosphérique	Absorption des rayons incidents et réémission de rayonnement IR
Diminution de L sortant	-85 la nuit (Oke et Maxwell, 1973)	Géométrie de l'UC	Capture de la chaleur réémise par les matériaux
Qf	20 (Sailor et Lu, 2004)	Bâtiments et transports	Ajout de chaleur dans l'air de la ville
Augmentation de ΔQ_s	-	Matériaux	Stockage de la chaleur
Diminution de Qe	20	Matériaux	Imperméabilité des surfaces
Augmentation de Qe	20	Végétation	Évapotranspiration (Weng et al., 2004)
Diminution de (Qh+Qe)	120 ($\beta=5=Q_h/Q_e$) (Taha, 1997)	Géométrie de l'UC	Diminution de la vitesse du vent et turbulences

Tableau 22 : influence des paramètres urbains sur le bilan énergétique de la ville (source : d'après Mills, 2005)

Annexe 11 : cartes ICU

Identification des îlots de chaleur urbains Zone test n°1 : quartier Gratte-Ciel, Villeurbanne



Légende

SCORE ICU (%)

- [-11 ; -5] : îlot de fraîcheur
-]-5 ; 5] : ICU nul
-] 5 ; 25] : ICU faible
-] 25 ; 50] : ICU moyen
-] 50 ; 100] : ICU intense

H Etablissements sanitaires et sociaux

Bâti cadastral

Identification des îlots de chaleur urbains

Zone test n°2 : Fourvière/Vieux Lyon/Presqu'île



Légende

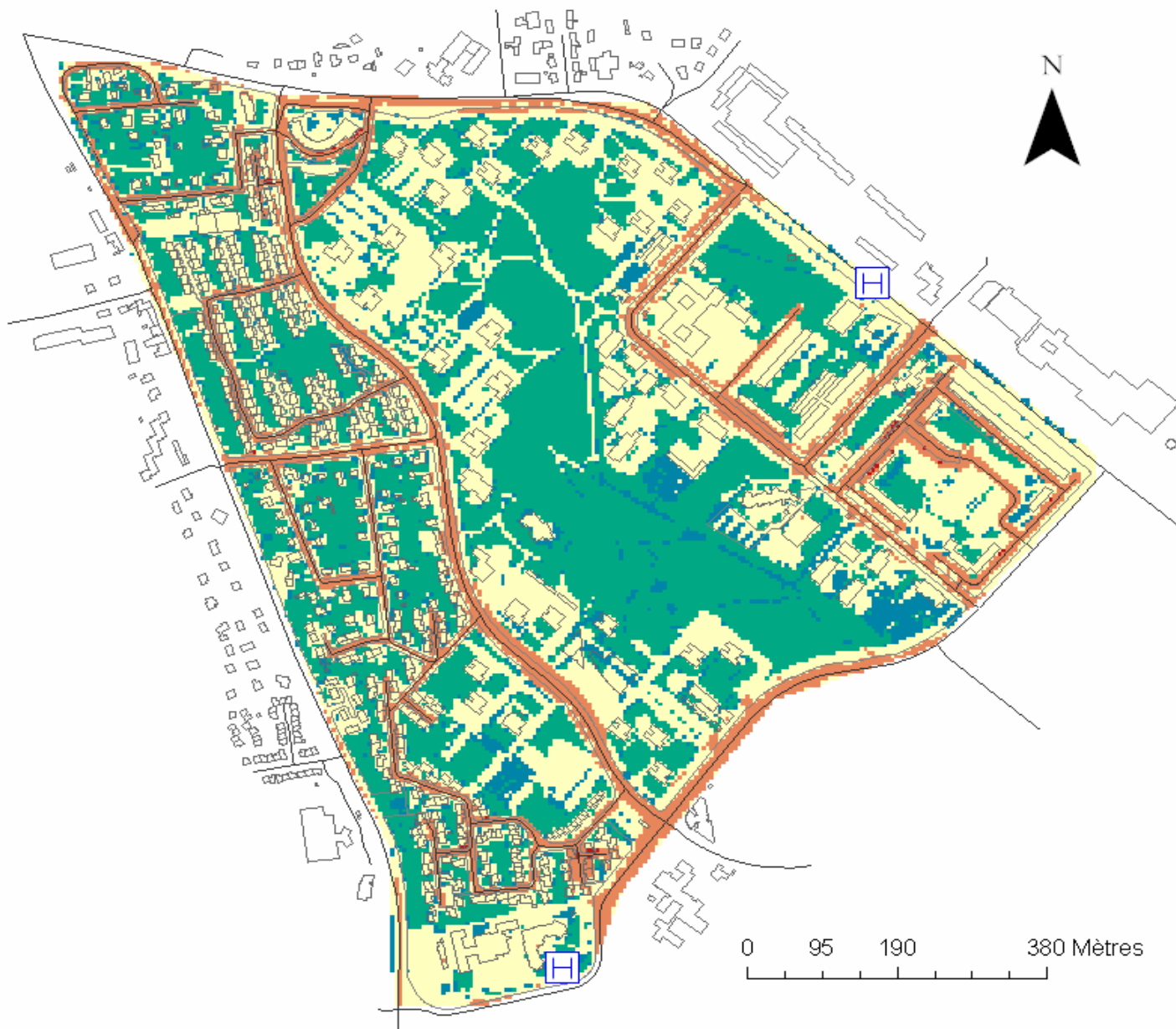
SCORE ICU (%)

- [-11 ; -5] : îlot de fraîcheur
-] -5 ; - 5] : ICU nul
-] 5 ; 25] : ICU faible
-] 25 ; 50] : ICU moyen
-] 50 ; 100] : ICU intense

- Etablissements sanitaires et sociaux
- Ilots cadastraux

Identification des îlots de chaleur urbains

Zone test n°3 : plateau des Minguettes, Vénissieux



Légende

SCORE ICU (%)

- [-11 ; -5] : îlot de fraîcheur
-] -5 ; -5] : ICU nul
-] 5 ; 25] : ICU faible
-] 25 ; 50] : ICU moyen
-] 50 ; 100] : ICU intense

- Etablissements sanitaires et sociaux
- Bâti cadastral
- Voirie

Identification des îlots de chaleur urbains

Zone test n°4 : Meyzieu sud-ouest



Légende

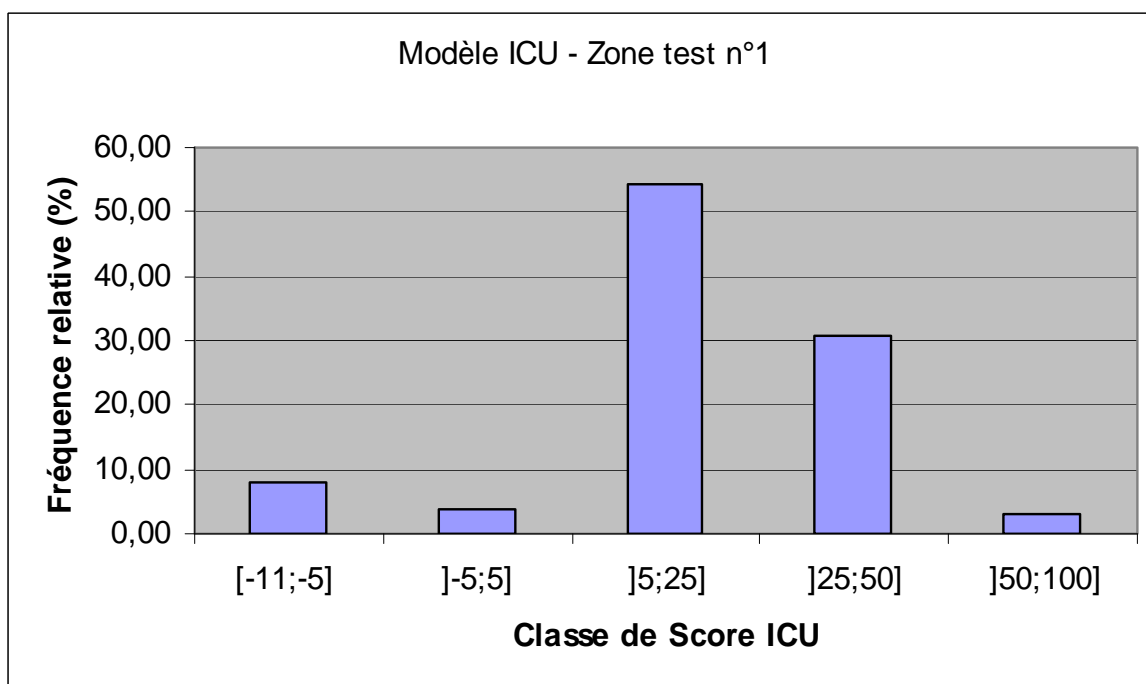
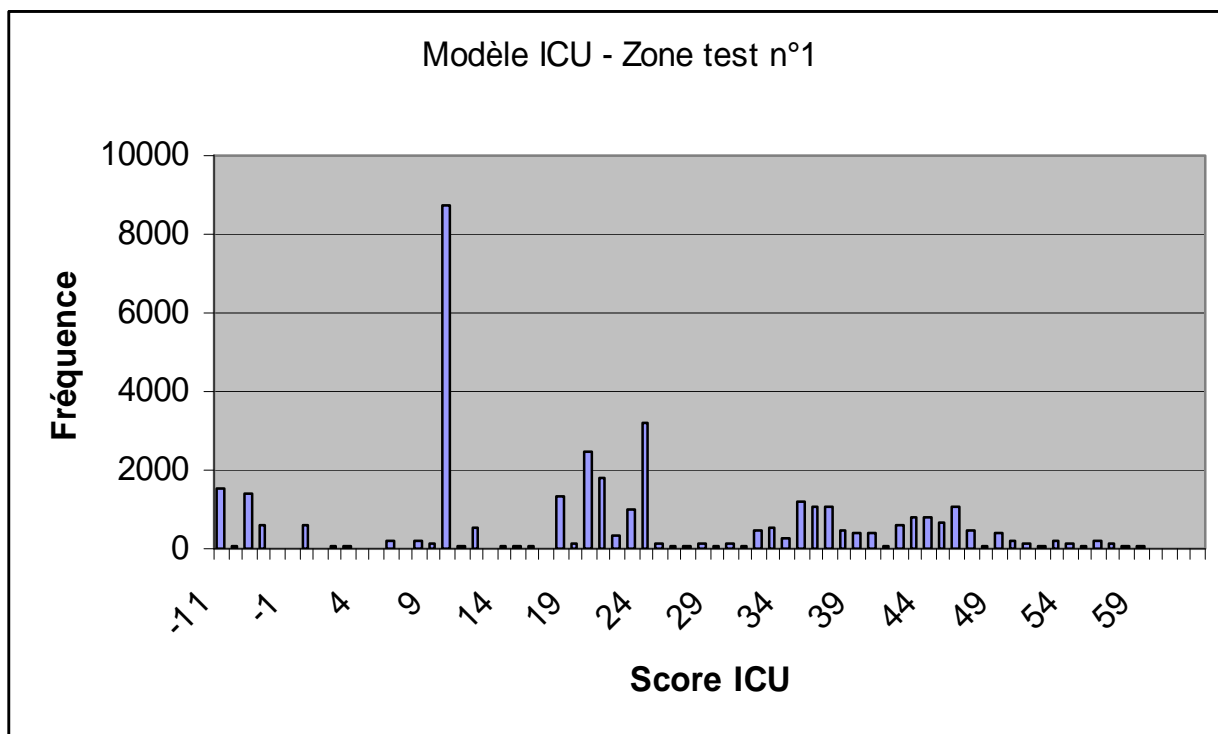
SCORE ICU (%)

- [-11 ; -5] : îlot de fraîcheur
-] -5 ; 5] : ICU nul
-] 5 ; 25] : ICU faible
-] 25 ; 50] : ICU moyen
-] 50 ; 100] : ICU intense

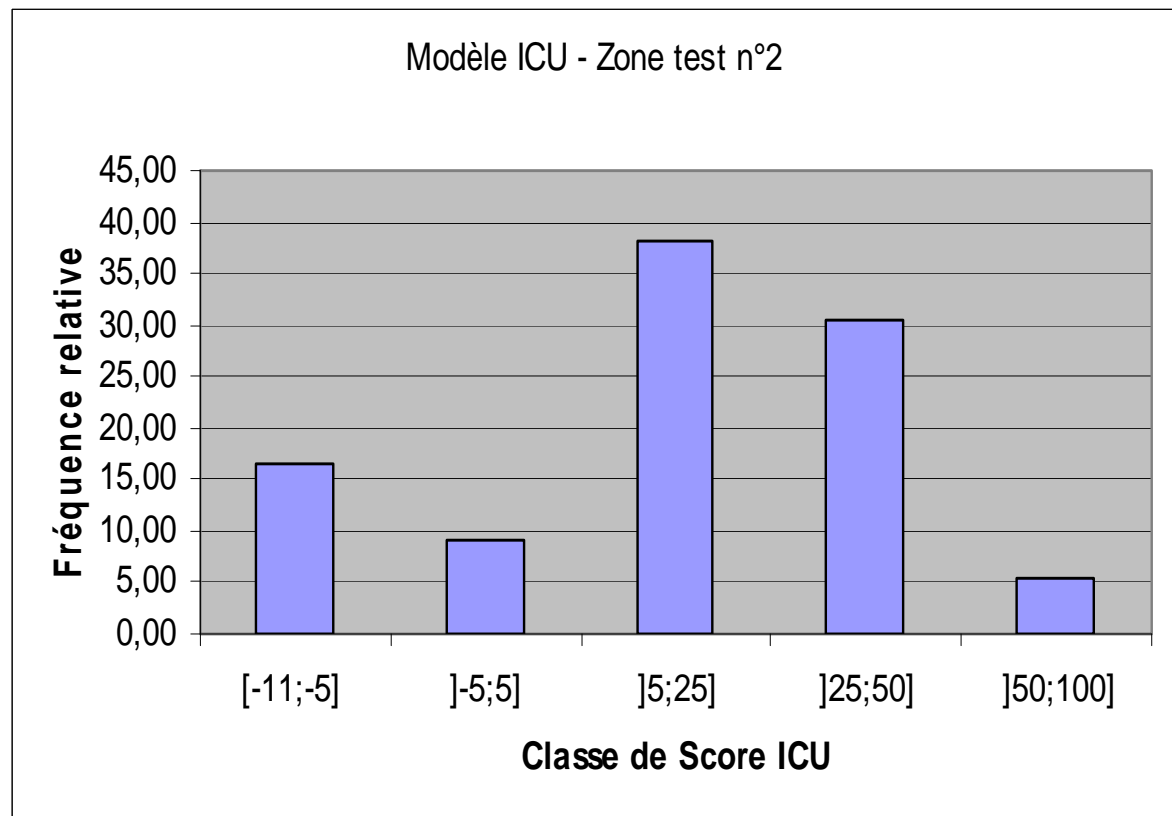
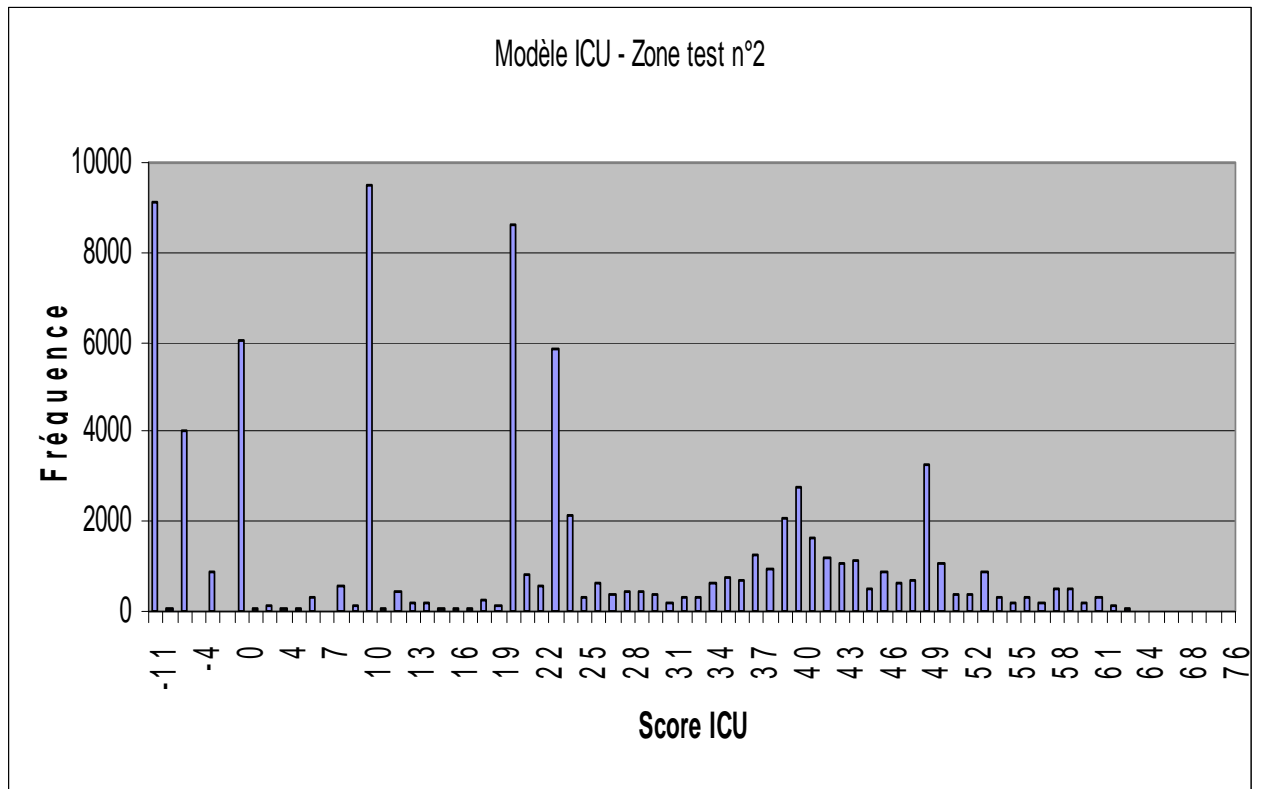
- H Etablissements sanitaires et sociaux
- Bâti cadastral
- Voirie

Annexe 12 : distribution des scores

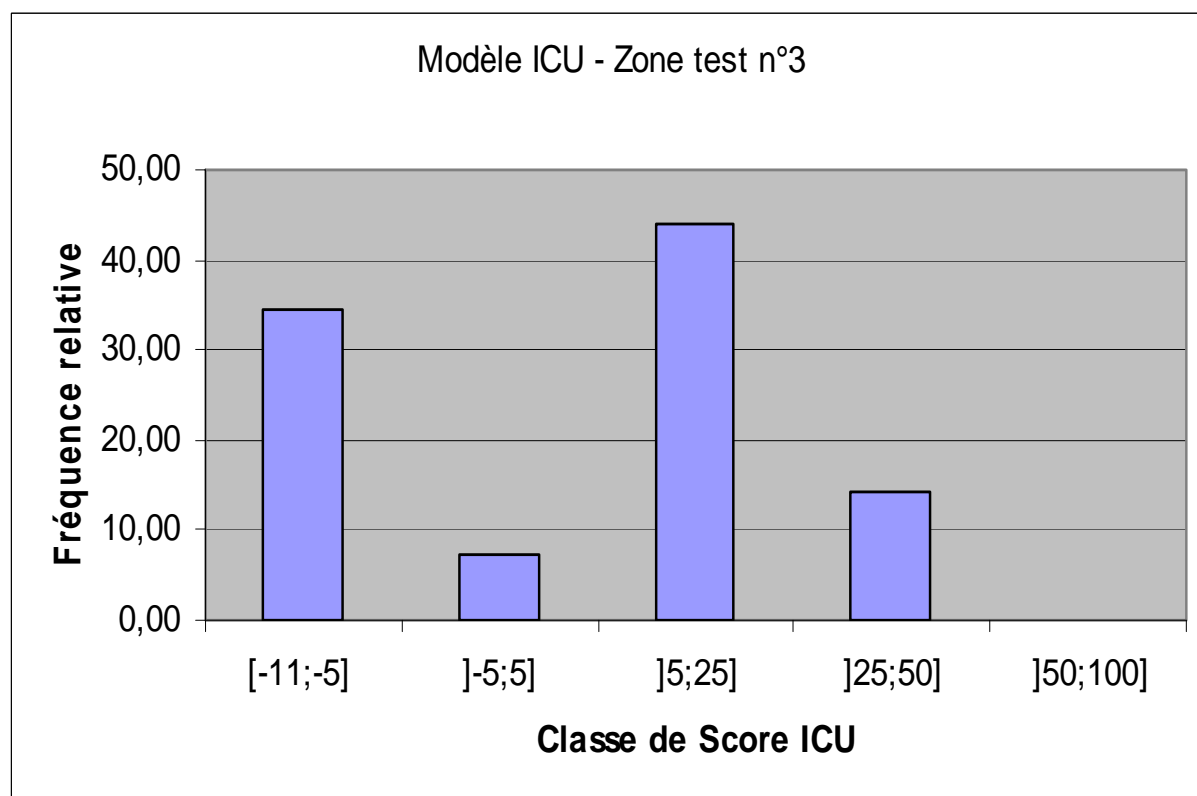
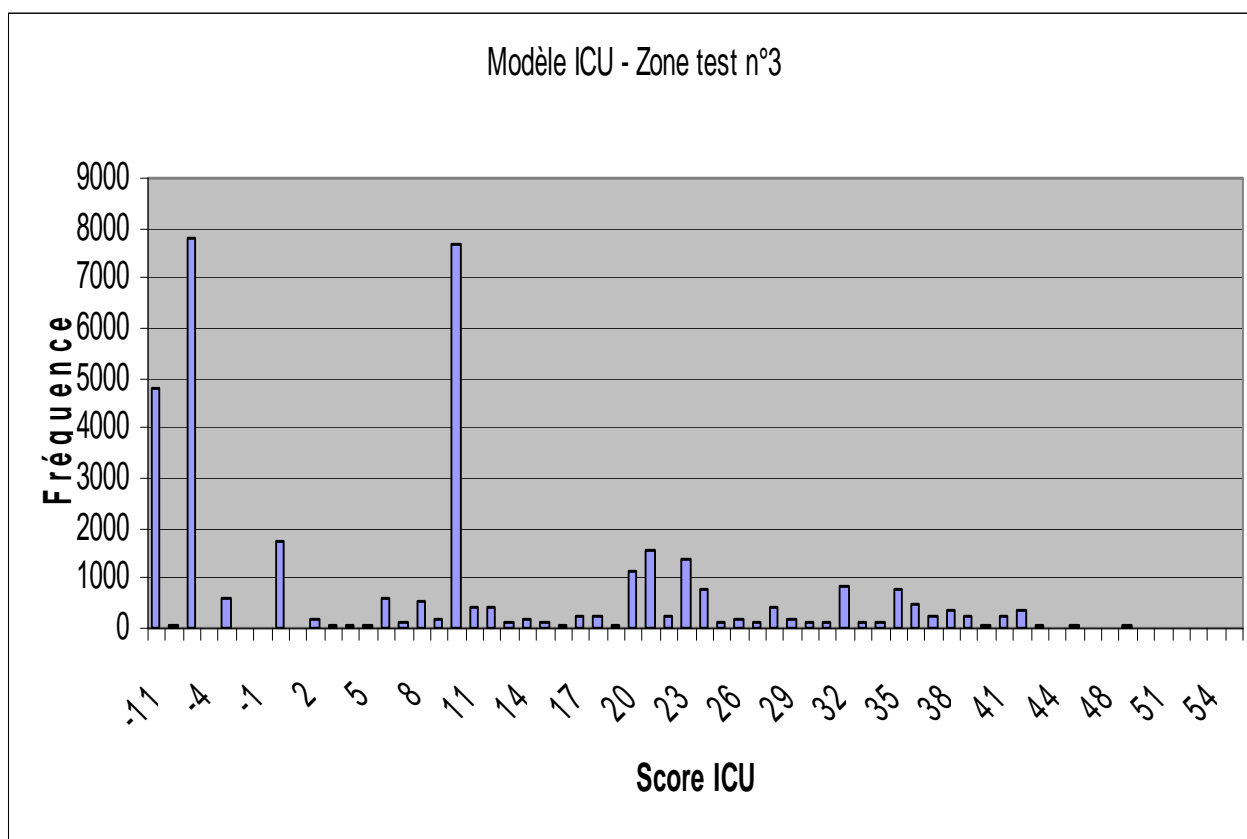
Zone test n°1



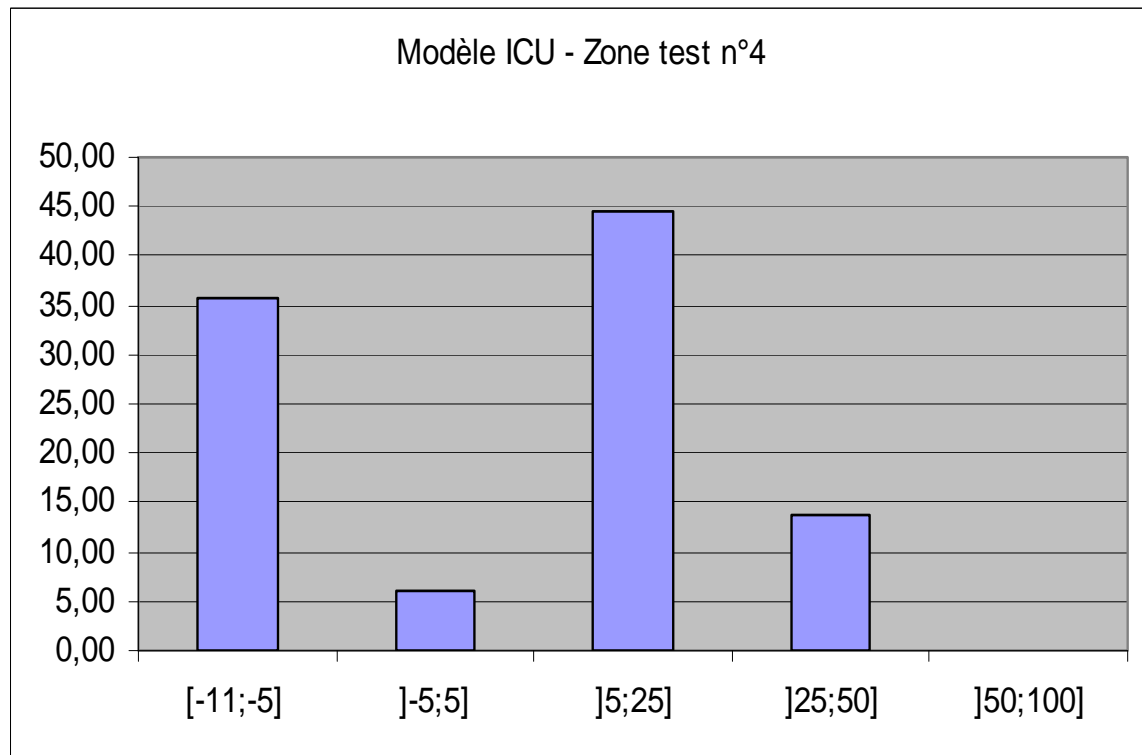
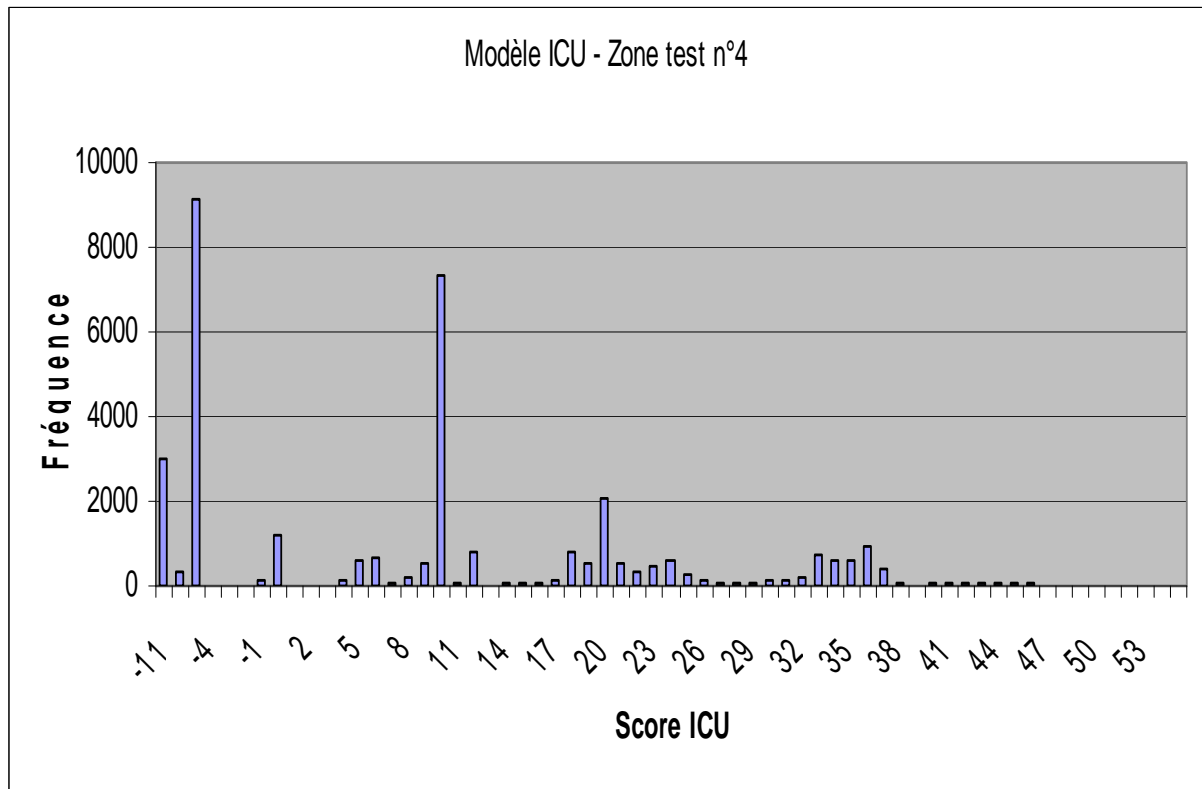
Zone test n°2



Zone test n°3



Zone test n°4



Annexe 13 : IRIS, zone test n°1


Carte de risque d'îlots de chaleur urbains IRIS de la zone test n°1




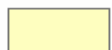
Légende


 IRIS 2000


SCORE ICU

 [-11 ; -5] : îlot de fraîcheur

]-5 ; 5] : ICU nul

] 5 ; 25] : ICU faible

] 25 ; 50] : ICU moyen

] 50 ; 100] : ICU intense

Annexe 14 : ESS

ZONE	NOM	CATEGORIE	CAPACITE	ADRESSE
1	CENTRE DE JOUR	Centre Hospitalier Spécialisé lutte Maladies Mentales	14	4 R BRANLY Villeurbanne
	FOYER A.N.E.F.- C.H.R.S.	Centre Hébergement & Réinsertion Sociale	18	17 R JEAN BOURGEY Villeurbanne
	SANTE MENTALE ET COMMUNAUTES	Centre Crise Accueil Permanent	5	136 R LOUIS BECKER Villeurbanne
	RESIDENCE ALTERNATIVE	Maison de Retraite	13	41 R RACINE Villeurbanne
2	MAISON DES FEMMES AVEUGLES	Foyer Occupationnel	36	14 CHE DE MONTAUBAN LYON 5e
	FOYER MAURICE LIOTARD	Centre Hébergement & Réinsertion Sociale	24	6 MTE DU CHEMIN NEUF LYON 5e
	FOYER MARIE- THERESE	Logement Foyer non Spécialisé	58	59 MTE DU CHEMIN NEUF LYON 5e
	HOPITAL DE L'HOTEL-DIEU	Centre Hospitalier Régional	218	1 PLE DE HOPITAL LYON 2e
	MAISON THERESE COUDERC	Maison de Retraite	40	3 PLE DE FOURVIERE LYON 5e
	C.S.S.T. HOTEL- DIEU	Centres spécialisés de soins aux toxicomanes	0	1 PLE DE HOPITAL LYON 5e
	HOPITAL DE L'ANTIQUAILLE	Centre Hospitalier Régional	107	1 R DE ANTIQUAILLE LYON 5e
	O.R.LOGE.S.	Centre Hébergement & Réinsertion Sociale	15	5 R DES QUATRE CHAPEAUX LYON 2e
	FOYER D'HEBERGEMENT O.R.LOGE.S.	Foyer Hébergement Adultes Handicapés	10	5 R DES QUATRE CHAPEAUX LYON 2e

	HOPITAL DE FOURVIERE	Etablissement de Soins Médicaux	98	8 R ROGER RADISSON LYON 5e
	USLD HOPITAL FOURVIERE	Etablissement de Soins Longue Durée	128	8 R ROGER RADISSON LYON 5e
	IME DE FOURVIERE	Institut Médico-Educatif	70	3 R ROGER RADISSON LYON 5e
	PENSION LE VERBE INCARNE	Maison de Retraite	40	24 R ROGER RADISSON LYON 5e
3	MAPAD "LA SOLIDAGE"	Maison de Retraite	120	1 AV DU 11 NOVEMBRE Vénissieux
	CLINIQUE MUTUALISTE LA ROSERAIE	Etablissement de Soins Pluridisciplinaire	67	1 AV DU 11 NOVEMBRE VENISSIEUX
	RESIDENCE LUDOVIC BONIN	Logement Foyer	61	15 AV JEAN CAGNE Vénissieux
4	FOYER D'HEBERGEMENT "LE CHEMIN"	Foyer Hébergement Adultes Handicapés	8	9 R DE LA REPUBLIQUE Meyzieu
	RESIDENCE MARGUERITE	Maison de Retraite	80	34 R HENRI LEBRUN Meyzieu

Annexe 15 : carte de réduction des ICU, zone test n°1

**Modèle de réduction des îlots de chaleur urbains
Zone test n°1 : quartier Gratte-Ciel, Villeurbanne**



Légende

SCORE ICU (%)

- [-11 ; -5] : îlot de fraîcheur
-] -5 ; 5] : ICU nul
-] 5 ; 25] : ICU faible
-]25 ; 50] : ICU moyen
-] 50 ; 100] : ICU intense

-  Etablissements sanitaires et sociaux
-  Bâti cadastral

Abstract

REDUCING THE PUBLIC HEALTH IMPACT OF HEAT WAVES Development of an assessment methodology to describe the urban heat island effect in Lyon urban area community.

The increase of public health impact of heat waves is predicted for the decades to come. In towns, heat waves features are strongly correlated to the urban heat island effect characterized by an important spatial variability. Thus, exposure to extreme temperature conditions in urban areas must be studied by taking into account the urban heat island effect. The aim of this study is to develop a methodology for the evaluation of heat exposure in cities which could be used by public health authorities and Lyon urban area community to reduce health impact and improve land settlement.

A review of the epidemiologic studies gives the keys to understand the relationship between health and urban heat islands. Given the current state of knowledge in urban microclimatology, a synthesis of urban characteristics which are involved in the urban heat island effect is proposed. Data qualifying the urban characteristics underlined by the synthesis was gathered to develop a model based on GIS resources. The development of the model was carried out on 4 zones of Lyon urban area community. This model simulates the spatial distribution of summertime urban heat island intensity in a 24 hours cycle.

High heat islands intensities were highlighted by GIS analyses, in particular in urban canyons. According to the model results, such intensities could be dramatically reduced by tree planting along the side of streets.

A methodology to validate the model, based on *in situ* measurements and remote sensing, is proposed.

Finally, several applications of the model in public health prevention and urban management are carried out to propose health impact and heat islands reduction strategies.

Key words :

HEAT WAVES, GIS, PUBLIC HEALTH IMPACT, PREVENTION, URBAN MANAGEMENT, URBAN SETTLEMENT, MICROCLIMATOLOGY, METEOROLOGY, URBAN HEAT ISLAND, EXPOSURE, GREATER LYON, FRANCE