

N° d'ordre : 3418 G

Thèse de DOCTORAT

Discipline : GÉOGRAPHIE

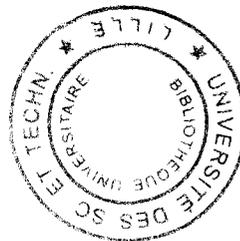
Présentée et soutenue publiquement par

Nathalie LONG

LE 5 DÉCEMBRE 2003

ANALYSES MORPHOLOGIQUES ET AÉRODYNAMIQUES DU TISSU URBAIN : APPLICATION À LA MICRO-CLIMATOLOGIE DE MARSEILLE PENDANT LA CAMPAGNE ESCOMPTE

Thèse dirigée par Claude KERGOMARD et co-encadrée par Patrice MESTAYER



Jury :

Pierre CARREGA
Koen DE RIDDER
Hervé LE MEN

Rapporteur, Professeur, Université de Nice - Sophia Antipolis
Rapporteur, Associate professor, Université Catholique de Louvain
Rapporteur, Ingénieur, HDR, Institut Géographique National

Patrice MESTAYER
Claude KERGOMARD
Jean Pierre PENEAU
Christian KELMA

Co-encadrant, Directeur de Recherche CNRS, LMF, École Centrale de Nantes
Directeur de thèse, Professeur, Université des Sciences et Techniques de Lille
Président du jury, Professeur émérite, Université de Nantes
Examineur, Directeur de SIRIATECH

Avant-propos

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une thèse financée par une bourse CIFRE. L'entreprise SIRIATECH est un des trois partenaires de ce projet, les deux autres sont le Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'École Centrale de Nantes et le Laboratoire de Géographie des Milieux Anthropisés de l'Université des Sciences et Techniques de Lille. La thèse a été réalisée dans sa grande majorité au Laboratoire de Mécanique des Fluides au sein de l'équipe de recherche Dynamique de l'Atmosphère Habitée.

Ce document se compose tout d'abord d'une nomenclature des variables utilisées, d'une liste des abréviations puis d'une introduction. La thèse est ensuite présentée avec figures et tableaux intégrés dans le texte. Afin de permettre une meilleure mise en page et une lecture plus facile du document, les cartes analysées sont reportées à la fin de la thèse après la bibliographie. Le document se termine par des annexes qui apportent des compléments d'information.

Je tiens à profiter de cet avant-propos pour remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ma thèse.

Je remercie plus particulièrement mes deux directeurs de thèses, Claude Kergomard et Patrice Mestayer, pour leur disponibilité et leurs conseils durant ces trois années, qui ont du paraître longues à Patrice, la proximité des bureaux permettant des questions/réponses et des échanges assez fréquents !

Je remercie également M. Péneau d'avoir présider mon jury de thèse et Messieurs De Ridder, Carrega et Le Men d'avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse.

Je tiens également à remercier les personnes qui ont participé à mon Comité de Suivi de Thèse : Isabelle Calmet dont les remarques sont toujours très pertinentes, Dominique Groleau qui avait déjà « les pieds dans le plat » avant cette thèse ce qui a permis de poursuivre une réflexion scientifique déjà en cours, en apportant des éléments nouveaux, George Najjar pour ses remarques d'ordre géographique et

climatologique et enfin Bruno Abart qui a suivi le développement de DFMap. Je remercie par la même occasion les différentes personnes de Siratech qui ont été impliquées à tour de rôle dans le développement de DFMap.

Merci également à Jean-Pierre Lagouarde et à Grégoire Pigeon pour leurs conseils dans l'utilisation et le traitement de leur mesures effectuées pendant ESCOMPTE.

Je remercie toute l'équipe du laboratoire pour leur soutien et leur conseil, merci également à Thibault, Sylvie, Alexandru et Sylvain. Pour finir (par les meilleurs), merci à mes compagnons de galère Romain et Isabelle, on les aura à l'usure ? C'est chose faite, l'impossible a été fait !

Enfin, mes dernières pensées vont à Olivier qui a eu le mérite de me supporter pendant ces années (mais ça y est c'est la fin de mes études !) et à toutes les personnes que je n'ai pas citées mais que je n'oublie pas ...

TABLE DES MATIÈRES

Nomenclature	5
Abréviations.....	7
Liste des figures	9
Liste des tableaux	15
Liste des cartes	17
INTRODUCTION.....	21
CHAPITRE 1:LA VILLE	27
1.1 Caractéristiques d'une ville européenne : héritages historiques, morphologie urbaine et aménagement.....	27
1.1.1 Développement des villes au cours des deux derniers siècles	27
1.1.2 Les éléments d'une ville	28
1.1.3 Plan et structure des villes.....	29
1.1.4 Les différents quartiers d'une ville	29
1.1.5 La population urbaine	31
1.1.6 Les politiques d'aménagement et d'urbanisme	31
1.2 Marseille : la particularité d'une ville portuaire méditerranéenne	33
1.2.1 Situation topographique.....	33
1.2.2 Évolution politico-historique et urbanistique de Marseille	33
1.2.3 Évolution de l'habitat typique marseillais	36
1.3 Les bases de données urbaines et autres sources d'information	38
1.3.1 Les bases de données vectorielles de l'IGN	38
1.3.2 La base de données CORINE Land Cover	39
1.3.3 Les Systèmes d'Information Géographiques urbains	41
1.3.4 Les photos aériennes	42
1.3.5 Les images satellites.....	42
1.4 Le climat urbain.....	43
1.4.1 Les caractéristiques du climat urbain	44

1.4.2	Les processus et les facteurs du climat urbain.....	46
1.5	Conclusion.....	53

CHAPITRE 2: LA BDTOPO (IGN) ET LE LOGICIEL DFMAP 55

2.1	La BDTopo de Marseille : description des fichiers	55
2.1.1	Les bâtiments.....	56
2.1.2	Les axes routiers	57
2.1.3	La végétation.....	57
2.1.4	L'hydrographie.....	58
2.1.5	Le sable sec	59
2.1.6	La topographie	59
2.2	DFMap	60
2.2.1	Création d'Astuce/DFMap	60
2.2.2	Objectif de DFMap.....	61
2.2.3	Description de DFMap.....	61
2.2.4	Passage d'une information vectorielle à une information « rasterisée »	62
2.2.5	Les fonctions de DFMap	63
2.3	Validation de DFMap	72
2.3.1	État des lieux de la BDTopo.....	72
2.3.2	Validation des fonctions de base de DFMap.....	73
2.3.3	Validation des fonctions secondaires	86
2.4	Taille de la maille	89
2.5	Conclusion.....	94

CHAPITRE 3: ANALYSE DU TISSU URBAIN DE MARSEILLE 95

3.1	Description du tissu urbain marseillais à partir de la BDTopo	95
3.1.1	Les modes d'occupation des sols de l'agglomération marseillaise	97
3.1.2	La morphologie des bâtiments du tissu urbain marseillais.....	98
3.1.3	La répartition spatiale des bâtiments du tissu urbain marseillais	100
3.2	Identification des quartiers urbains : méthodologie.....	101
3.2.1	Application de la méthode de Chaillou à Marseille.....	103

3.2.2	Les Méthodes de classification statistique	104
3.3	Identification des zones homogènes à Marseille : application de la méthode des nuées dynamiques.....	107
3.3.1	Tests des différentes méthodes définissant les centres initiaux des classes	107
3.3.2	Tests pour définir le nombre de classes.....	114
3.3.3	La classification de la zone d'étude de Marseille (6300 cellules) :.....	117
3.3.4	La classification du tissu urbain marseillais (3846 cellules).....	126
3.4	Conclusion.....	135

CHAPITRE 4: VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE ET DES RÉSULTATS137

4.1	Validation de la méthodologie sur la ville de Nantes	137
4.1.1	Données utilisées pour la ville de Nantes	138
4.1.2	Description de Nantes d'après les variables du SIG.....	138
4.1.3	Application de la méthodologie de classification.....	139
4.1.4	Conclusion partielle.....	148
4.2	Validation des résultats de la classification de Marseille..	148
4.2.1	Validation du nombre de variables utilisées dans les classifications	149
4.2.2	Corrections et améliorations des caractéristiques de chaque classe urbaine	151
4.2.3	Validation des corrections sur le quartier St Jérôme	154
4.2.4	Vérification des modes d'occupation du sol du centre-ville de Marseille	156
4.2.5	Comparaisons avec les résultats d'analyse d'images satellitales SPOT	157
4.2.6	Comparaison de la classification avec la base de données CORINE LAND COVER (CLC).....	158
4.2.7	Comparaisons avec d'autres classifications de villes	160
4.2.8	Conclusion partielle.....	161
4.3	Des quartiers urbains aux quartiers aérodynamiques	161
4.3.1	La longueur de rugosité estimée pour le tissu urbain marseillais	162

4.3.2	La longueur de rugosité selon les quartiers urbains.....	163
4.3.3	Conclusion partielle sur les longueurs de rugosité	169
4.4	Discussion	170
4.5	Conclusion.....	174
CHAPITRE 5:RELATIONS ENTRE LES QUARTIERS URBAINS ET LES PARAMÈTRES CLIMATIQUES.....		175
5.1	La température potentielle et l'humidité spécifique	175
5.1.1	Données utilisées	175
5.1.2	Les différentes situations météorologiques	178
5.1.3	Variabilité spatiale de la température potentielle et de l'humidité spécifique	181
5.1.4	Relation entre les quartiers aérodynamiques et les mesures du réseau Pigeon	192
5.1.5	Conclusion partielle	196
5.2	La température de brillance.....	197
5.2.1	Données utilisées	197
5.2.2	Résultats	198
5.2.3	Conclusion partielle	202
5.3	Conclusion.....	204
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....		205
BIBLIOGRAPHIE		211
CARTES		221
ANNEXES		283

NOMENCLATURE

Lettres latines

D	Distance entre deux points (m)
D_F	Largeur de la surface frontale d'un bâtiment (m)
D_L	Largeur de la surface latérale d'un bâtiment (m)
E	Espacement moyen entre les bâtiments (m)
f	Fetch (m ou km)
H	Hauteur (m)
\bar{H}	Hauteur moyenne des bâtiments dans un rugoxel (m)
h	Hauteur des éléments de rugosité (m)
h_{bati}	Hauteur moyenne d'un bâtiment (m)
H_{moy}	Hauteur moyenne des bâtiments dans un rugoxel pondérée par leur surface (m)
k	Nombre de classes
L	Espace moyen entre les bâtiments (m)
n	Effectif d'une classe
N_{bati}	Nombre de bâtiments
P_{bati}	Périmètre d'un bâtiment (m)
$P_{non-bati}$	Périmètre de la surface non-bâtie (m)
Q^*	Flux radiatif net (W/m^2)
Q_A	Flux de chaleur advectée (W/m^2)
Q_E	Flux de chaleur latente (W/m^2)
Q_F	Flux de chaleur d'origine anthropique (W/m^2)
Q_H	Flux de chaleur sensible (W/m^2)
Q_S	Flux de chaleur stockée (W/m^2)
S_{bati}	Surface d'un bâtiment (m^2)
S_{cour}	Surface d'une cour (m^2)
$S_{non-bati}$	Surface non bâtie (m^2)
$S_{rugoxel}$	Surface d'un rugoxel (m^2)
S_{zone}	Surface d'une zone (m^2)
$\langle T \rangle$	Température moyenne ($^{\circ}C$)
ΔT_{u-r}	Intensité de l'îlot de chaleur urbain
R_B	Rapport S_{bati} sur P_{bati}
R_C	Rapport de la surface d'un cercle sur son périmètre (m)
U	Vitesse du vent à grande échelle (m/s)
u_*	Vitesse de frottement à la surface (m/s)
u'	Composante verticale de la fluctuation de la vitesse du vent (m/s)

w'	Composante horizontale de la fluctuation de la vitesse du vent (m/s)
W	Largeur de la rue (m)
z	Altitude (m)
Z_0	Longueur de rugosité dynamique (m)
Z_d	Hauteur de déplacement (m)
Z_{dpl}	Hauteur de déplacement « dans le plan » de Bottema (m)

Lettres grecques

$\delta_{Hauteur}$	Écart type de la hauteur des bâtiments dans un rugoxel (m)
λ_B	Densité bâtie
λ_F	Densité frontale
κ	Constante de von Karman (=0.4)
ρ_a	Masse volumique de l'air (kg/m ³)
τ_s	Frottement à la surface (kg/m/s ²)
ν	Viscosité cinématique de l'air (m ² /s)
ν_t	Viscosité de la turbulence (m ² /s)

ABRÉVIATIONS

ACP	Analyse en Composantes Principales
AFC	Analyse Factorielle des Correspondances
AGAM	AGence d'Urbanisme de l'Agglomération Marseillaise
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and reflection Radiometer
Bd	BDTopo
CAA	Cour d'Appel Administrative
CEC	Commission of the European Communities
CEREMADE	CEntre de REcherche en MATHématiques de la DEcision
CERMA	CEntre de Recherche Méthodologique d'Architecture
CH	Classification Hiérarchique
Ci	Cianco et Ellefsen (1998)
CLC	Corine Land Cover
CLU	Couche Limite Urbaine
CNH	Classification Non Hiérarchique
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CORINE	COoRdination of INformation on the Environment
DAH	Dynamique de l'Atmosphère Habitée
DAO	Dessin Assisté par Ordinateur
ECN	Ecole Centrale de Nantes
ESCOMPTE	Expérience sur Site pour COntreindre les Modèles de Pollution atmosphérique et de Transport d'Emission
ETIS	Equipes Traitement des Images et du Signal
GPU	Grands Projets Urbains
HLM	Habitations à Loyer Modéré
HRG	Haute Résolution Géométrique
HRS	Haute Résolution Stéréoscopique
IAURIF	Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Ile-de-France
IFN	Inventaire Forestier National
IGN	Institut Géographique National
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
IRIN	Institut de Recherche en Informatique de Nantes
LOEMI	Laboratoire d'Optique d'Electronique et de Micro-informatique
LUMPS	Local-scale Urban Meteorological Parameterization Scheme
MNE	Modèle Numérique d'Élévation
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MOS	Mode d'Occupation des Sols

NOAA-AVHRR	National Oceanic and Atmospheric Administration – Advanced Very High Resolution Radiometer
OPAH	Opération Programmée d'Amélioration de l'Habitat
ORFEO	Optical and Radar Federated Earth Observation
PAM	Port Autonome de Marseille
PLU	Plan Local d'Urbanisme
POS	Plan d'Occupation des sols
RAMS	Regional Atmospheric Modeling System
SCOT	Schéma de Cohérence Territoriale
SDAU	Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme
SIG	Système d'Information Géographique
SIG-U	Système d'Information Géographique – Urbain
SM2-U	Sub-Meso Soil Model - Urban
TEB	Town Energy Budget
Th	Theurer (1999)
USGS	United States Geological Survey
USTL	Université des Sciences et Techniques de Lille

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Piégeage radiatif dans une rue canyon.	48
Figure 1-2 : Surface ensoleillée en fonction de la géométrie de la rue pendant l'été (a) et pendant l'hiver (b).....	48
Figure 2-1 : Saisie d'un bâtiment dans la BDTopo.....	57
Figure 2-2 : Création de deux bâtiments A et B et de deux vertex V_1 et V_2 par le maillage.	62
Figure 2-3 : Calcul de la hauteur moyenne d'un bâtiment par interpolation linéaire.	64
Figure 2-4 : Côtés de bâtiments pris en compte dans le calcul du périmètre moyen	66
Figure 2-5 : Cas d'un bâtiment composé d'une cour intérieure et découpé par le maillage pour le calcul de la compacité.....	66
Figure 2-6 : Surfaces latérale et frontale de deux bâtiments par vent de nord.....	68
Figure 2-7 : la Préfecture : vue en en plan (a) et vue en 3D (b)	74
Figure 2-8 : Hauteurs moyennes de bâtiment calculées à partir de la BDTopo, sans aucune correction (a) et avec la prise en compte des erreurs de la BDTopo (b).	76
Figure 2-9 : Hauteurs moyennes des bâtiments calculées par DFMap avec une résolution de 25 m*25 m	77
Figure 2-10 : Différence entre les hauteurs calculées manuellement et les hauteurs calculées par DFMap après amélioration du calcul de l'altitude au sol ...	78
Figure 2-11 : Types de bâtiments individuels (a), réguliers du centre-ville (b), collectifs (c) et découpés du centre-ville (d) (l'échelle entre les 4 figures n'est pas identique).	79
Figure 2-12 : Surface en m^2 des bâtiments dans le cas où deux bâtiments sont superposés avant modifications du code (a) et après modifications (b).	80
Figure 2-13 : Surface en m^2 d'un bâtiment avec ou sans cours intérieures, respectivement (a) et (b).	80
Figure 2-14 : Densité surfacique d'une zone de végétation comprise dans une autre zone de végétation	81
Figure 2-15 : Calcul des distances d_1 et d_2 entre deux bâtiments à partir de la coordonnée maximale en y du bâtiment A.	82

Figure 2-16 : Zone-test pour calculer l'espacement moyen entre les bâtiments : quartier du centre-ville.	83
Figure 2-17 : Espacement moyen entre les bâtiments : cas de rues.....	84
Figure 2-18 : Espacement moyen entre les bâtiments : cas d'une place publique.	84
Figure 2-19 : Somme des périmètres des deux bâtiments superposés, non découpés (a) et découpés par le maillage (b).	85
Figure 2-20 : Nombre de bâtiments par cellule.....	86
Figure 2-21 : Densité bâtie au niveau du sol (a) et au-dessus de 35 m (b)	87
Figure 2-22 : Hauteur moyenne (a) et écart-type de la hauteur des bâtiments (b)... ..	87
Figure 2-23 : Volume moyen des bâtiments (gauche) et pondéré par la surface (droite)	88
Figure 2-24 : Compacité moyenne d'un bâtiment composé d'une cour et découpé par le maillage.....	88
Figure 2-25 : Densité frontale et latérale pour un vent de nord	89
Figure 2-26 : Zones-test de 1 km ² du quartier centre-ville (a), d'une zone d'habitat collectif (b), d'une zone d'habitat individuel (c) et d'une zone industrielle (d) pour valider la taille des mailles.	90
Figure 3-1 : Distribution de la variable densité bâtie.....	97
Figure 3-2 : Distribution de la variable densité de la végétation.....	97
Figure 3-3 : Distribution de la variable densité des surfaces goudronnées	98
Figure 3-4 : Distribution de la variable hauteur des bâtiments.....	99
Figure 3-5 : Distributions des variables périmètre (gauche) et volume des bâtiments (droite).....	99
Figure 3-6 : Distribution de la variable compacité des bâtiments	99
Figure 3-7 : Distribution du nombre de bâtiments par cellule (gauche) et de l'espacement moyen entre les bâtiments (droite).....	100
Figure 3-8 : Moyennes des variables pour chaque classe calculée selon le choix 1	108
Figure 3-9 : Moyennes des variables pour chaque classe calculée selon le choix 2.	109
Figure 3-10 : Moyennes des variables pour chaque classe calculée selon le choix 3. .	109

Figure 3-11 : Écart types des variables pour chaque classe calculée selon le choix 1.	110
Figure 3-12 : Écart types des variables pour chaque classe calculée selon le choix 2.	110
Figure 3-13 : Écart types des variables pour chaque classe calculée selon le choix 3.	111
Figure 3-14 : Écart types des variables pour chaque classe calculée selon le choix 2 sur une matrice avec les 20 premières valeurs déplacées à la fin.	113
Figure 3-15 : Écart types des variables pour chaque classe calculée selon le choix 3 sur une matrice avec les 20 premières valeurs déplacées à la fin.	113
Figure 3-16 : Somme des écart types de la densité bâtie en fonction du nombre de classes selon les méthodes 2, 3 et « sample ».	114
Figure 3-17 : Somme des écart types de la densité de végétation en fonction du nombre de classes selon les méthodes 2, 3 et « sample ».	115
Figure 3-18 : Rapport entre la variance intra-classe et la variance totale pour la variable densité bâtie en fonction du nombre de classes selon les méthodes 2, 3 et « sample ».	116
Figure 3-19 : Rapport entre la variance intra-classe et la variance totale pour la variable densité de végétation en fonction du nombre de classes selon les méthodes 2, 3 et « sample ».	116
Figure 3-20 : Distribution des variables de la classe 1 dont la distance euclidienne est supérieure à 10.	122
Figure 3-21 : Distribution des variables de la classe 4 dont la distance euclidienne est supérieure à 3.	123
Figure 3-22 : Distribution des variables de la classe 5 dont la distance euclidienne est supérieure à 5.	124
Figure 3-23 : Distribution des variables de la classe 7 dont la distance euclidienne est supérieure à 2.	125
Figure 3-24 : Somme des écart types de la variable densité bâtie en fonction du nombre de classes calculées pour le tissu urbain marseillais.	127
Figure 4-1 : Somme des écart types de la densité bâtie et de la densité de végétation en fonction du nombre de classes selon le choix « sample ».	139
Figure 4-2 : Rapport entre la variance intra-classe et la variance totale pour les variables densité bâtie et densité de végétation en fonction du nombre de classes selon le choix « sample ».	140

Figure 4-3 : Valeurs moyennes des variables standardisées pour les classes urbaines et la classe végétation, issues de la classification en 8 classes de Nantes ...	143
Figure 4-4 : Pourcentages d'observations bien classées en fonction du nombre de variables pour la classification en 7 classes de Marseille (a), en 6 classes du tissu urbain (b).	150
Figure 4-5 : Pourcentages d'observations bien classées en fonction du nombre de variables pour la classification en 9 classes du tissu urbain.....	151
Figure 4-6 : Longueurs de rugosité selon les modèles de Bottema (en haut), de Raupach (au milieu) et de Macdonald (en bas) pour deux directions de vent : nord (à gauche) et ouest (à droite).....	163
Figure 4-7 : Longueurs de rugosité selon les modèles de Bottema, Raupach et Macdonald pour un vent de nord (gauche) et un vent d'ouest (droite), moyennées pour chacun des 6 quartiers.....	165
Figure 4-8 : Longueurs de rugosité selon les modèles de Bottema, Raupach et Macdonald pour un vent de nord (gauche) et pour un vent d'ouest (droite), moyennées pour chacun des 9 quartiers.	166
Figure 4-9 : Rapport longueur de rugosité sur hauteur des bâtiments en fonction de la densité bâtie pour les modèles de Bottema, Raupach et Macdonald et un vent de nord (classification en 6 classes du tissu urbain).....	168
Figure 4-10 : Rapport longueur de rugosité sur hauteur des bâtiments en fonction de la densité bâtie pour les modèles de Bottema, Raupach et Macdonald et un vent de nord (classification en 9 classes du tissu urbain).....	168
Figure 4-11 : Comparaison des longueurs de rugosité calculées à partir des modèles de Bottema (Bot) et de Raupach (Rau) pour les quartiers communs aux classifications en 6 (6cl.) et 9 classes (9cl.).....	170
Figure 5-1 : Somme des écarts types des variables vitesse du vent et température mesurées à Vallon Dol en fonction du nombre de classes.....	178
Figure 5-2 : Caractéristiques météorologiques de la classe 1 de la classification .	179
Figure 5-3 : Caractéristiques météorologiques de la classe 3 de la classification .	179
Figure 5-4 : Caractéristiques météorologiques de la classe 2 de la classification .	180
Figure 5-5 : Régimes thermiques moyens sur la période d'étude.....	182
Figure 5-6 : Régimes moyens de l'humidité pendant la période d'étude.....	183
Figure 5-7 : Évolution diurne des températures le 26 juin	185
Figure 5-8 : Évolution diurne de l'humidité le 26 juin.....	185

Figure 5-9 : Évolution diurne des températures le 18 juin	188
Figure 5-10 : Évolution diurne de l'humidité le 18 juin.....	188
Figure 5-11 : Évolution diurne des températures le 15 juin.....	190
Figure 5-12 : Évolution diurne de l'humidité le 15 juin.....	190
Figure 5-13 : Fréquences des températures de brillance des six imageries.	198
Figure 5-14 : Profils des températures moyennes, minimales, maximales et des écarts types (a) lors du vol sur le centre-ville 1 (b) (la flèche sur la carte indique le sens du vol, en couleurs, la classification en 9 classes du tissu urbain).....	199
Figure 5-15 : Profils des températures moyennes, minimales, maximales et des écarts types (a) lors du vol sur le centre-ville 2 (b) (la flèche sur la carte indique le sens du vol, en couleurs, la classification en 9 classes du tissu urbain).....	200
Figure 5-16 : Profils des températures moyennes, minimales, maximales et des écarts types (a) lors du vol sur le quartier St Barnabé (b) (la flèche sur la carte indique le sens du vol, en couleurs, la classification en 9 classes du tissu urbain).201	
Figure 5-17 : Profils des températures moyennes, minimales, maximales et des écarts types (a) lors du vol sur le quartier La Rose (b) (la flèche sur la carte indique le sens du vol, en couleurs, la classification en 9 classes du tissu urbain).....	202

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Valeurs d'albédo pour différents types de surfaces (Oke , 1987)	49
Tableau 2-1 : Calcul de la hauteur moyenne en m d'un bâtiment : cas de la Préfecture.	75
Tableau 2-2 : Espacement moyen entre les bâtiments sur la zone-test (figure 2-16) calculé manuellement (a) et différence entre les résultats de (a) et les résultats de la cinquième méthode (b). Les cellules des tableaux correspondent aux mailles de la zone-test.	83
Tableau 2-3 : Statistiques calculées sur des paramètres morphologiques des bâtiments du centre-ville pour une résolution de 100 m et 200 m	91
Tableau 2-4 : Statistiques calculées sur des paramètres morphologiques d'une zone d'habitat collectif pour une résolution de 100 m et 200 m	91
Tableau 2-5 : Statistiques calculées sur des paramètres morphologiques d'une zone d'habitat individuel pour une résolution de 100 m et 200 m	92
Tableau 2-6 : Statistiques calculées sur des paramètres morphologiques des bâtiments d'une zone industrielle pour une résolution de 100 m et 200 m.....	92
Tableau 3-1 : Nombres de classes calculés selon la formule de Huntsberger et celle de Carruthen	96
Tableau 3-2 : Correspondance et signification des classes entre les méthodes 2 et 3.	112
Tableau 3-3 : Statistiques descriptives des classes urbaines et de la classe végétation issues de la classification en 7 classes.	120
Tableau 3-4 : Moyennes des classes issues de la classification en 6 classes du tissu urbain	128
Tableau 3-5 : Coefficients de variation des classes issues de la classification en 6 classes du tissu urbain (en gris, les coefficients de variation supérieurs à ceux de la classification précédente pour les classes 1 ,2, 4 et 5, à 1 près).	130
Tableau 3-6 : Moyennes des classes 2, 3, 4, 5, 7 et 8 de la classification en 9 classes du tissu urbain	131
Tableau 3-7 : Coefficients de variation des classes 2, 3, 4, 5, 7 et 8 de la classification en 9 classes du tissu urbain (en gris, les coefficients de variation supérieurs à ceux de la classification précédente, à 1 près).....	132

Tableau 3-8 : Moyennes des classes 1, 6 et 9 de la classification en 9 classes du tissu urbain.	133
Tableau 3-9 : Coefficients de variation des classes 1, 6 et 9 de la classification en 9 classes du tissu urbain.	134
Tableau 4-1 : Moyennes des classes urbaines issues de la classification en 8 classes de Nantes.	141
Tableau 4-2 : Moyennes des classes urbaines issues de la classification en 8 classes de Nantes.	144
Tableau 4-3 : Moyennes des variables des classes 5, 6, 9, 10 et 11, issues de la classification en 11 classes de Nantes	145
Tableau 4-4 : Moyennes des variables des classes 2, 3 et 7 de la classification en 11 classes de Nantes.	146
Tableau 4-5 : Coefficients de variation des variables des classes 5, 6, 9, 10 et 11, issues de la classification en 11 classes de Nantes (en gris les coefficients de variation supérieurs à ceux de la classification en 8 classes).....	147
Tableau 4-6 : Coefficients de variation des variables des classes 2, 3 et 7 issues de la classification en 11 classes de Nantes	147
Tableau 4-7 : MOS de 7 classes urbaines de la classification en 9 classes du tissu urbain de Marseille et coefficients correcteurs additionnels proposés.....	152
Tableau 4-8 : MOS calculés à partir de la BDTopo et propositions de correction calculées à partir de photos aériennes pour le quartier St Jérôme.....	156
Tableau 4-9 : Surfaces minérales et végétales estimées à partir de l'analyse d'images SPOT et de celle de la BDTopo.....	157
Tableau 4-10 : Statistiques descriptives des longueurs de rugosité pour les six quartiers urbains, calculées par les modèles de Bottema (Bot), Raupach (Rau) et Macdonald (Mac) pour un vent de nord et un vent d'ouest.	164
Tableau 4-11 : Statistiques descriptives des longueurs de rugosité selon les neuf quartiers urbains, calculées par les modèles de Bottema (Bot), Raupach (Rau) et Macdonald (Mac) pour un vent de nord et un vent d'ouest.	167
Tableau 4-12 : Caractéristiques des neufs quartiers identifiés sur le tissu urbain de Marseille (en noir, la valeur moyenne, en gris l'écart type, Na : la valeur n'a pas été jugée significative car cette classe est composée de très peu de bâtiments).....	172
Tableau 5-1 : Dates et heures des deux circuits	177

LISTE DES CARTES

Carte 1-1 : Arrondissements de Marseille (en chiffre romain).....	221
Carte 1-2 : Présentation de Marseille.....	222
Carte 1-3 : Les principaux quartiers de Marseille.....	223
Carte 3-1 : La densité bâtie de Marseille	224
Carte 3-2 : La densité de la végétation de Marseille	225
Carte 3-3 : La densité des surfaces goudronnées de Marseille	226
Carte 3-4 : La hauteur moyenne des bâtiments du tissu urbain de Marseille.....	227
Carte 3-5 : Le périmètre moyen des bâtiments du tissu urbain de Marseille	228
Carte 3-6 : Le volume moyen des bâtiments du tissu urbain de Marseille.	229
Carte 3-7 : La compacité moyenne des bâtiments du tissu urbain de Marseille..	230
Carte 3-8 : Nombre de bâtiments sur 4 ha du tissu urbain de Marseille.	231
Carte 3-9 : L'espacement moyen entre les bâtiments du tissu urbain de Marseille.	232
Carte 3-10 : Classification du tissu urbain de Marseille selon la méthode développée par Chaillou, 1996.....	233
Carte 3-11 : Classification de Marseille par la méthode k-means de Matlab : cas satisfaisant.	234
Carte 3-12 : Classification de Marseille par la méthode k-means de Matlab : cas non-satisfaisant.....	234
Carte 3-13 : Classification de Marseille selon la méthode k-means de Matlab (méthode « uniform »).....	235
Carte 3-14 : Classification de Marseille en 10 classes selon le choix 2.....	236
Carte 3-15 : Classification de Marseille en 10 classes selon le choix 3.....	237
Carte 3-16 : Classification de Marseille en 10 classes selon le choix 3 à partir d'une matrice où les 20 premières valeurs ont été déplacées à la fin.....	238
Carte 3-17 : Classification de Marseille en 7 classes.....	239
Carte 3-18 : Superposition de la classification en 7 classes et de la BDTopo : le centre ville (a), l'habitat collectif (b), l'habitat individuel dense (c) et peu dense (d), les surfaces d'eau (e), les surfaces de végétation et de sol sans information (f).	240
Carte 3-19 : Distances euclidiennes de la classe 1 issue de la classification en 7 classes de Marseille.....	241

Carte 3-20 : Distances euclidiennes de la classe 4 issue de la classification en 7 classes de Marseille.....	242
Carte 3-21 : Distances euclidiennes de la classe 5 issue de la classification en 7 classes de Marseille.....	243
Carte 3-22 : Distances euclidiennes de la classe 7 issue de la classification en 7 classes de Marseille.....	244
Carte 3-23 : Classification en 6 classes du tissu urbain de Marseille.....	245
Carte 3-24 : Classification en 9 classes du tissu urbain de Marseille.....	246
Carte 4-1 : Présentation de la ville de Nantes	247
Carte 4-2 : Classification en 8 classes de Nantes.....	248
Carte 4-3 : Classification en 11 classes de Nantes.....	249
Carte 4-4 : Zones-tests définies pour chacune des classes de la classification en 9 classes du tissu urbain de Marseille (sauf les classes 3 et 9).....	250
Carte 4-5 : Superposition de la classification en 7 classes de Marseille et de la BDTopo pour le quartier St Jérôme.....	251
Carte 4-6 : Superposition de la classification en 9 classes du tissu urbain de Marseille et de la BDTopo pour le quartier St Jérôme.....	252
Carte 4-7 : Superposition de la classification en 6 classes du tissu urbain de Marseille et de la BDTopo pour le quartier St Jérôme.....	253
Carte 4-8 : Quartiers spécifiques utilisés pour la comparaison des résultats entre l'analyse de la BDTopo et celle des images SPOT.....	254
Carte 4-9 : Tissu urbain continu de CORINE Land Cover et la classe 1 de la classification en 6 classes du tissu urbain de Marseille.....	255
Carte 4-10 : Tissu urbain discontinu de CORINE Land Cover et les classes 2 et 5 de la classification en 6 classes du tissu urbain de Marseille.....	256
Carte 4-11 : Forêts et broussailles de CORINE Land Cover et la classe 3 de la classification en 6 classes du tissu urbain de Marseille.....	257
Carte 4-12 : Longueur de rugosité pour un vent de nord d'après le modèle de Bottema	258
Carte 4-13 : Longueur de rugosité pour un vent d'ouest d'après le modèle de Bottema	259
Carte 4-14 : Longueur de rugosité pour un vent de nord d'après le modèle de Raupach	260

Carte 4-15 : Longueur de rugosité pour un vent d'ouest d'après le modèle de Raupach	261
Carte 4-16 : Longueur de rugosité pour un vent de nord d'après le modèle de Macdonald	262
Carte 4-17 : Longueur de rugosité pour un vent d'ouest d'après le modèle de Macdonald	263
Carte 5-1 : Les capteurs du réseau Pigeon.....	264
Carte 5-2 : Les trajets parcourus par la voiture à travers Marseille (trajet 1 en rouge, trajet 2 en vert)	265
Carte 5-3 : Classification en six classes du tissu urbain et les 20 capteurs du réseau Pigeon	266
Carte 5-4 : Moyennes des températures mesurées par le réseau Pigeon (en fond, les bâtiments en gris clair, le numéro correspond au numéro du capteur)	267
Carte 5-5 : Moyennes de l'humidité mesurées par le réseau Pigeon (en fond, les bâtiments en gris clair, le numéro correspond au numéro du capteur).....	268
Carte 5-6 : Températures mesurées sur le trajet 1, parcouru le 26 juin	269
Carte 5-7 : Humidités mesurées sur le trajet 1, parcouru le 26 juin	270
Carte 5-8 : Températures mesurées sur le trajet 2 le 26 juin	271
Carte 5-9 : Humidités mesurées sur le circuit 2 le 26 juin.....	272
Carte 5-10 : Températures mesurées sur le circuit 2 le 5 juillet.....	273
Carte 5-11 : Humidités mesurées sur le trajet 2 le 5 juillet.....	274
Carte 5-12 : Résidus de la régression 1	275
Carte 5-13 : Résidus de la régression 2	276
Carte 5-14 : Résidus de la régression 3	277
Carte 5-15 : Résidus de la régression 4	279
Carte 5-16 : Résidus de la régression 5	280
Carte 5-17 : Les différents vols réalisés sur Marseille.....	280
Carte 5-18 : Les températures de surface du centre-ville 1 (a), du centre-ville 2 (b), de St Barnabé 1 (c), de St Barnabé 2 (d) et de La Rose (e)	281

Introduction

Accordant peu d'attention à la ville, les premiers géographes se sont principalement intéressés à la découverte de nouveaux espaces. Fin XIX^{ième} - début XX^{ième}, le thème de la ville est pourtant abordé et traité par des géographes reconnus comme Paul Vidal de La Blache, Friedrich Ratzel ou encore Elisée Reclus. Le « gouffre de l'humanité », selon Rousseau, est devenu aujourd'hui l'objet d'étude d'une branche à part entière du vieux tronc de la géographie, avec l'apparition de la géographie urbaine. Étudier une ville requiert une approche pluridisciplinaire qui pourrait aboutir à la convergence des sciences douces –les sciences sociales– et des sciences dites dures (Wackermann, 2000). En effet, la ville peut se diviser en deux parties. Pour reprendre la terminologie romaine, on peut distinguer l'*urbs*, c'est-à-dire le territoire physique de la ville, de la *civitas*, la communauté de citoyens qui l'habite. La géographie urbaine a peut-être, alors, le mérite d'appartenir à la fois à la géographie humaine et à la géographie physique car elle a pour objet d'étude à la fois l'*urbs* et la *civitas*.

La ville est en effet un milieu complexe. Résultat d'une longue histoire, la ville désigne une agglomération de population, d'habitations et d'activités. La ville est un territoire particulier composé de différents quartiers où le temps et l'espace n'ont pas la même dimension qu'ailleurs (Roncayolo, 2001). Pour mesurer une distance, on ne parle pas en mètres mais en heures et minutes, le chemin le plus long pouvant être le plus rapide.

La géographie n'est bien sûr, pas la seule science à s'intéresser à cet objet : les sociologues, les économistes mais aussi les météorologues ou les physiciens contribuent également à l'étude des villes. En considérant la ville dans son environnement, sa présence purement « artificielle » à la surface de la terre entraîne des modifications des phénomènes et des systèmes « naturels ». Les interactions entre la ville et l'atmosphère notamment, sont étudiées depuis le XIX^{ième} siècle (Oke, 1982) à travers la différence de température entre la ville et la campagne environnante. Ce phénomène, appelé îlot de chaleur urbain, est depuis très étudié par les climatologues, les dynamiciens de l'atmosphère (Arnfield, 2003) mais aussi par les architectes soucieux du confort des habitations qu'ils conçoivent.

Les principales modifications des conditions atmosphériques induites par une ville sont radiatives et aérodynamiques. La surface étant modifiée, les échanges de chaleur le sont également (Oke, 1987a) et la présence de surfaces verticales et de structures volumétriques supplémentaires influence l'écoulement des flux d'air dans l'atmosphère. La ville possède alors son propre climat. Des études scientifiques ont montré qu'il existait un lien entre la morphologie de la ville et les caractéristiques du climat urbain (Eliasson, 1990-1991, 1994a, 1996).

Afin de modéliser ces interactions, il est nécessaire de connaître de manière détaillée le tissu de la ville, c'est-à-dire les éléments qui le composent et leur organisation dans l'espace. Ces simulations sont réalisées à plusieurs échelles. Dans les modèles à méso-échelle, la ville est souvent décrite par une série de paramètres moyens qui ne tiennent pas compte de la variabilité spatiale du tissu urbain, la taille des mailles étant souvent trop importante pour distinguer un centre-ville d'une banlieue. A une échelle plus fine, appelée sub-méso, la ville peut être découpée en quartiers distincts les uns des autres car la taille des mailles est kilométrique voire de quelques centaines de mètres. C'est pourquoi, il est aujourd'hui nécessaire de développer des approches et des méthodes qui permettent de connaître avec plus de précision le milieu urbain. Il est essentiel d'une part d'améliorer la résolution à laquelle sont fournies les informations en entrée des modèles atmosphériques et d'autre part de prendre en compte la variabilité spatiale d'une ville.

L'objectif de cette étude est toutefois géographique : il ne s'agit pas d'étudier l'influence de la ville sur les conditions atmosphériques mais de réaliser un travail préliminaire à cette approche, en développant notamment une méthode qui permette de définir et de délimiter dans une ville européenne des quartiers dont les caractéristiques physiques (morphologie des bâtiments et modes d'occupation des sols) pourront avoir différentes influences sur le climat urbain.

Marseille est la ville-test de cette étude. Elle a été choisie dans le cadre du programme ESCOMPTE (Expérience sur Site pour COntreindre les Modèles de Pollution atmosphérique et de Transport d'Émission) pour abriter une vaste campagne de mesure. Des mesures ont été réalisées pendant 6 semaines de l'été 2001 sur une zone autour d'Aix, Marseille, l'Étang de Berre et le sud du Vaucluse. Ce site a été choisi en raison des fréquences élevées des épisodes de pollution photochimique, du fait notamment des émissions de la zone industrielle de l'Étang de Berre et de la ville de Marseille. Les spécificités géographiques et climatiques du site sont également à l'origine de la pollution atmosphérique de la région.

Cette campagne avait pour objectif d'élaborer une base de données tridimensionnelle des émissions de polluants primaires (O_3 , NO_x , CO, ...), de la composition et de la dynamique de l'atmosphère lors d'épisode de pollution atmosphérique. Cette base de données sert à valider les résultats des modèles de pollution urbaine mais elle permet également d'améliorer les connaissances des processus chimiques et dynamiques qui sont à prendre en compte lors des épisodes de pollution (Mestayer & Durand, 2002). Le programme CLU (Couche Limite Urbaine) est associé à cette campagne de mesure. Il a pour objectif de décrire la couche limite urbaine de Marseille à la fois en terme de bilan d'énergie de surface et en terme de structure de la couche limite urbaine. Plusieurs modèles de sol sont évalués comme LUMPS (Grimmond & Oke, 2002), TEB (Masson, 2000) et SM2-U (Dupont *et al.*, 2000) dans la paramétrisation des interactions thermodynamiques sol – canopée urbaine – atmosphère. Des modèles de simulation de la couche limite urbaine sont également testés comme Meso-NH (Lafore *et al.*, 1998), RAMS (Pielke *et al.*, 1992) et SUBMESO (Anquetin *et al.*, 1998).

Les caractéristiques de la canopée urbaine sont connues grâce aux nombreuses mesures qui ont été réalisées pendant cette campagne. Il s'agit alors, dans la démarche logique de ce programme de recherche, de comprendre dans un premier temps les différents phénomènes et processus météorologiques qui se sont produits et dans un second temps de les reproduire par des modèles. Pour cela, une connaissance à fine résolution de la ville est nécessaire.

Beaucoup d'études de l'espace urbain ont été réalisées par des géographes mais peu dans le but d'étudier l'influence de la ville sur la météorologie et l'aérodynamique locale. Un aspect fondamental du tissu urbain est l'existence d'une structure. Cette structure peut être étudiée par une analyse fractale qui permet de mettre en évidence le développement spatial des agglomérations urbaines comme l'ont montré les travaux de Longley (Longley & Mesev, 2002). D'autres scientifiques comme François *et al.* (1995) utilisent cet outil pour étudier le tissu urbain et sa dynamique. La dimension fractale met en évidence des phénomènes d'ordre dans l'organisation spatiale des villes et des types d'organisation à différentes échelles. Cette méthode permet également d'analyser l'urbanisation d'une ville, phénomène souvent accompagné d'une structuration de l'espace. Groleau & Woloszyn (2000) utilisent également la géométrie fractale pour analyser les structures urbaines. Une organisation de l'espace urbain est certes mise en évidence avec l'outil fractal mais il ne permet pas d'obtenir les caractéristiques nécessaires pour réaliser des simulations atmosphériques.

D'autres méthodes consistent à définir des variables descriptives qui permettent ensuite de caractériser des zones urbaines. Weber (2001) propose tout

d'abord une classification des types de rues selon les types de carrefours, la disposition des bâtiments, la continuité des façades, le rapport hauteur des bâtiments sur largeur des rues,... puis une qualification des sites de mesure est présentée à partir de données morphologiques et des modes d'occupation des sols (MOS). Ces données sont calculées à partir de la base de données topographiques de l'IGN. Ces classifications sont réalisées pour établir une relation directe entre la concentration des polluants dans les rues et les formes urbaines. Ratti *et al.* (2001) ont également élaboré une base de données tridimensionnelle afin d'analyser l'influence de la ville sur la dispersion des polluants. Ils utilisent des données décrivant la morphologie des bâtiments, la surface bâtie, le *sky-view factor* (ce facteur représente la part du ciel qui est vue à partir du sol, entre les bâtiments) et des paramètres aérodynamiques pour définir des villes américaines et européennes.

Des classifications du tissu urbain plus complètes et détaillées sont également proposées pour réaliser des simulations atmosphériques en milieu urbain. Cianco & Ellefsen (1998) proposent une classification du tissu urbain pour un modèle météorologique. Pour réaliser cette classification, ils utilisent des variables donnant des informations sur l'occupation du sol, la morphologie et l'orientation des bâtiments et la réflectivité des surfaces. Ces informations sont calculées empiriquement à partir de cartes, de photos satellites ou aériennes et de photos prises au niveau des rues. Plusieurs types de terrains urbains sont ainsi mis en évidence. Theurer (1999) suggère également une classification du tissu urbain pour étudier l'influence des bâtiments sur la concentration des polluants. Il identifie chaque quartier à partir de variables décrivant la morphologie des bâtiments, leur répartition dans l'espace et l'occupation du sol. Il identifie ainsi plusieurs types d'habitat urbain et des zones de végétation. Enfin, Pauleit & Duhme (2000) proposent une classification du tissu urbain de Munich pour un tout autre objectif : améliorer la gestion du développement urbain. Cette classification est réalisée à partir des MOS, définis d'après des photos aériennes. Ils définissent 24 unités de MOS afin de mieux prévoir les stratégies de développement urbain et leur conséquences.

Pour les villes américaines, il existe une base de données (gratuite), de l'USGS (US Geological Survey) qui couvre l'ensemble des USA avec une résolution de 200 m. Cette base de données suit le schéma de classification d'Anderson *et al.* (1976) où sept catégories de MOS sont définies au niveau II de la classification : il s'agit des zones urbaines ou construites, des zones agricoles, des zones de grands pâturages, des zones forestières, des surfaces d'eau, des zones humides, des zones arides, des zones de toundra et enfin des zones de neige ou de glace éternelle. Il n'existe pas de telles bases de données pour la France.

Ces études présentent des approches diverses et variées de l'analyse de l'espace urbain. Chaque classification est réalisée selon un objectif précis à partir de paramètres jugés discriminatifs. La plupart de ces analyses sont le résultat d'un travail, souvent manuel, de construction d'une base de données formées à partir de plusieurs sources d'information, puis d'analyse du tissu urbain pour délimiter des quartiers. L'objectif de la présente étude est de proposer une méthode automatique, simple et rapide à mettre en œuvre, pour classer les différents quartiers d'une ville, d'un point de vue atmosphérique et climatologique.

Cette thèse se divise en cinq chapitres. Le premier chapitre peut apparaître hétérogène mais plusieurs thématiques doivent être abordées afin de définir clairement la problématique de cette étude. La ville européenne est tout d'abord présentée à travers son histoire, son développement, sa structure et sa population. La ville est présentée comme un espace complexe et pluridimensionnel, résultat concret des différents choix politiques effectués au cours de ce dernier siècle. Marseille est ensuite présentée comme une ville spécifique méditerranéenne. Afin d'étudier les villes, plusieurs sources d'informations sont disponibles, sous forme de bases de données déjà existantes ou à partir de sources qui demandent des traitements préliminaires pour calculer une information précise, comme les images satellites par exemple. Enfin, ce chapitre se termine par une présentation du climat urbain ; ses principales caractéristiques et ses facteurs d'influence sont abordés ici avec pour objectif de mettre en évidence les relations « théoriques » entre la structure de la ville et les processus radiatifs et thermodynamiques responsables de son climat particulier.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des données et des outils utilisés pour réaliser cette étude. La BDTopo est la base de données retenue car elle comporte à la fois des informations sur la morphologie des bâtiments et sur les MOS. Une présentation de ces différentes informations est proposée au début du second chapitre. Un logiciel a été développé, en partie pendant cette thèse, pour traiter les informations contenues dans la BDTopo et les transposer sur une grille, format adapté à la réalisation des simulations numériques. Le logiciel DFMap est tout d'abord présenté à travers les fonctions de calcul disponibles puis il est validé. La question de la taille de la maille, question essentielle lorsqu'il s'agit de « résumer » une information sur une grille, est abordée à la fin de ce chapitre. Le choix proposé s'appuie sur des calculs statistiques mais dépend également du temps de calcul (plus on diminue la taille de la maille, plus le temps de calcul augmente) et de l'utilisation qui pourra être faite des résultats (la résolution minimale requise pour les simulations numériques, par exemple).

Les résultats de DFMap permettent la création d'une nouvelle base de données comportant des informations sur la morphologie des bâtiments et les MOS. Des paramètres aérodynamiques sont également calculés. Une analyse du tissu urbain de Marseille est alors présentée dans le chapitre 3, qui permet de mettre en évidence l'existence de différentes structures dans le tissu urbain de la ville. Plusieurs méthodes statistiques sont alors proposées afin de délimiter et définir différentes zones homogènes. Ce chapitre comporte plusieurs résultats de classifications de Marseille mettant en évidence des quartiers plus ou moins homogènes selon le nombre de classes choisi.

La méthodologie développée dans le chapitre 3 est validée au chapitre 4 en l'appliquant à une autre ville : Nantes. Les résultats obtenus pour les classifications de Marseille sont également validés dans ce chapitre sur la base d'autres sources d'informations géographiques. Quelques améliorations sont alors proposées pour améliorer l'estimation des MOS à partir de la BDTopo. Des quartiers urbains sont donc définis à partir de la morphologie des bâtiments et des MOS ; une caractéristique aérodynamique est également donnée à chacun des quartiers, précisant ainsi leur influence sur la climatologie urbaine.

Enfin, le chapitre 5 présente une application de ces résultats. Les relations entre les caractéristiques morphologiques et surfaciques des quartiers, d'une part, et des mesures de température et d'humidité de l'air, d'autre part, sont analysées dans un premier temps. Des températures de brillance mesurées dans l'infrarouge thermique sont utilisées dans un second temps. Ces données sont plus précises que les mesures météorologiques analysées précédemment, dans le sens où une surface importante est documentée par ces mesures aéroportées. Des relations entre les températures de brillance et les structures des quartiers sont alors mises en relief.

Chapitre 1: La ville

Diverses représentations de la ville sont possibles, selon l'échelle d'observation. La ville est souvent représentée sur une carte à petite échelle, par un signe ponctuel tel qu'un point. A une échelle plus fine, elle peut être représentée par une tâche de forme tentaculaire, entrecoupée de lignes diverses correspondant généralement aux principaux axes de circulation. De la même manière, une ville peut être décrite comme un espace doté d'une certaine unité ou au contraire comme une zone hétérogène, selon qu'on la considère comme un élément d'une armature urbaine (échelle régionale ou nationale) ou que la ville soit analysée en tant que telle, vue de l'intérieur, pouvant alors apparaître diversifiée (échelle plus fine).

Ce premier chapitre propose tout d'abord une présentation de la ville, son histoire, afin de comprendre comment les villes européennes se sont formées, ce qui permet de mieux comprendre leur structure. Des définitions de termes propres au milieu urbain sont précisées dans cette première partie. La ville de Marseille est ensuite présentée comme une ville particulière de la région méditerranéenne. Sa position en bord de mer et son entourage de massifs de collines sont ses principales caractéristiques. Pour analyser plus finement son tissu urbain, plusieurs bases de données sont disponibles, fournissant des informations sur la morphologie des bâtiments ou les MOS (Modes d'Occupation des Sols). Enfin, les principales caractéristiques du climat de la ville sont présentées ainsi que les différents processus provoquant la formation d'un climat spécifique au milieu urbain.

1.1 Caractéristiques d'une ville européenne : héritages historiques, morphologie urbaine et aménagement

1.1.1 Développement des villes au cours des deux derniers siècles

Les villes anciennes se sont souvent implantées sur des sites jugés stratégiques à l'époque comme le long d'un fleuve, dans une plaine proche de la mer, à un carrefour. Ces villes se sont constituées autour d'un centre devenu historique, protégé par des fortifications. Au XVIII^{ème} siècle, des quartiers s'agrégent au-delà des remparts, « les faubourgs », mais ils font partie intégrante de la ville (Paulet,

2000). Enfin autour de la ville s'étend « la banlieue », c'est-à-dire la zone rurale sous la direction de la ville. Un tournant majeur se produit lors de la Révolution industrielle. Les industries s'implantent en ville et celle-ci finit par éclater, faute de place ; les banlieues s'étendent de manière plus ou moins anarchique avec une interpénétration du monde rural et du monde urbain. L'extension urbaine se poursuit et s'amplifie après la seconde guerre mondiale (exode rural, augmentation de la population, ...). Elle se traduit par un morcellement de l'espace, causé par la construction de lotissements où les formes des parcelles sont de plus en plus géométriques, par une multiplication des constructions en hauteur, une extension de la voirie, la création de centres commerciaux accompagnés de surfaces de parkings importantes, une augmentation des densités bâties qui se fait de manière progressive (Bastie & Dézert, 1991).

1.1.2 Les éléments d'une ville

A une échelle plus fine, la ville, comme chacun de ses quartiers, est constituée d'éléments que l'on peut séparer en deux catégories : le bâti et le non bâti. Le bâti rassemble les immeubles d'habitations et autres structures abritant une activité quelconque comme un commerce, une industrie, une pratique religieuse, ... En ce qui concerne l'habitat, on en retrouve plusieurs types, plus ou moins marqués par les traditions locales : on distingue l'habitat individuel de l'habitat collectif. L'habitat individuel est regroupé dans des quartiers où la densité bâtie et la régularité du plan sont variables. L'habitat collectif désigne les immeubles divisés en plusieurs logements. Il se compose d'une grande variété de formes et de dimensions.

En dehors des constructions, la ville est formée de surfaces aménagées comme, entre autres, la voirie, les espaces verts, les cimetières, les stades. Ce sont des infrastructures qui contribuent à l'organisation structurelle d'une ville. La **voirie urbaine** désigne l'ensemble des voies de communication routières comprises à l'intérieur d'un espace urbain. Elle se subdivise en rues et en places. Les rues ont des caractères physiques qui peuvent dépendre du relief (pente, rectiligne, tortueux).

En opposition au béton et à l'asphalte, les espaces verts sont constitués par les jardins publics, les parcs, les bois mais aussi par les terrains de jeux, les bases de plein air, les cimetières, les campings, c'est-à-dire par des espaces où la densité bâtie est faible voire nulle. Leur étendue est très variable selon les villes mais donne dans tous les cas une certaine qualité au cadre de vie. Ils constituent le plus souvent de petites taches au milieu du tissu urbain.

Enfin, des surfaces mal définissables sont recensées dans les villes comme les friches, les terrains vagues, les zones ferroviaires ; elles sont souvent éparpillées dans la ville mais peuvent représenter des surfaces non-négligeables.

La voirie, les constructions, les espaces verts et autres aménagements sont indissociables et forment ce que l'on nomme le **tissu urbain**. Ce terme est une métaphore faisant référence au tissage et à la biologie ; le tissu de la ville résulte de l'imbrication de trois niveaux : le réseau des voies, le parcellaire et les constructions (Dorier-Apprill, 2001). Il est ni continu ni homogène sur l'ensemble d'une ville. D'après Caniggia & Maffei (1979, Laroche (2000)), le tissu urbain est « le concept de la coexistence de plusieurs édifices, présent à l'esprit de celui qui construit, antérieurement à l'acte de construire, au niveau de la conscience spontanée, comme une conséquence civile de l'expérience d'assemblage des édifices, un concept synthétique de tous les aspects qui concernent leur assemblage ». Une multitude de types de tissus urbains peut être identifiée à l'intérieur de chaque ville et entre les villes. La plupart du temps, les différents tissus correspondent à une part de l'histoire de la ville.

1.1.3 Plan et structure des villes

La structure urbaine a ainsi fortement évolué au cours de ces deux derniers siècles. Le plan d'origine de la ville européenne est le plus souvent radioconcentrique jusqu'à la révolution industrielle. Il reste visible dans les quartiers historiques des villes anciennes. Cependant, il a pu subir des modifications à certaines époques comme les grandes percées réalisées par Haussmann mais il est difficile de remettre en question de manière radicale le plan antérieur (sauf s'il se produit une destruction massive de la ville, provoquée par un phénomène naturel ou une guerre). En dehors des quartiers centraux, la trame urbaine est très irrégulière, aucune forme géométrique n'est reconnaissable ou prédominante. Le plan n'est plus homogène mais se constitue d'une imbrication de différents plans dont la forme varie, le plus souvent selon l'époque de la construction du quartier. Les principaux plans des grandes villes sont des plans radioconcentriques ou semi-radioconcentriques, des plans orthogonaux avec de grands axes de circulation qui se coupent perpendiculairement (trame en damier), ou des plans en éventail ou en étoile.

1.1.4 Les différents quartiers d'une ville

Avec l'extension urbaine, il est difficile d'établir une limite franche entre la ville et la campagne car de nos jours, les deux sont imbriquées l'une dans l'autre. Mais il

n'est pas non plus aisé de diviser l'espace urbain. Le plus souvent, il est subdivisé en éléments de tailles différentes : le centre-ville, le péricentre et la banlieue que l'on peut identifier comme des quartiers ou constituée de plusieurs quartiers (Laborde, 1995). Un **quartier** est alors un fragment de l'espace urbain auquel on reconnaît une certaine individualité (Paulet, 2000).

Le **centre-ville** est souvent le quartier le plus actif de la ville en ne recouvrant qu'une faible partie de la surface urbanisée. Il se caractérise par le style architectural particulier de ses immeubles et l'aspect monumental de ses édifices. Le centre-ville ne correspond pas toujours au centre historique de la ville et encore moins à son centre géométrique.

Le **péricentre** est la portion de la ville qui entoure le centre ; c'est une zone intermédiaire entre le centre et la banlieue. Sa structure est hétérogène car les constructions n'ont pas été édifiées à la même époque. On y retrouve à la fois des quartiers de classes aisées, des quartiers de classes moyennes et des quartiers populaires, du côté des gares et des usines ou entrepôts. Ce sont des zones mixtes où se mêlent habitats et industries.

Enfin, la **banlieue** est la zone de transition entre la ville et la campagne. Elle a été un lieu de déversement urbain jusque dans les années 1970. Les banlieues peuvent être des espaces hétérogènes, formées le plus souvent sans plan, avec des constructions plus ou moins spontanées, au fur et à mesure que surgissent les besoins. Il y a eu plusieurs générations successives de banlieues sous forme d'auréoles ou de couronnes :

- la première couronne se caractérise par une urbanisation dense qui prolonge le centre sans trop de discontinuité.
- la deuxième couronne s'est construite dans les années 1950 à 1970 avec principalement des logements collectifs. La densité bâtie y est moindre.
- la troisième couronne correspond à la zone la plus éloignée où se mélange lieux d'habitations, espaces ruraux, pôles villageois ou bourgs. On la désigne également par le terme « d'entrée de la ville ».

Ce terme de banlieue suffit pour nommer les espaces périphériques des villes jusque dans les années 1970. Mais avec la prolifération des espaces dominés par la ville en termes de logements citadins, de migrations pendulaires et d'implantation de logements industriels, commerciaux ou administratifs, apparaît la notion de **périurbain**. Cette notion désigne, littéralement, tous les espaces situés autour de la ville. Ces espaces ne sont pas toujours densément bâtis et peuvent comporter des espaces ruraux et agricoles, mais leur activité, leur infrastructure, l'habitat, le mode de vie en font des espaces dépendants de la ville (Dorier-Apprill, 2001).

La ville combine tous ces espaces sur une même superficie qu'on pourrait définir comme un **espace urbain**. Un espace urbain est lié aux types d'occupation et d'utilisation des sols, donc des activités et fonctions urbaines qui sont non-agricoles. Il englobe tous les MOS liés à la ville ou à sa proximité, les espaces inconstructibles, les terrains vagues, les friches, les jardins, les parcs, ... (Bastié & Dézert, 1991)

1.1.5 La population urbaine

Durant le XX^{ième} siècle, alors que la population mondiale se multipliait par 4, la population urbaine se multipliait par 15. Les agglomérations de plus d'un million d'habitants sont passées de 16 à 280. Le XX^{ième} siècle aura produit en surface au moins 100 fois plus d'espace urbanisé qu'il n'en existait à ses débuts et plus encore en volume (Bastié & Dézert, 1991).

En France, d'après l'INSEE (Institut National de la Statistique et des Études Économiques), près de 76% de la population est urbaine. La définition traditionnelle de la ville par l'INSEE est un regroupement de 2000 habitants autour d'un chef-lieu de commune. Cette définition est progressivement améliorée et complexifiée. En 1999, pour le dernier recensement de la population, apparaît le terme d'« aire urbaine » qui représente un ensemble de communes d'un seul tenant et sans enclave, constitué d'un pôle urbain et d'une couronne périurbaine. Le pôle regroupe une ville centre et sa banlieue et offre au moins 5000 emplois. Une couronne urbaine se définit comme un ensemble de communes rurales ou unités urbaines, dont au moins 40% de la population résidente possèdent un emploi et travaillent dans le reste de l'aire urbaine. Ainsi d'après l'INSEE, 60.2% de la population française vit dans un pôle urbain, 12.6% dans une couronne urbaine, 3.6% dans des communes multipolarisées et 23.3% dans des communes à dominante rurale (Fabriès-Verfaillie & Stagiotti, 2000).

La ville ne se définit plus alors seulement en termes de concentration et de densité mais par une approche qui se veut plus systémique. Elle se définit par sa forme, sa taille, sa densité, son réseau, ses fonctions, ses dynamiques, ses zones d'influence et d'attraction. La dimension sociale et économique est prise en compte pour définir la ville.

1.1.6 Les politiques d'aménagement et d'urbanisme

La structure urbaine de la ville est d'abord un héritage du passé mais elle résulte également des divers choix de la société et plus précisément des choix politiques d'aménagement.

Face à l'accroissement de la population urbaine, l'État et les collectivités territoriales sont amenés à prendre une série de mesures afin de contrôler l'extension urbaine. Des documents d'urbanisme voient le jour afin de gérer les villes : le SDAU (Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme) et le POS (Plan d'Occupation des Sols). Ils sont aujourd'hui remplacés par le SCOT (Schéma de COhérence Territoriale), le PLU (Plan Local d'Urbanisme) et les cartes communales. Ces dernières deviennent le seul document d'urbanisme des communes rurales. Elles visent à délimiter les secteurs d'autorisation et d'interdiction des zones constructibles ainsi que les secteurs où les adaptations ou extensions de constructions existantes peuvent être autorisées ou non.

En parallèle, sont menées des politiques d'urbanisme, c'est-à-dire de gestion de l'espace bâti. Dans les centres des grandes villes, les quartiers se dégradent, se paupérisent puis se vident. Dès les années 1950, des opérations de rénovations (c'est-à-dire de destruction des immeubles et de reconstruction soit d'un autre immeuble neuf, soit d'une zone quelconque d'aménagement) sont menées jusqu'en 1962 où la loi Malraux va limiter ces opérations. Cette loi permet la création de secteurs sauvegardés pour protéger le patrimoine historique et architectural. Des opérations de réhabilitation (c'est-à-dire où les immeubles sont restaurés en conservant leur style d'origine) sont alors engagées mais elles sont longues, d'un point de vue administratif, et coûteuses aux propriétaires malgré les aides données par l'état (Fabriès-Verfaillie & Stagiotti, 2000).

Les années 1960 voient également la construction de grands ensembles, destinés à répondre à la pénurie de logements. Ces immeubles sont rejetés en périphérie où ils forment des îlots à l'écart des organismes anciens.

A la fin des années 1970, des opérations de réhabilitation des HLM (Habitations à Loyer Modéré) sont mises en place car ces grands ensembles se sont très vite dégradés. Les années 1975 voient un tournant majeur : la prise de conscience d'un droit à un logement de qualité apparaît. Le quantitatif n'est plus d'actualité. Les immeubles sont alors limités en taille et en nombre de logements. On assiste alors à une explosion pavillonnaire, rendue possible par la construction « industrielle » de maisons. L'habitat individuel (c'est-à-dire un immeuble avec un seul logement) se multiplie en périphérie sous forme de hameaux modernes avec des espaces verts collectifs et des petits centres commerciaux. On assiste à une uniformisation de l'habitat (Paulet, 2000).

La ville n'est pas seulement une agglomération de constructions, c'est aussi un espace vivant animé par l'activité des hommes. Comme disait P. Vidal de la Blache dans *Tableaux géographiques de la France* (1905), les villes sont « figées dans leur

passé » mais la « sève urbaine n'est pas éteinte. Elle est dans l'histoire et dans le sang des habitants ». Sa dimension socio-économique et politique, son environnement, son histoire sont autant de facteurs qui rendent chaque ville unique. Le cas de Marseille, cité méditerranéenne, est présenté ci-dessous.

1.2 Marseille : la particularité d'une ville portuaire méditerranéenne

Marseille est une ville portuaire du sud-est de la France, qui s'étend sur 23000 hectares dont 787 sont des surfaces agricoles et 2000 des forêts. La commune est composée de 16 arrondissements (carte 1-1), subdivisés en 111 quartiers. Marseille est le premier port de la Méditerranée, le premier port de plaisance et le deuxième aéroport (Marignane) de France pour le fret (Chambre de commerce). En s'ouvrant sur la mer par 2.6 km de front de mer, elle compte également 10 hectares de surface de plages et 26 hectares d'espaces verts.

1.2.1 Situation topographique

Marseille s'est développée dans un contexte environnemental particulier (carte 1-2). La ville est limitée au sud par le Massif de Marseilleveyre qui plonge ensuite dans la mer ; au sud-sud-est on retrouve les Monts de la Gineste, le Mont Carpiagne et le Mont St Cyr et enfin au nord-est se trouve la chaîne de l'Étoile. Tous ces massifs sont des obstacles à l'expansion urbaine. Seuls la vallée de l'Huveaune et le col entre le massif de l'Étoile et celui de l'Estaque sont des percées, permettant à la ville de s'étendre respectivement à l'Est en direction d'Aubagne et au Nord en direction de Vitrolles, Marignane, Aix-en-Provence (Laborde, 1995). Sa façade ouest est bordée par la Méditerranée.

1.2.2 Évolution politico-historique et urbanistique de Marseille

Marseille est une cité vieille de 2600 ans. Elle regroupe aujourd'hui près de 800000 habitants, mais sa population ne cesse de diminuer malgré le nombre des naissances qui augmente depuis 20 ans (INSEE, 1999). Marseille a perdu environ 10000 habitants par an pendant 10 ans entre 1980 et 1990 (Paulet, 2000). Les familles les plus favorisées sont allées s'installer dans les quartiers sud de la ville ou vers les calanques de Cassis. Le quartier Belsunce (carte 1-3) a pu enregistrer jusqu'à 45% de logements inoccupés.

Marseille est une ville découpée, conséquence de son histoire. Tout d'abord, il existe une coupure entre le port et la ville qui est la conséquence de la construction

du bassin de la Joliette. Au XIX^{ième} siècle, la ville bourgeoise s'est construite le plus loin possible du port avec des immeubles tournés vers la campagne et non vers la mer. Au contraire, le port représentant une source d'emploi, un habitat populaire se développe à proximité et se retrouve coupé du reste de la ville. Jusqu'à la seconde guerre mondiale, cet habitat sera plus ou moins insalubre.

Marseille se définit également par une multipolarisation des activités industrielles. Trois zones sont identifiables :

- au nord-ouest, le Bassin de Séon (village de l'Estaque) qui était une des plus importantes réserves d'argile ;
- à l'est : la vallée de l'Huveaune en essor dès le début du XX^{ième} siècle, qui voit se développer de nombreuses industries attirées par les facilités d'accès pour l'approvisionnement et la disponibilité des terrains ;
- le centre élargi de Marseille où se trouvait la savonnerie marseillaise, la raffinerie de sucre, la manufacture de tabac ...

Cependant, en plus de cette division par secteurs, il y avait une division logique de développement avec l'espace industriel portuaire, spécifique à quatre arrondissements (II, XIV, XV, XVI) et un espace industriel non traditionnel concentré sur trois arrondissements (IX, X, XI) (carte 1-1). La jonction entre ces différents espaces industriels a été un problème urbain permanent que l'on retrouve dans les documents d'urbanisme depuis les années 1930.

La ville de Marseille ne possède pas un centre mais une double centralité autour du Vieux Port, qui date de Louis XIV, avec au sud la bourgeoisie, et au nord la centralité populaire. Haussmann va tenter de créer une nouvelle centralité : le percement de la rue Impériale, devenue la rue de la République, avait pour objectif de relier ces deux quartiers, mais ce sera un échec.

Compte tenu de la poussée démographique, de l'espace disponible autour de Marseille, l'habitat va se disperser avec la création d'entreprises près des noyaux villageois environnants. Les logements sont construits, sans autorisation et sans confort, et le réseau d'assainissement ne suit pas. Il faudra attendre la poussée démographique de l'après-guerre pour que l'espace urbain se densifie et que la mise en place du réseau d'assainissement soit envisagée. Avec le tournant de l'après-guerre, coïncidant avec l'arrivée de Gaston Defferre à la municipalité, la demande de logements est enfin satisfaite ; elle ne l'était plus depuis 50 ans. De 1954 à 1961, près de 70000 logements ont été construits alors que de 1945 à 1954 seulement 9700 logements avaient été mis sur le marché (Morel, 1999). Ces aménagements ne portent que sur le centre-ville et les quartiers résidentiels (VIII et IX^{ième} arrondissements) ; les quartiers populaires sont délaissés avec seulement 1270

logements créés dans les XIII, XIV, XV et XVI^{ème} arrondissements. Deux grands ensembles sont créés à S^{te} Marthe et S^{te} Marguerite (carte 1-3). Cependant ces constructions ne sont pas planifiées, sont réalisées selon les opportunités et les lois du marché. Le secteur privé s'empare de ce marché ce qui explique la faible part de logements sociaux.

A la même époque sont entreprises de grandes opérations d'infrastructure :

- construction de la rocade recouvrant le cours d'eau Le Jarret ;
- élargissement de la promenade de la Corniche ;
- zone de logements dense dans le quartier des Cinq Avenues, La Blancarde et Le Camas ;
- densification du logement dans le quartier du Pharo, S^t Lambert, S^t Victor ;
- réseau d'adduction d'eau et réseau d'égout dans les zones de construction privilégiées (S^{te} Marguerite, Bonneveine, La Rose, Montolivet).

Les politiques d'urbanisme sont alors définies par les besoins du moment et surtout par la situation financière de la municipalité.

Dans les années 1970, émerge une nouvelle politique pour essayer de revaloriser le centre-ville : le projet Centre Bourse voit le jour. Il prévoit la création d'un centre de direction et des logements neufs destinés à une population aisée. Mais seuls quelques immeubles et le centre commercial seront créés.

A la fin des années 1970 - début 1980, des opérations de rénovation et de réhabilitation sont lancées dans le centre-ville. Des Opérations Programmées d'Amélioration de l'Habitat (OPAH) sont planifiées et concernent le nord du quartier Belsunce, le quartier autour de la Cannebière et le quartier du Panier qui est le seul à conserver des rues et une architecture médiévales.

Actuellement, plusieurs Grands Projets Urbains (GPU) sont en cours à Marseille. Le projet Euroméditerranée porte sur l'aménagement d'une surface de près de 300 hectares, comprise entre La Joliette et le Port Autonome de Marseille (PAM), la Porte d'Aix et la Gare St Charles pour des activités de service tournées vers l'international, entre autres. Cette opération reconnue d'intérêt national par l'État doit restaurer non seulement des fonctions économiques et sociales mais aussi un cadre de vie fonctionnel et harmonieux pour les habitants du quartier. D'autres grands projets d'aménagement sont également en cours comme la plate-forme technologique de Château Gombert, la plate-forme Littoral Nord (habitat et activités) et l'Opération Marseille Sud avec le plan Université 2000 et le parc scientifique de Luminy.

A l'issu de ces aménagements et de l'évolution urbaine récente, Marseille se compose de cinq villes (Morel, 1999) :

- le centre urbain qui se concentre sur les I, V et VI^{èmes} arrondissements ;
- la ville du sud, dédoublement du centre traditionnel sur les VII, VIII et IX^{èmes} arrondissements ;
- la ville du Port avec les II, III, XIV, XV et XVI^{èmes} arrondissements ;
- la ville périphérique qui correspond aux X et XI^{èmes} arrondissements ;
- et la ville diffuse sur les IV, XII et XIII^{èmes} arrondissements.

1.2.3 Évolution de l'habitat typique marseillais

La ville de Marseille s'est ainsi développée au carrefour entre la mer et la montagne et sa principale fonction était alors le commerce maritime. Cette fonction est encore très présente dans l'activité de la ville. Son centre-ville historique est constitué d'immeubles appelés « trois fenêtres » : c'est un immeuble d'habitation particulier à la localité (Bonillo *et al.*, 1988). Lors de sa diffusion massive entre la fin du XVII^{ième} et le début du XX^{ième} siècle, il passe d'une forme géométrique généralement irrégulière à des formes strictement orthogonales. Les dimensions se stabilisent également avec une largeur voisine de 7 m.

A l'aube du XVIII^{ième} siècle, apparaissent également les domaines. Ce terme désigne à Marseille des immeubles volumineux composés d'un module de stockage, d'organes de distribution interne et d'une cour de dimensions variables. Ils se concentrent majoritairement sur la rive sud du Vieux Port mais au début du XX^{ième} siècle, les premiers domaines apparaissent dans des zones fraîchement conquises par la croissance urbaine (près de la Porte d'Aix, près de la Place du Pentagone, près de la Porte de Rome et près de la Place Castellane) et éloignées du secteur de Rive Neuve. Mais en 1864 est édifié le complexe des docks de Marseille et les domaines commencent alors à décliner. Et ce n'est qu'après les deux guerres mondiales que les domaines vont être reconvertis en lieux d'habitation.

Enfin, le centre-ville va également être marqué par la construction d'immeubles haussmanniens, la percée d'une partie du cours Lieutaud et le prolongement de la Cannebière et la rue de la République. Ces immeubles sont constitués de quatre étages surmontés d'un attique et sont riverains des grandes voies de communication. Ils forment une famille unitaire avec des façades élevées et régulières, marquées par des bandereaux d'étages, des corniches et des balcons. Ce type d'immeuble va marquer la fin du « trois fenêtres » et fera référence à l'aristocratie parisienne.

Autour du centre-ville, se greffent, selon les époques, de nouvelles constructions. Ainsi, dans la deuxième moitié du XIX^{ième} siècle des lotissements apparaissent en périphérie, s'additionnant au réseau rural existant ; ce sont les quartiers du Chave, du Rouet et du Puget entre autres (carte 1-3). Vient également se rajouter dans les zones industrielles un type d'habitat ouvrier particulier. Il se compose d'alignement de petits logements mitoyens, disposés autour d'une cour ou le long d'un court chemin. Ils sont majoritairement d'un étage, parfois deux. Leur concentration la plus importante se trouve dans les quartiers nord de Marseille. Ces maisons ont connu depuis trois sortes d'évolution : la démolition, le simple maintien ou l'adaptation. Dans les années 1950, un certain nombre d'entre elles a été détruit et remplacé par des immeubles-barres.

Il reste également deux autres types d'habitat dans la périphérie marseillaise. Tout d'abord, la bastide qui apparaît dès le XVI^{ième} siècle. Elle se traduit par un investissement des capitaux urbains à la campagne. Elle est constituée de la demeure du maître, orientée au sud avec deux ou trois étages et parfois un étage surbaissé, des bâtiments fermiers et des terres agricoles dont la taille varie entre moins d'un hectare et 50 hectares. Les bastides deviennent rapidement des résidences secondaires et dès la fin du XVIII^{ième} siècle des résidences principales. Cette tendance s'accroît jusqu'au XIX^{ième} siècle à partir duquel la fonction productrice du domaine disparaît. La bastide devient alors une villa périurbaine. Ces bastides assurent la jointure entre l'espace urbain et l'espace rural et constituent ainsi le territoire marseillais. Mais lors d'action spéculative, les bastides sont remplacées par des lotissements (quartier Chave, Longchamp et Baille). Les bastides sont maintenant protégées, il en reste 273 dont la démolition peut être interdite (AGAM, 1992).

Le deuxième habitat typique de Marseille est le cabanon. En 1850, lors d'implantations industrielles, apparaît un logement ouvrier en bande avec une pièce au rez-de-chaussée et une soupenne. Lors de la désindustrialisation, ces logements sont reconvertis pour un usage populaire. Ils deviennent alors un espace privilégié de la sortie du dimanche, faisant le pendant aux bourgeois se rendant dans leur bastide. Mais comme ces dernières, ils laissent place à l'urbanisation. Au XX^{ième} siècle, l'implantation des cabanons, vus comme un espace de loisirs dans un espace sauvage, se fait dans les calanques, en couronne autour de noyaux villageois, le long des voies de communications ou en lotissements continus ou discontinus.

La ville de Marseille a été fortement marquée dans sa structure urbaine par son histoire. Aujourd'hui encore son architecture est réglementée par le POS / PLU : par exemple, dans le POS de 1992, il est noté qu'en centre-ville, les bâtiments ne doivent

pas dépasser 22 m et 7 niveaux ; en zone périphérique cette hauteur est limitée à 10 m et 3 niveaux, surtout pour les constructions à vocation d'habitat. D'autres mesures sont également prises pour les toitures. Le POS de Marseille a été révisé en décembre 2000 et reste à ce jour le document qui fixe les règles d'urbanisme.

1.3 Les bases de données urbaines et autres sources d'information

Marseille, comme les autres villes européennes, a une structure complexe. Étudier et définir les caractéristiques d'une ville nécessite donc l'acquisition d'un certain nombre de renseignements. Plusieurs sources d'informations sont disponibles et peuvent être utilisées. Il s'agit de bases de données comme CORINE Land Cover, la Base de Données Topographiques (BDTopo), des Systèmes d'Information Géographiques Urbains (SIG-U), ou de sources d'information qui nécessitent un traitement et une interprétation comme les photos aériennes ou les images satellites (SPOT, IKONOS, ...).

1.3.1 Les bases de données vectorielles de l'IGN

L'IGN (Institut Géographique National) propose plusieurs bases de données dont les deux les plus intéressantes pour cette étude sont la BDCarto et la BDTopo. La BDCarto fournit un ensemble d'information numérique décrivant le territoire métropolitain saisi à l'échelle du 1 : 50 000 : le réseau routier et ferré, l'hydrographie, les unités administratives, les équipements divers et la toponymie. La BDTopo comprend une description physique et tridimensionnelle du territoire. Elle couvrira l'ensemble du territoire français (métropole et départements d'outre-mer) en 2008. Elle se caractérise par une description exhaustive de l'environnement et par sa précision métrique (IGN, 1999). La source géométrique principale est une saisie photogrammétrique à partir de photographies aériennes aux échelles du 1 : 30 000 et 1 : 20 000. Des compléments peuvent être faits sur le terrain notamment pour les zones masquées sur les photographies. La BDTopo est constituée de plusieurs couches d'information selon des thèmes précis :

- voies de communication routières ;
- voies ferrées, transport d'énergie ;
- hydrographie ;
- lignes et limites diverses ;
- bâtiments, équipements divers ;
- végétation ;

- orographie ;
- altimétrie ;
- limites administratives ;
- toponymie.

Dans chaque couche, les données comportent deux niveaux d'information : un niveau géométrique et un niveau descriptif. Le niveau descriptif est l'intermédiaire qui permet de modéliser le passage entre la réalité et les primitives géométriques. Il contient des objets simples qui peuvent être ponctuels, linéaires, linéaires orientés ou surfaciques. Ces objets sont caractérisés par des attributs. Les objets peuvent également être complexes c'est-à-dire composés d'un ensemble d'objets simples ou d'objets complexes. Par exemple, une route peut être composée de tronçons à deux voies, de tronçons à trois voies, ...

Le niveau géométrique regroupe trois types de primitives géométriques : ponctuelles (nœuds), linéaires (arcs) et surfaciques (faces). Ces primitives sont décrites par des coordonnées selon le système de projection Lambert, précisant la localisation en x et y de chaque nœud ou point intermédiaire d'un arc, et z pour l'altitude selon le nivellement général de la France « réseau IGN 1969 ». Les objets levés sur le terrain dont le z est inconnu se voient affectés d'un z calculé par interpolation à partir du modèle numérique de terrain (MNT), issu des courbes de niveau de la BDTopo.

Un contrôle qualité est effectué sur la BDTopo selon des critères permettant d'évaluer la qualité géométrique et la qualité sémantique. Il permet de mesurer l'écart entre les données de la base et l'image réelle du terrain. La qualité géométrique est caractérisée par l'exactitude planimétrique et l'exactitude altimétrique et la qualité sémantique par l'exhaustivité et la précision sémantique (IGN, 1999).

1.3.2 La base de données CORINE Land Cover

En 1985, le programme européen CORINE (COoRdination of INformation on the Environment) a été mis en place avec pour objectif de fournir aux pays de l'Union européenne (12 pays en 1985) une information géographique homogène concernant l'environnement. Le projet Land Cover est une partie du projet CORINE et va permettre la création d'une base de données appelée CORINE Land Cover (CLC) consacrée à l'occupation du sol. Cette base de données est d'une part utilisée pour déterminer les politiques environnementales et d'autre part, couplée à d'autres données (climatiques, pédologiques, ...) afin d'estimer et d'appréhender les risques

naturels, les modifications des MOS. Le projet CORINE Land Cover concerne une superficie de 2.3 millions de km² à l'échelle 1 : 100 000. Le seuil minimal des unités cartographiées est de 25 hectares (Commission of the European Communities (CEC), 1995).

La base de données CLC est produite en cinq étapes à partir de photos satellites SPOT et LANDSAT et de données exogènes dont les principales sont, pour la France : les cartes topographiques de l'IGN au 1 : 25 000, 1 : 50 000 et 1 : 100 000, les cartes de la végétation du CNRS au 1 : 200 000, la carte des types de peuplements forestiers de l'Inventaire Forestier National (IFN) au 1 : 200 000, BDCarto de l'IGN, des photographies aériennes panchromatiques IGN au 1 : 30 000 et 1 : 60 000, des photographies aériennes IFN au 1 : 17 000 et 1 : 30 000. La donnée de base est une image satellite SPOT ou LANDSAT reproduite à partir d'une composition colorée dite « fausses couleurs » sur un tirage photographique à l'échelle du 1 : 100 000. L'image est ensuite interprétée visuellement en s'aidant des données exogènes. Les contours des zones d'occupation sont reportés sur un calque selon la nomenclature définie dans le projet CLC. Si la zone représente moins de 25 hectares, elle est associée à une autre unité paysagère pour former une unité homogène. Une opération de numérisation est ensuite réalisée sur le calque final. Une dernière vérification est faite pour valider l'assemblage des différents documents couvrant l'espace européen.

La nomenclature a été définie pour 44 types de MOS (CEC, 1995). Elle comporte trois niveaux dont les deux premiers niveaux sont :

1. les territoires artificialisés avec :
 - 1.1 les zones urbanisées
 - 1.2 les zones industrielles ou commerciales et les réseaux de communication
 - 1.3 les mines, décharges et chantiers
 - 1.4 les espaces verts artificialisés, non agricoles
2. les territoires agricoles
 - 2.1 les terres arables
 - 2.2 les cultures permanentes
 - 2.3 les prairies
 - 2.4 les zones agricoles hétérogènes
3. les forêts et milieux semi-naturels
 - 3.1 les forêts
 - 3.2 les milieux à végétation arbustive et/ou herbacée

- 3.3 les espaces verts ouverts, sans ou avec peu de végétation
- 4. les zones humides
 - 4.1 les zones humides intérieures
 - 4.2 les zones humides maritimes
- 5. les surfaces d'eau
 - 5.1 les eaux continentales
 - 5.2 les eaux maritimes

En 2000, un complément au guide technique de CLC a été réalisé. Ce document donne des informations supplémentaires à ceux qui ont la charge de collecter les données. Il décrit également une nouvelle méthodologie pour l'interprétation des images satellites qui utilise une classification semi-automatique des pixels. Avec l'extension de l'Europe aux pays de l'Europe centrale et de l'est, la nomenclature a été complétée pour inclure les particularités de ces pays (Bossard *et al.*, 2000).

Contrairement à la BDTopo, cette base de données permet d'avoir un « pavage » des MOS où aucune superficie n'est un espace vide. En revanche, elle ne fournit aucun renseignement sur la morphologie des bâtiments, seule une précision sur la continuité bâtie est apportée. En effet, le niveau III sépare les zones urbanisées en tissu urbain continu et tissu urbain discontinu.

1.3.3 Les Systèmes d'Information Géographiques urbains

Dans les grandes villes, les mairies se sont dotées d'un service d'information géographique pour constituer des bases de données, que l'on appellera ici des Systèmes d'Information Géographique Urbains (SIG-U). A Marseille, le SIG-U a été construit par la Division de l'Information Géographique de la mairie. Il a été conçu à partir du cadastre et de prises de vues aériennes au niveau de l'intérieur des îlots urbains au 1 : 500. Des relevés sur le terrain sont également réalisés en ce qui concerne le corps des rues au 1 : 200. Le SIG-U de Marseille comporte plusieurs centaines de couches d'informations. Tout ce qui occupe le sol d'une manière ou d'une autre est recensé : il s'agit, entre autres des bâtiments, des trottoirs, des abris de bus, des plaques d'égouts, des marques diverses et variées sur la chaussée, des jardinières, des arbres (palmiers, conifères...), des escaliers, des rochers, des citernes, des rivières, des pylônes, des bornes incendie, ...

Ces SIG-U sont très lourds à exploiter à cause de leur taille et sont de plus réservés à l'utilisation seule de l'administration. C'est donc une base de données

très complète qui donne des informations à la fois sur la morphologie des bâtiments et sur tout les MOS présents dans la ville mais elle n'est pas accessible au grand public. Toutefois, dans le cadre de ces travaux de recherche sur la ville de Marseille, la Division de l'Information Géographique de la mairie de Marseille a consenti à extraire des données pour des quartiers spécifiques et ce, pour une utilisation bien définie.

1.3.4 Les photos aériennes

Des photos aériennes sont disponibles auprès de l'IGN et permettent par photo-interprétation de définir les différents MOS d'une zone. Ces photos sont disponibles en noir et blanc ou en couleur depuis 1969, à une échelle qui varie entre 1 : 20 000 et 1 : 30 000. Dans des régions très urbanisées, des clichés ont été pris à une échelle de 1 : 14 500. Les différentes photographies se recouvrent d'environ 15% mais jusqu'à 40% sur certaines régions montagneuses. Pour avoir une vision stéréoscopique, le recouvrement entre deux photos successives est de 60% ; de la même manière, il peut être augmenté en région de montagne.

L'utilisation de photos aériennes permet d'interpréter les MOS d'une zone. Des recherches sont en cours afin de restituer automatiquement la hauteur des bâtiments à partir d'images aériennes. Le laboratoire LOEMI (Laboratoire d'Optique, d'Électronique et de Micro-Informatique) de l'IGN dirige depuis une dizaine d'années des recherches sur ce thème en collaboration notamment avec l'unité de recherche ETIS (Équipes Traitement des Images et du Signal) de l'École Nationale Supérieure de l'Électronique et de ses Applications de Cergy-Pontoise et s'intéresse à la localisation et à la modélisation des bâtiments en zones urbaines à partir de couples stéréoscopiques d'images aériennes à haute résolution. Les modélisations permettent non seulement de définir la limite des bâtiments mais aussi la surface des toits (Cord *et al.*, 1999 ; Cord *et al.*, 2001). Enfin, et pour ne citer que ces trois laboratoires, le CEntre de REcherche en MATHématiques de la DÉcision (CEREMADE) de l'Université de Paris IX cherche également à reconstruire des structures 3D rectangulaires à partir d'un modèle numérique d'élévation et d'une ortho-image (Vinson & Cohen, 2002).

1.3.5 Les images satellites

Les espaces urbains sont caractérisés par la diversité des surfaces : les surfaces minérales, les surfaces métalliques, les surfaces végétales, les surfaces hydriques. Chacun de ces objets possède sa propre signature spectrale c'est-à-dire le

rayonnement capté, réfléchi ou émis par la surface de l'objet (Robin, 1995). En ville, les surfaces minérales sont les plus étendues et leurs signatures spectrales sont proches et ressemblent à celles des sols nus. Les effets d'ombre multiplient également les effets radiométriques. Il est donc difficile d'isoler la signature spectrale de chaque élément urbain.

Plusieurs images satellites peuvent être utilisées pour étudier les MOS d'une ville. Les images SPOT et LANDSAT sont déjà utilisées pour la fabrication de CLC. Les images de SPOT 4 ont une résolution de 20 m. Avec la mise en orbite de SPOT 5, la résolution est améliorée. Ce dernier satellite est équipé d'un instrument HRG (Haute Résolution Géométrique) ; les résolutions au sol en mode noir et blanc sont de 2.5 m et 5 m et la largeur de champ des instruments est toujours de 60 km. Il est également équipé d'un instrument HRS (Haute Résolution Stéréoscopique) qui est utilisé pour les prises de vue stéréoscopiques avec une résolution de 10 m en mode noir et blanc et un champ de vue de 120 km.

Une collaboration entre la France et l'Italie, établie en 2001, a permis le développement d'un nouveau système dual *Orfeo* (Optical and Radar Federated Earth Observation) reposant sur une constellation de quatre satellites radar en bande X, développé sous la responsabilité de l'Italie, et sur un système optique de deux satellites à haute résolution développé sous la responsabilité de la France.

D'autres satellites proposent également des images à très haute résolution comme IKONOS. Il a été lancé en septembre 1999 et il est le premier satellite civil capable d'obtenir des images monochromes à une résolution de 1 m et polychromes à une résolution de 5 m.

Les images satellites atteignent aujourd'hui de très hautes résolutions (métriques) et permettent une étude très précise des MOS en milieu urbain. Cependant, elles ne permettent pas encore d'obtenir directement une information précise sur la morphologie des bâtiments, même si des reconstitutions 3D de paysages sont aujourd'hui possibles à partir d'images satellites.

La BDTopo apparaît donc comme la base de données disponible la plus adaptée pour étudier une ville et recueillir les informations nécessaires à l'analyse de l'influence de la structure de la ville sur le climat.

1.4 Le climat urbain

En effet, en milieu urbain, les conditions atmosphériques sont modifiées par divers processus. La ville possède un climat qui lui est caractéristique et que l'on définit par la notion de **climat urbain**. D'une façon plus ou moins spontanée, les

architectes ont su adapter leurs constructions aux conditions climatiques locales, d'après leur simple observation quotidienne du temps. Il faut attendre le milieu du XIX^{ième} siècle pour que les scientifiques s'intéressent à la modification du climat par la présence d'une ville. Les principales caractéristiques du climat urbain sont analysées à travers la température et l'écoulement de l'air près du sol ou dans la basse atmosphère. Divers processus permettent d'expliquer la formation de ce climat particulier à la ville.

1.4.1 Les caractéristiques du climat urbain

1.4.1.1 L'îlot de chaleur urbain

L'îlot de chaleur urbain est le phénomène le plus révélateur de l'influence de la ville sur le climat local. De nombreuses études ont montré que la température en ville était plus élevée en moyenne que celle de la campagne environnante (Oke, 1987b ; Oke *et al.*, 1999 ; Bornstein & Lin, 2000). Ce phénomène se développe au-dessus des grandes villes lors de conditions météorologiques particulières : vent calme et ciel dégagé.

L'intensité de l'îlot de chaleur urbain, ΔT_{u-r} , est définie par la différence entre la température en ville et la température en milieu rural avoisinant. La température en ville se caractérise par une baisse moins importante en fin d'après-midi et en soirée et un minimum plus élevé qu'en campagne. L'écart augmente rapidement juste après le coucher du soleil pour atteindre son maximum trois ou cinq heures plus tard. Elle diminue ensuite et devient nulle au lever du soleil.

1.4.1.2 Structure de la couche limite atmosphérique au-dessus d'une ville

La couche limite atmosphérique peut être définie comme la partie de la troposphère qui est directement influencée par la présence de la surface de la terre et qui répond au forçage de la surface à une échelle de temps de l'ordre d'une heure ou moins. Au-dessus de la couche limite se trouve la troposphère libre dans laquelle soufflent des vents géostrophiques qui résultent de l'équilibre entre la force de pression et la force de Coriolis.

La couche limite peut se décomposer en 4 sous-couches ; pour le cas d'une ville on identifie :

- la canopée urbaine qui se situe entre le sol et le toit des bâtiments. Elle est caractérisée par des processus à micro-échelle dans les rues, entre les bâtiments. Elle est composée d'un amalgame de micro-climats dont chacun

résulte des caractéristiques de son environnement immédiat (Oke, 1987b). La canopée urbaine perturbe la structure de la basse atmosphère au-dessus des toits à cause de ses constituants, bâtiments, arbres, rues qui sont alors considérés comme des éléments de rugosité, avec une porosité et une répartition spatiale très variable ;

➤ la sous-couche rugueuse qui est donc directement influencée par la canopée urbaine. Elle inclut la couche de canopée et la couche de mélange des sillages dus aux obstacles que rencontre le vent. Cette sous-couche rugueuse est donc très perturbée avec des champs de vent très hétérogènes et instationnaires. Son épaisseur varie de quelques millimètres en mer à quelques dizaines de mètre en zone urbaine. C'est également à l'intérieur de cette couche que se font les échanges de chaleur et d'humidité entre autres, par diffusion turbulente de petite échelle ;

➤ la couche de surface ; son épaisseur est d'environ 10% de celle de la couche limite atmosphérique (Oke, 1987b). La tension de frottement y est quasi constante ainsi que la direction du vent car la force de Coriolis est négligeable à cette échelle ; elle est d'ailleurs également appelée « couche à flux constant ». Cette couche est structurée comme si la surface était homogène ; C'est dans cette couche qu'interviennent les notions de longueur de rugosité dynamique et de hauteur de déplacement ;

➤ la couche d'Ekman qui correspond à la partie supérieur de la couche limite atmosphérique. L'influence de la surface devient négligeable ; par contre la force de Coriolis a un effet sur le vent : il subit une déviation angulaire par rapport à son orientation au sol vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud.

La structure de la couche limite atmosphérique évolue au fil de la journée. Durant la nuit, une couche stable se développe ; elle est caractérisée par un gradient thermique vertical positif et un faible niveau de turbulence. Elle disparaît au lever du soleil. Une couche de mélange se forme alors avec une turbulence convective. Son épaisseur augmente pour atteindre son maximum en fin d'après-midi. Elle disparaît au coucher du soleil (effondrement de la couche limite) ou se transforme en une couche résiduelle sans flux de chaleur. Elle prend alors la forme d'une couche inactive à très faible intensité de turbulence, séparée du sol par la couche limite stable.

1.4.1.3 La modification des vents au-dessus d'une ville

La présence d'une ville modifie les conditions d'écoulement du vent. Sa vitesse et sa direction sont modifiées principalement par la présence des bâtiments.

En effet, la vitesse du vent est moins élevée au-dessus d'une ville et la direction du vent est souvent déviée. Une relation simple entre la géométrie des rues et le régime du vent a d'ailleurs été établie par Oke (1987b) pour un ensemble de rues-canyons identiques parallèles, avec un vent perpendiculaire à l'axe des rues, avec H la hauteur moyenne des bâtiments qui bordent la rue et W la largeur moyenne de la rue:

- si $H/W < 0.3$, les sillages des bâtiments sont isolés, on a alors un écoulement sur un élément de rugosité isolé ;
- si $0.3 < H/W < 0.7$, le sillage créé en aval d'un bâtiment est perturbé par le sillage amont du bâtiment sous le vent. C'est un écoulement avec interférence de structure, l'espace étant alors plus fermé ;
- si $H/W > 0.7$, on a alors un écoulement rasant car l'espace est très fermé. Une situation stable est établie dans le canyon et l'écoulement atmosphérique n'est couplé à l'écoulement de la rue que par le frottement au niveau des toits : un (ou plusieurs) vortex peut se former entre les bâtiments. On appelle ce cas, un écoulement mono-structuré.

Un phénomène de brise a également été observé. Cette brise est appelée **brise de campagne** et souffle de la campagne vers la ville (Escourrou, 1991). Elle est observable entre 21h et 6h et prend fin entre 6h et 10h. Elle peut former une couche d'inversion thermique à la base de l'atmosphère où la vitesse du vent varie entre 2 et 3 m/s.

1.4.2 Les processus et les facteurs du climat urbain

Divers processus permettent d'expliquer les modifications du climat en milieu urbain. Ils peuvent être divisés en deux parties avec d'une part les processus de types radiatif et thermodynamique et d'autre part les processus de type aérodynamique.

1.4.2.1 Les processus radiatifs et thermodynamiques

Le bilan d'énergie de surface en milieu urbain est décrit par Oke (1987b) avec l'équation :

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (\text{Eq. 1.1})$$

avec Q^* le flux radiatif net, Q_F le flux de chaleur anthropique, Q_H le flux turbulent de chaleur sensible, Q_E le flux turbulent de chaleur latente, ΔQ_S la chaleur stockée, ΔQ_A la chaleur advectée horizontalement. Ces flux sont exprimés en W/m^2 .

Q_F est un flux de chaleur spécifique à la ville car il nécessite une certaine concentrations d'habitants pour exister. Son influence dépend de l'intensité de l'énergie, de son pouvoir de diffusion et du système de transport. D'après Taha (1997), la chaleur anthropique représente entre 70 et 100 W/m^2 en hiver dans les villes américaines alors que le rayonnement solaire est estimé entre 700 et 1000 W/m^2 . On note ainsi la faible part de la chaleur anthropique dans le bilan d'énergie. Son impact est significatif seulement dans les centre-villes denses et négligeable en périphérie dans les quartiers résidentiels.

Les flux Q^* , Q_E , Q_H sont également modifiés par la présence de la ville à travers plusieurs processus. Tout d'abord et d'une manière générale, le rayonnement solaire est réduit par la traversée de l'atmosphère. En effet, l'ozone présent dans la stratosphère absorbe la plus grande partie des rayons ultraviolets. De même, plusieurs phénomènes se produisent dans l'atmosphère contribuant à la réduction du rayonnement solaire (Godard & Tabeaud, 1996) :

- la diffusion du rayonnement qui résulte d'une infinité de réflexions sur les molécules des gaz et sur les poussières et impuretés contenues dans l'air ;
- l'absorption du rayonnement liée à la présence de la vapeur d'eau principalement dans les basses couches de l'atmosphère (3-4 km).

Au-dessus d'une ville, ces phénomènes sont accentués à cause de la proportion plus importante d'aérosols et de polluants contenus par l'atmosphère. On estime la diminution du rayonnement à 10-20% pour une ville fortement industrialisée et à 2-10% pour une ville où la pollution a comme source principale le trafic routier (Oke, 1987b).

Lorsque le rayonnement solaire atteint la ville, sa surface n'est pas plane. Plusieurs phénomènes se produisent : le rayonnement peut être piégé dans les rues des quartiers denses ou réfléchi par les différentes parois qu'il rencontre (figure 1-1). La réflexion du rayonnement solaire est accompagnée d'absorption, de diffusion et de transfert de chaleur dans les matériaux solides. Le phénomène de piégeage radiatif entraîne un stockage de la chaleur par les surfaces interceptant le rayonnement et dépend principalement de la morphologie de la ville. Le rayonnement solaire reçu par une surface varie en fonction de la géométrie des rues mais aussi des saisons et de l'inclinaison du soleil (figure 1-2). Plus les rues sont étroites et formées par de hauts bâtiments, moins la surface recevant le rayonnement solaire direct est importante. De même, plus le soleil a une position

proche de la verticale pendant la journée, moins son rayonnement pourra être intercepté par un obstacle avant d'atteindre le sol. Des zones d'ombre peuvent également se former sur d'autres structures proches (Sakakibara, 1996).

Oke (1987b) a montré qu'il existe une relation entre la géométrie de la rue canyon en centre-ville et l'intensité maximale de l'îlot de chaleur. Les travaux de Sakakibara (1996) confirment cette relation. En effet, l'auteur a réalisé des mesures sur sites (parking et rue canyon) et des simulations numériques montrant l'influence de la géométrie urbaine (faible *sky view factor* et ombre des structures sur les autres qui varie au cours de la journée) sur les températures. La géométrie urbaine et la densité bâtie ont une influence sur le piégeage du rayonnement solaire, la réduction du transport de chaleur par la turbulence et aussi sur l'accumulation de la chaleur anthropique.

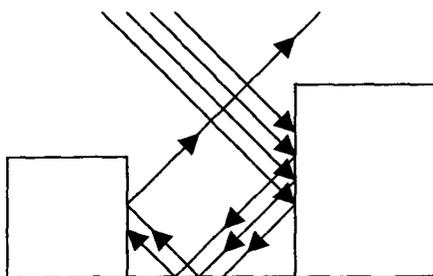


Figure 1-1: Piégeage radiatif dans une rue canyon.

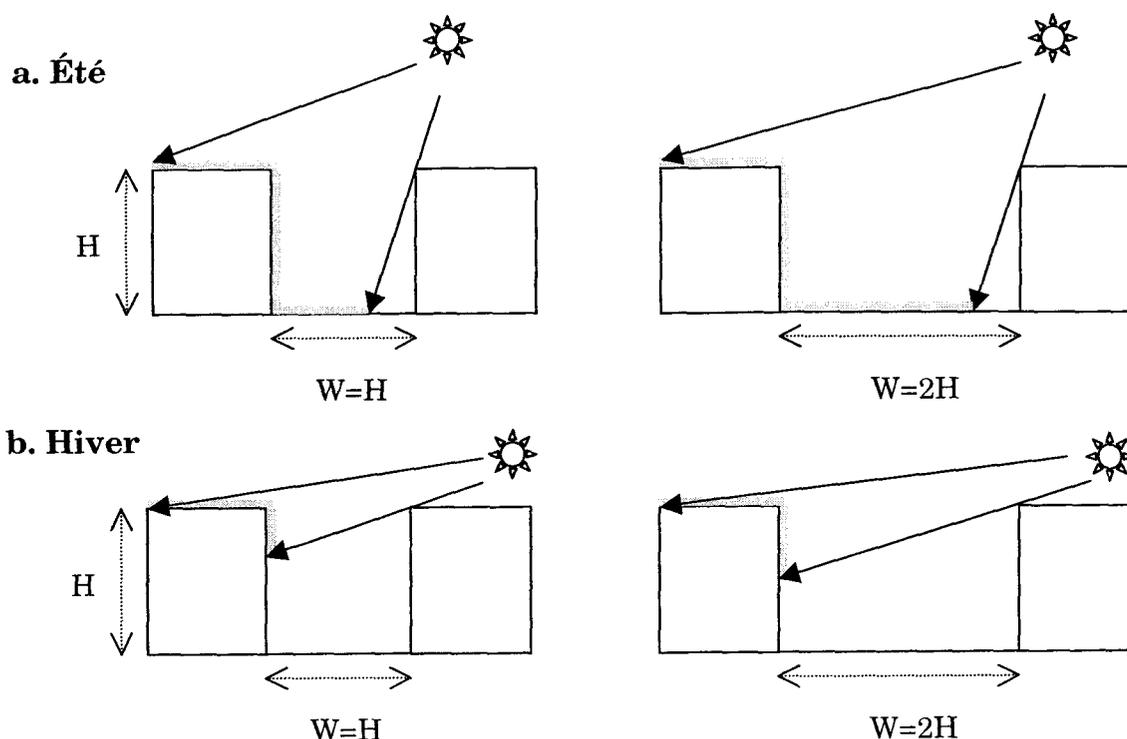


Figure 1-2: Surface ensoleillée en fonction de la géométrie de la rue pendant l'été (a) et pendant l'hiver (b).

La chaleur ainsi emmagasinée par les bâtiments représente un terme non-négligeable dans le calcul du bilan d'énergie (Arnfield & Grimmond, 1998), largement supérieure au stockage par le sol des zones rurales. Il explique en partie la différence de température entre la ville et la campagne, notamment les minima et les maxima et leur décalage dans le temps (retard en ville). La chaleur est stockée par les éléments urbains le jour puis restituée la nuit, le minimum est donc atteint plus tard dans la nuit et reste supérieur au minimum de la campagne.

La modification des états de surface en ville influence également les flux de chaleur. Les surfaces ont des propriétés thermiques différentes. En effet, la conduction, la porosité et l'albédo sont des paramètres qui peuvent avoir une influence sur le bilan d'énergie. D'après Asaeda *et al.* (1996), l'asphalte est le type de surface qui est la plus chaude et qui stocke le plus de chaleur par rapport à du béton ou un sol naturel. Or l'asphalte est un matériau très utilisé en ville et qui contribue donc à la formation de l'îlot de chaleur. Des études ont également été menées afin de montrer la sensibilité des températures de l'air à un changement d'albédo. En effet, les surfaces à fort albédo absorbent peu le rayonnement solaire et restent donc plus « froides » par rapport à des surfaces à faible albédo. Quelques valeurs d'albédo sont données dans le tableau 1-1. L'albédo moyen d'une ville varie entre 0.1 et 0.2 mais pour les villes européennes et américaines, il prend des valeurs comprises entre 0.15 et 0.2 (Taha, 1997). Des simulations numériques, réalisées sur des villes des latitudes moyennes, avec un climat chaud, ont montré que si l'albédo est modifié de 0.25 à 0.4 on obtient une diminution de 4°C des températures de l'air en été, durant l'après-midi (Taha, 1997).

Nature de la surface	Albédo
Asphalte	0.05-0.2
Brique	0.2-0.4
Pierre	0.2-0.35
Vitre avec un angle zénithal de moins de 40°	0.08
Tuile	0.10-0.35
Ardoise	0.10
Chaume	0.15-0.20
Herbe	0.16-0.26
Verger	0.15-0.20
Forêt de conifères	0.05-0.15
Eau avec un angle zénithal fort	0.1-1
Eau avec un angle zénithal faible	0.03-0.1
Blanc	0.5-0.9
Noir	0.02-0.15

Tableau 1-1 : Valeurs d'albédo pour différents types de surfaces (Oke , 1987b)

Les changements de type de surface en ville entraînent également des modifications des flux de chaleur latente et sensible. Par rapport à la campagne, Q_E est très inférieur en ville. En effet, en ville la majorité des sols est imperméable ou peu perméable et l'eau ruisselle et s'écoule dans les égouts. La proportion d'eau qui s'infiltré dans le sol est minime par rapport à celle qui est infiltrée à la campagne pour des précipitations identiques. L'eau étant peu stockée dans les couches superficielles du sol, l'évaporation est très faible. La réduction de l'évaporation est estimée par Escourrou (1991) à 20 % lorsque 38 % de la surface est imperméable et à 75 % lorsque 59 % de la surface est imperméable. La quantité de végétation restant faible la vapeur d'eau restituée par évapotranspiration dans l'atmosphère est faible ce qui explique des taux d'humidité relative inférieurs en ville par rapport à ceux de la campagne. Peu d'énergie est ainsi utilisée pour évaporer l'eau, ce qui provoque un flux de chaleur sensible plus important qu'en campagne. Cette augmentation de Q_H provoque un réchauffement de la basse couche limite urbaine, cause essentielle de la formation de l'îlot de chaleur urbain, alors qu'à la campagne, une partie de l'énergie est utilisée pour évaporer l'eau contenue dans le sol et n'est donc pas transformée en chaleur sensible comme en ville.

1.4.2.2 *Les processus aérodynamiques*

Comme on l'a décrit au paragraphe 1.4.1, la présence d'une ville modifie les caractéristiques de l'atmosphère urbaine. Des processus de type aérodynamique permettent également d'expliquer les modifications du climat.

Par rapport à un sol nu, la ville est en moyenne plus chaude, plus rugueuse et plus sèche (Oke, 1987b). Ces modifications ont une influence sur l'écoulement vertical et horizontal des flux d'air.

Les mouvements de l'air sont modifiés d'une part par les différences de température entre les divers espaces. La différence de températures entre la ville et la campagne environnante crée un mouvement de convergence des flux de la périphérie vers le centre où la pression atmosphérique est plus basse. Cette convection provoque également une ascendance de l'air au-dessus du centre, d'où l'augmentation de l'épaisseur de la couche limite en ville. Au lever du soleil, une couche de mélange se forme avec une turbulence convective due au transfert de chaleur entre le sol et l'air froid au-dessus qui se réchauffe moins vite que le sol, turbulence thermique qui vient s'ajouter à la turbulence mécanique créée par le frottement des obstacles au sol. La turbulence thermique disparaît avec le coucher du soleil.

Des brises très localisées peuvent également se produire à cause des différences de température entre des quartiers proches ou entre un quartier bâti et un espace vert. Dans le quartier bâti, la température est plus élevée que celle de l'espace vert à cause du stockage de la chaleur et du piégeage radiatif par les bâtiments : l'écoulement de l'air aura donc tendance à s'orienter de l'espace vert vers le quartier bâti.

D'autre part, les éléments de rugosité qui forment la ville agissent également sur la vitesse et la direction des flux. Les obstacles les plus importants sont les bâtiments; leur densité et leur hauteur influencent la structure et l'écoulement des flux. Deux notions permettent de quantifier la résistance exercée par une surface sur un écoulement : la longueur de rugosité dynamique et la hauteur de déplacement.

La longueur de rugosité z_0 est une échelle de longueur caractéristique du frottement du vent sur les obstacles micro- ou macroscopiques du sol. Le développement de la mise en équation de cette échelle de longueur est rappelé en annexe A.

La hauteur de déplacement, z_d , correspond à un apparent décalage de la surface : lorsque que les éléments de rugosité forment un tissu dense, l'écoulement du vent ne pénètre pas jusqu'au sol et laisse une couche d'air pratiquement immobile : son épaisseur est la hauteur de déplacement.

La longueur de rugosité représente la résistance offerte par la ville à l'écoulement des flux. L'augmentation de la rugosité provoque une diminution de la vitesse du vent au-dessus de la ville et par conséquent une ascendance de la masse d'air ce qui peut provoquer un dôme au-dessus de la ville. Une déviation des vents au passage d'une agglomération est également observée (Escourrou, 1991). La déviation est anticyclonique la nuit à cause de l'îlot de chaleur urbain et cyclonique le jour à cause de l'augmentation de la rugosité, mais ces déviations restent faibles et dépendantes de la vitesse du vent.

Des changements dans l'écoulement des flux sont également observables à l'échelle du quartier : si les bâtiments sont isolés, les flux contournent les obstacles et des tourbillons se forment ; à l'inverse, si les bâtiments sont plus denses et resserrés, la vitesse augmente localement par effet Venturi (Escourrou, 1991). L'écoulement peut être modifié par le type d'occupation du sol : surface d'eau, végétation, bâtiments, ... qui ont des rugosités différentes (Mestayer, 1998).

Des valeurs de z_0 spécifiques des zones urbanisées sont proposées par Oke (1987b) selon leur structure apparente :

- pour un habitat éparpillé (ferme, villages, arbres et haies), la longueur de rugosité varie de 0.2 à 0.6 m ;
- en banlieue (quartier résidentiel avec jardins), avec une faible densité, elle varie de 0.4 à 1.2 m, et avec une forte densité, elle est de 0.8 à 1.8 m ;
- en ville, si la densité est forte et si les immeubles font moins de 5 étages, disposés en rangées ou en blocs, la longueur de rugosité varie de 1.5 à 2.5 m et si les immeubles ont des hauteurs variés, elle oscille de 2.5 à 10 m.

Grimmond & Oke (1999) ont recensé de nombreuses valeurs de la longueur de rugosité calculées de différentes manières pour une vingtaine de villes nord-américaines, européennes et japonaises.

1.5 Conclusion

L'expansion spatiale de Marseille est limitée par des massifs montagneux et la mer. Vieille de 26 siècles, Marseille est une ville chargée d'histoire. Sa forme, sa structure sont les vestiges et les traces actuelles de son passé. Ville à la fois unifiée et divisée, elle est définie par un style architectural propre à la région. Son tissu urbain retrace les anciennes dualités entre le nord populaire et le sud bourgeois, autour du Vieux Port, l'opposition entre une industrie portuaire et une industrie non-traditionnelle et le développement plus ou moins anarchique de la banlieue, englobant au fur et à mesure de l'expansion urbaine les noyaux villageois, les bastides, les cabanons.

Marseille a été choisie pour réaliser la campagne de mesure CLU-ESCOMPTE pour analyser la structure de la canopée urbaine et les relations entre la structure de la ville et les conditions atmosphériques. La morphologie de la ville a une influence directe sur la basse atmosphère par les modifications du bilan d'énergie et de l'écoulement des flux qu'elle provoque. Des processus tels que le piégeage radiatif et le stockage de chaleur dépendent des formes des bâtiments, de leur volumétrie et de leur disposition dans la ville. C'est pourquoi, dans cette étude, la ville sera considérée comme une unité morphologique où s'opposent le bâti et le non-bâti, où le tissu urbain se compose de divers éléments comme les bâtiments, les axes de communication, les espaces verts ... La ville est vue comme un **paysage urbain** à un moment donné de son histoire (Loiseau *et al.*, 1993).

Dans cette perspective, la BDTopo est la base de données qui apparaît la mieux adaptée pour analyser la ville de Marseille. Elle permet à la fois de définir la morphologie des bâtiments et les MOS. A partir de ces informations, une analyse du tissu urbain permettra l'identification de zones homogènes et leur délimitation dans l'espace. Ces zones devront avoir leurs propres caractéristiques morphologiques et des MOS homogènes afin d'étudier leurs différentes influences sur le climat urbain au travers de simulations numériques de la basse atmosphère.

Des zones vont ainsi être définies en fonction des caractéristiques morphologiques des bâtiments et des MOS, calculés à partir de la BDTopo à l'aide d'un logiciel, DFMap, développé pour extraire les informations de la BDTopo et les transposer sur une grille. Ces données et ces outils sont présentés dans le deuxième chapitre.

Chapitre 2: La BDTopo (IGN) et le logiciel DFMap

Ce chapitre présente les données et les outils utilisés pour définir et analyser le tissu urbain de Marseille. Les principaux éléments retenus sont la BDTopo et le logiciel DFMap, développé dans le cadre de cette thèse pour transposer les informations contenues dans la BDTopo sur une grille, c'est-à-dire dans un format plus accessible pour réaliser des analyses statistiques et pour être utilisées en entrée des modèles atmosphériques.

Le développement de DFMap a été réalisé en collaboration avec la société SIRIATECH. La structure principale du logiciel étant déjà définie avant le début de la thèse, les améliorations, essentiellement informatiques, ont porté sur le développement de points précis (traitement d'informations supplémentaires, développement de fonctions de calcul) et sur la validation du logiciel. DFMap est l'outil principal utilisé pour ces travaux de recherche, une part importante de travail a donc été consacrée à sa validation car il était nécessaire de s'assurer de la validité et de la qualité des données utilisées, avant d'analyser le tissu urbain.

2.1 La BDTopo de Marseille : description des fichiers

La BDTopo est la base de données qui fournit à la fois des renseignements sur la volumétrie et sur les MOS de la ville, avec une précision métrique. Elle ne nécessite aucun traitement préalable et peut être utilisée sous sa forme initiale

Afin d'étudier la ville de Marseille, une zone d'étude a été délimitée. Les coordonnées sont données en mètres selon le système de projection Lambert III ; la zone se situe entre 858000 m à l'est, 844000 m à l'ouest, 124000 m au nord et 106000 m au sud. Cette zone correspond à deux feuilles de la BDTopo, celles de Marseille et d'Aubagne, réalisées à partir de photos aériennes datant de 1994.

La BDTopo est une base de données en mode vectoriel. Chaque objet surfacique est représenté par une ligne non fermée définissant son contour. Cette ligne est une polygone ponctuée de points qui marquent les angles de cette surface ; ces points

sont appelés des **vertex**. Chaque vertex comporte un ou plusieurs attributs, comme l'altitude du point par exemple. Les objets linéaires sont représentés par une polyligne, reprenant le tracé général de l'objet. Cette description de la BDTopo correspond à la BDTopo fournie au format .DXF, format spécifique qui diffère des autres formats dans lesquels la BDTopo est disponible. Ce format a été défini pour le logiciel de DAO Autocad. Il correspond donc à la nécessité de manipuler des données beaucoup plus variées que les seules données géographiques.

Pour cette étude, seules quelques couches d'informations ont été utilisées pour analyser d'une part la morphologie des bâtiments et d'autre part les MOS : Bâtiments - Équipement divers, Voies de communication routière, Végétation, Hydrographie et Altimétrie. Dans chacune de ces couches, des informations sont recensées selon des critères précis et représentées par des signes soit ponctuels, soit linéaires, soit surfaciques.

2.1.1 Les bâtiments

Dans la couche Bâtiments – Équipements divers, plusieurs types de bâtiments ont été retenus pour cette étude ; le nom des fichiers de la BDTopo est mentionné entre parenthèses. Il s'agit :

- des bâtiments quelconques (REG_BAT) ; ce sont des bâtiments en dur dont l'architecture ou l'aspect ne sont pas spécifiques à une fonction industrielle, agricole ou commerciale. Ce fichier regroupe toutes les habitations et les bâtiments en béton, en verre, construits dans les zones d'activités ;
- des bâtiments industriels, agricoles ou commerciaux (BAT_IND) ; ils regroupent les ateliers, les hangars, les auvents de péages, de stations service ou de quais de gare, les entrepôts, les bâtiments d'élevage, les supermarchés et autre surfaces commerciales ;
- des bâtiments religieux (BAT_RELO et BAT_REL1) ; c'est-à-dire les édifices consacrés au culte d'une religion (respectivement, catholique et musulmane).

Pour ces trois catégories de constructions, le plan du bâtiment est saisi à la hauteur de la gouttière (figure 2-1). S'il y a des cours intérieures, elles sont enregistrées dans des fichiers différents (REG_BAT_ et BAT_IND_) et seules les cours dont la plus grande dimension est supérieure à 25 m et la plus petite supérieure à 10 m sont recensées. Ces trois types de bâtiment représentent 99.8% de la surface totale bâtie de Marseille.

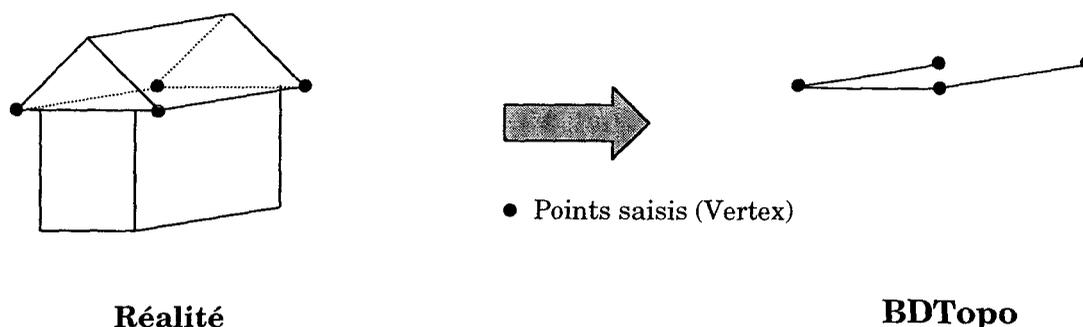


Figure 2-1: Saisie d'un bâtiment dans la BDTopo

2.1.2 Les axes routiers

Les axes routiers ont une représentation linéaire, ce qui signifie qu'une route est représentée par une polygline. Les axes routiers sont classés par types de routes et selon leur nombre de voies (de 1 à 4 voies) :

- les routes nommées ne possédant pas de numéros, c'est-à-dire les routes non classées et les rues urbaines (ROU_1V, ROU_2V, ROU_3V, ROU_4VP) ;
- les routes départementales (DEP_1V, DEP_2V, DEP_3V, DEP_4VP) ;
- les routes nationales (NAT_1V, NAT_2V, NAT_3V, NAT_4VP) ;
- les autoroutes (AUT_1V, AUT_2V, AUT_3V, AUT_4VP).

Ces fichiers regroupent l'ensemble des tronçons de voies de communication ayant un numéro ou un nom en commun. Les voies ont une largeur de 3.5 m et sont matérialisées de part et d'autres (bandes de signalisation horizontale). Seuls les axes routiers revêtus de goudron ou de béton ont été retenus pour cette étude ; les chemins, les sentiers, les allées (qui peuvent être revêtues ou non), ... ne sont pas pris en compte.

2.1.3 La végétation

La végétation est un MOS constitué de cinq couches de la BDTopo :

- les bois (BOIS), c'est-à-dire les espaces verts peuplés d'arbres d'essence forestière regroupant feuillus et conifères et dont la plus petite dimension est supérieure ou égale à 25 m. Une altitude est saisie au sommet de la végétation lorsque la géométrie n'est pas partagée ;

- les broussailles (BROUSSA) : ce sont des formations de végétaux à tiges ligneux ramifiés dès la base (arbrisseaux) et dont la hauteur ne dépasse pas 2 à 3 m et qui représente un couvert végétal faible mais difficilement franchissable. La superficie doit être supérieure à 3 ha et la plus petite dimension supérieure ou égale à 25 m ;
- les vergers (VERGER) : ils représentent les zones de plantation hors peuplement forestier avec les mêmes conditions de surface et de dimension que précédemment ;
- les vignes (VIGNE), c'est-à-dire des plantations de vignes avec également les mêmes conditions de taille que ci-dessus ;
- l'herbe rase entretenue (TER_FOO), c'est-à-dire des emplacements aménagés pour la pratique du football ou du rugby d'une longueur de 90 à 120 m et d'une largeur de 45 à 90 m.

Les fichiers BOIS_, BROUSSA_, VERGER_ et VIGNE_ permettent de délimiter des zones d'un autre MOS entièrement entourées par ces types de végétation. Par contre, si la surface d'un autre MOS est inférieure à 1 ha, elle est englobée dans le type de végétation principal ; si la surface est comprise entre 1 et 3 ha, elle est considérée comme un trou, sans MOS spécifié.

Ce sont les seules informations disponibles dans la BDTopo en ce qui concerne la végétation, mis à part des « arbres remarquables » à cause de leur âge ou de leur taille, notés ponctuellement dans l'espace. Cependant, dans la couche d'informations intitulée « Lignes et limites diverses », des haies et rangées d'arbres, orientées ou non, sont recensées et représentées par des objets linéaires ; une altitude est spécifiée, correspondant à l'altitude du sommet des arbres. Elles sont assez présentes dans le nord et l'est de la zone d'étude, en périphérie de la ville. Ces haies pourraient être considérées comme des éléments de rugosité mais plus « poreux » qu'un simple bâtiment.

2.1.4 L'hydrographie

Pour l'hydrographie, plusieurs types d'information sont recensés et ont été retenus pour cette étude :

- les surfaces d'eau d'écoulement naturel et permanent (S_C_EAU), c'est-à-dire les fleuves, les rivières,... dont la largeur est supérieure ou égale à 7.5 m ;
- les surfaces d'écoulement d'eau artificielle (SCANALA) qui correspondent aux voies de circulation des eaux aménagées artificiellement pour éviter des

surplus d'eau de crue dans un cours d'eau, pour amener l'eau aux usines hydroélectriques, pour assurer l'arrosage, pour permettre la navigation fluviale le long d'un fleuve ou d'une rivière encombrée ou pour assurer la liaison entre deux bassins fluviaux. La largeur minimale est toujours de 7.5 m ;

- les bassins (BASSIN), c'est-à-dire les constructions à ciel ouvert destinées à recevoir de l'eau regroupant les bassins et les piscines dont la plus grande dimension ou diamètre est supérieur ou égal à 10 m ;
- les réservoirs d'eau (RES_EAU) qui peuvent être partiellement enterrés et destinés à l'alimentation en eau d'une collectivité ;
- les surfaces hydro-terrestres permanentes (S_HYDRO) regroupent les mares, les lacs et les étangs dont la plus petite dimension est supérieure ou égale à 20 m ;
- les zones marines (EAU_MAR), c'est-à-dire les zones recouvertes d'eau salée (mer, océan, anse, golfe).

Toutes ces surfaces d'eau permanentes ont été retenues dans cette couche d'informations car les cours d'eau ou surfaces d'eau temporaires relèvent d'un caractère saisonnier voire exceptionnel et on cherche à présenter une occupation moyenne des sols de la ville et de ses environs.

2.1.5 Le sable sec

Un dernier MOS a été retenu ; il s'agit des zones de sable sec qui ne sont jamais recouvertes d'eau (SAB_SEC) et qui représentent principalement les plages en bordure de mer. Leur superficie doit être supérieure à 3 ha et leur dimension supérieure à 25 m.

2.1.6 La topographie

Enfin, les courbes de niveaux (COURBE) ont été retenues dans la couche Altimétrie. Dans leur majorité, elles sont équidistantes de 10 m, mais des courbes équidistantes de 5 m sont également saisies lors d'accidents topographiques marqués. Des points cotés sont disponibles : COT_PLN, COT_NAT, COT_SOM, COT_COL et COT_CUV ; ils spécifient des altitudes pour des éléments du relief marqués (sommet, col, cuvette) ou pour des éléments du paysage sans grande particularité (point coté naturel et point coté sur voie de communication terrestre).

2.2 DFMap

Afin d'utiliser l'ensemble des informations vectorielles contenues dans la BDTopo, il est nécessaire de « rasteriser » cette information, c'est-à-dire de la transposer sur une grille. Pour cela, un logiciel a été développé en partenariat avec la société SIRIATECH.

2.2.1 Création d'Astuce/DFMap

Le logiciel, nommé tout d'abord Astuce, a été mis au point par une équipe de recherche pluridisciplinaire formée de chercheurs de l'équipe Dynamique de l'Atmosphère Habitée (DAH) du laboratoire de Mécanique des Fluides de l'École Centrale de Nantes, de l'Institut de Recherche en Informatique de Nantes (IRIN) et du Centre de Recherche Méthodologique d'Architecture (CERMA) de l'École d'Architecture de Nantes dans le cadre du projet « Densité-Rugosité » du programme interdisciplinaire sur la ville du CNRS (PIR-Ville). A la fin de cette collaboration, le développement du logiciel était bien avancé, la majeure partie des problèmes ayant déjà été résolus après de nombreuses réflexions et discussions entre les différents partenaires. Certains choix ont également été faits à ce moment-là comme travailler sur un maillage et non sur l'information à l'état brut. Une première étude a été menée sur la ville de Nantes pour analyser les tissus urbains de quartiers spécifiques et les résultats obtenus avec un changement de la taille des mailles (Groleau, 1997).

Le logiciel Astuce a ensuite été repris par la société SIRIA Technologies, devenue SIRIATECH, pour poursuivre son développement et sa valorisation. Converti en langage de programmation C++, un langage de programmation orienté objet, le logiciel a alors pris le nom de DFMap. Il permettait alors de calculer des paramètres statistiques à partir de la couche d'informations Bâtiments-Équipements divers de la BDTopo. Mais aucun des résultats n'était vraiment validé. C'est à ce stade que le logiciel a été repris dans le cadre de cette thèse, pour poursuivre son développement et réaliser la phase de validation.

Deux rapports internes au laboratoire de Mécanique des Fluides de l'ECN (Dupont, 1998 et 2000) font un état des lieux du logiciel DFMap. Plusieurs erreurs sont alors signalées et des hypothèses de développement sont proposées.

Dans un premier temps, des informations complémentaires contenues dans la BDTopo sont prises en compte par DFMap; des couches d'informations supplémentaires deviennent alors accessibles : la végétation, les axes routiers, le

réseau hydrographique, les sols naturels (sable sec uniquement à ce stade du développement du logiciel).

Dans un deuxième temps, des fonctions sont développées afin de calculer des variables statistiques à partir de ces nouvelles informations.

Enfin, une phase de validation importante a été réalisée pour chacune des fonctions développées. Plusieurs tests ont été effectués et sont répertoriés dans un document de synthèse (Long & Gabet, 2002b).

2.2.2 Objectif de DFMap

L'objectif principal du développement de DFMap, selon le cahier des charges établi entre les différents partis (ECN, USTL, SIRIATECH), était de définir des zones homogènes en milieu urbain selon des critères morphologiques et les MOS, pour calculer ensuite des paramètres aérodynamiques sur ces zones homogènes, préalablement identifiées (Long & Gabet, 2002a). Vu la complexité de la tâche, du point de vue de la programmation informatique des fonctionnalités, et la volonté de SIRIATECH de ne pas transformer le logiciel en un outil SIG, DFMap a été simplement développé pour réaliser des calculs dont les résultats seront par la suite exportés vers des logiciels d'exploitation permettant l'analyse et le traitement des données. Rappelons qu'un SIG peut être défini comme un système de gestion de base de données conçu pour saisir, stocker, manipuler, analyser, afficher des données à référence spatiale (Laaribi, 2000). Un tel outil aurait permis d'utiliser de manière combinée des informations de différentes couches de la BDTopo. Il aurait alors été possible de calculer, par exemple, une longueur de rugosité représentant à la fois la résistance exercée par les arbres et les bâtiments sur l'écoulement des flux.

Le logiciel DFMap permet actuellement de calculer trois sortes de résultats :

- des variables décrivant la morphologie des bâtiments ;
- la part des différents MOS en milieu urbain ;
- des paramètres aérodynamiques.

2.2.3 Description de DFMap

DFMap lit les fichiers d'extension .DXF de la BDTopo. L'utilisateur ouvre un fichier dont la carte va être affichée à l'écran et DFMap enregistre dans un premier temps toutes les informations dont il aura ensuite besoin pour réaliser les calculs. Les couches d'information disponibles correspondent aux bâtiments, à la végétation, au réseau hydrographique, aux surfaces goudronnées, au sol naturel (sable sec) et à la topographie. L'utilisateur définit ensuite une zone d'étude puis le maillage ;

chaque cellule de la grille est appelée **rugoxel**¹. Un rugoxel est un carré dont les faces sont orientées nord-sud - est-ouest. L'utilisateur fixe soit la taille du rugoxel, soit leur nombre dans la zone d'étude préalablement définie. Il définit ensuite une **rugozone**¹ qui correspond à la zone réelle où les calculs vont être effectués. Une rugozone est donc une association de rugoxels dont le contour extérieur correspond à une ligne polygonale fermée délimitant une composante connexe unique ayant éventuellement un certain nombre de trous. A une rugozone correspond une formule unique de calcul de rugosité ou autre (Groleau, 1997). Elle est saisie directement à l'écran en cliquant successivement les points sur la carte. L'utilisateur sélectionne ensuite la rugozone, puis choisit la fonction de calcul et lance enfin le calcul. Plusieurs fonctions de calcul sont disponibles. Le calcul est réalisé dans chaque cellule à l'intérieur de la rugozone. Par défaut, la rugozone de calcul comprend toute la carte.

Une description plus détaillée de DFMap et de son utilisation a été rédigée sous forme de note interne au Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'École Centrale de Nantes (Long, 2002).

2.2.4 Passage d'une information vectorielle à une information « rasterisée »

Dans la BDTopo au format .DXF, chaque objet géographique est représenté par une polyligne reliant plusieurs vertex. Lors de la création du maillage, un objet peut être découpé et compris dans plusieurs mailles. A chaque intersection entre l'objet et la maille, un nouveau vertex est créé (figure 2-2). Dans le cas d'un bâtiment X, si la maille le sépare en deux parties, deux nouveaux bâtiments seront créés (A et B).



Figure 2-2: Création de deux bâtiments A et B et de deux vertex V_1 et V_2 par le maillage.

¹ Les termes *rugoxel* et *rugozone* ont été définis « historiquement » à la création du logiciel lorsque ce dernier avait pour vocation première de calculer des paramètres de rugosité, d'où le préfixe « rugo- ».

2.2.5 Les fonctions de DFMap

2.2.5.1 Les fonctions définissant les modes d'occupation du sol

La part de chaque MOS est définie par une densité. Le calcul de densité résulte du rapport entre la surface occupée (S_{zone}) et la surface de la maille ($S_{rugoxel}$). D'une manière générale la densité est égale à :

$$\lambda = \frac{\sum(S_{zone})}{S_{rugoxel}} \quad (Eq. 2.1)$$

avec S la surface en m².

Les densités sont calculées pour les surfaces bâties, les zones de végétation, les surfaces d'eau et les surfaces goudronnées représentées par les axes routiers. La surface de chaque objet est calculée en utilisant le produit vectoriel (produit de deux vecteurs) pour les objets non-découpés par le maillage et par triangulation pour les autres objets.

Le calcul de densité est repris ci-dessous en détail pour chaque MOS.

Densité surfacique des bâtiments : la somme des surfaces bâties (S_{bati}) à l'intérieur d'un rugoxel est tout d'abord calculée, la surface des cours (S_{Cour}) est prise en compte comme étant une surface vide à l'intérieur d'un îlot. La densité, λ_B , est ensuite calculée par le rapport entre la surface bâtie et la surface du rugoxel ($S_{rugoxel}$).

$$\lambda_B = \frac{\sum(S_{bati} - S_{Cour})}{S_{rugoxel}} \quad (Eq. 2.2)$$

Dans la BDTopo, deux bâtiments peuvent être superposés, c'est-à-dire l'un saisi sur le même espace, partiellement ou totalement, qu'un autre. Ce cas correspond soit à une erreur de saisie dans la BDTopo, soit à un fait réel, par exemple un bâtiment de type commercial au rez-de-chaussée et un bâtiment quelconque aux étages supérieurs. Le calcul de densité peut alors être faussé, avec une surface bâtie supérieure à la surface du rugoxel. Pour y remédier, le bâtiment dont le contour se trouve à l'intérieur d'un autre bâtiment n'est pas pris en compte dans le calcul de la surface bâtie.

Densité surfacique des bâtiments avec choix de la hauteur : cette fonction est la même que la précédente, sauf que l'utilisateur spécifie une hauteur au-dessus de laquelle la surface bâtie est calculée. Cette fonction permet de se rendre

compte de la densité des bâtiments à une hauteur donnée dans la canopée urbaine. Le calcul de la hauteur des bâtiments est expliqué au paragraphe 2.2.5.2.

Les densités de la végétation, de l'herbe rase, des surfaces d'eau et du sable sec sont calculées sur le même modèle, en tenant compte également des surfaces occupées par des MOS différents se trouvant à l'intérieur de ces surfaces.

Densité surfacique des zones goudronnées : la surface des zones goudronnées correspond uniquement à celle des axes routiers ; les zones de parking ou autres surfaces goudronnées ne peuvent pas être prises en compte car elles ne sont pas identifiées dans la BDTopo. Cette surface est donc égale au produit de la longueur des axes routiers par la largeur moyenne des voies. La longueur et la largeur des axes routiers sont calculées selon des méthodes expliquées ultérieurement dans le paragraphe 2.2.5.3.

2.2.5.2 Fonctions décrivant la morphologie des bâtiments

Hauteur moyenne des bâtiments (m) : la hauteur moyenne de chaque bâtiment est calculée de la manière suivante (figure 2-3). Une altitude est donnée pour chaque vertex définissant le contour du bâtiment. L'altitude au sol de chaque point du bâtiment est calculée par une interpolation linéaire. Cette interpolation est pondérée par la distance entre le vertex et les 3 ou 4 points d'altitude au sol (\rightarrow). Puis la différence, H , entre l'altitude du bâtiment et celle du sol est calculée. Une moyenne de ces différences est ensuite réalisée et définit la hauteur moyenne du bâtiment, h_{Bati} .

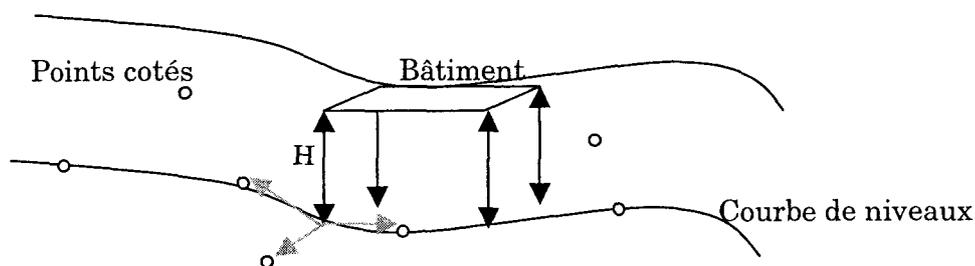


Figure 2-3: Calcul de la hauteur moyenne d'un bâtiment par interpolation linéaire.

On calcule ensuite une moyenne des hauteurs des bâtiments H_{moy} contenus dans le rugoxel, chaque hauteur de bâtiment étant pondérée par sa surface. Pour cela, on calcule tout d'abord le volume de chaque bâtiment, résultat du produit

entre la surface, S_{Bati} , et la hauteur moyenne du bâtiment, h_{Bati} , puis on calcule la somme des volumes bâtis divisée par la somme des surfaces bâties.

$$H_{moy} = \frac{\sum(h_{Bati} * S_{Bati})}{\sum S_{Bati}} \quad (Eq. 2.3)$$

Écart type de la hauteur des bâtiments dans une cellule (m) : l'écart type est une variable statistique qui permet, dans le cas présent, de rendre compte de la variabilité de la hauteur des bâtiments dans un rugoxel.

On calcule tout d'abord la hauteur moyenne des bâtiments dans un rugoxel \bar{H} puis on somme les écarts entre la hauteur de chaque bâtiment h_{Bati} et la hauteur moyenne, au carré. L'écart type est ensuite donné par la racine de cette somme d'écarts, divisée par le nombre de bâtiments, N_{Bati} .

$$\delta_{Hauteur} = \frac{\sqrt{\sum(h_{Bati} - \bar{H})^2}}{N_{Bati}} \quad (Eq. 2.4)$$

Écart type de la hauteur des bâtiments dans une cellule en m (pondérée par la surface) : cette fonction est la même que la précédente sauf que la hauteur moyenne des bâtiments pondérée leur surface H_{moy} est utilisée dans cette formule.

Volume moyen des bâtiments en m^3 : le volume d'un bâtiment résulte du produit entre la surface bâtie et la hauteur moyenne du bâtiment, h_{Bati} . La somme des volumes contenus dans un rugoxel est calculée puis divisée par le nombre de bâtiments pour obtenir un volume moyen. Dans ce calcul, le volume « vide » occupé par une cour intérieure est retranché au volume bâti. Le volume « vide » est le résultat du produit entre la surface de la cour et la hauteur moyenne du bâtiment.

Volume moyen des bâtiments pondéré par leur surface en m^3 : cette fonction a été développée dans l'objectif de nuancer le calcul du volume moyen des bâtiments dans un rugoxel pour les cas où, par exemple, seulement deux bâtiments de taille très différente sont moyennés dans un rugoxel ; cette valeur moyenne n'est pas très représentative du volume de ces deux bâtiments. Cette fonction calcule le volume de la même manière que la méthode précédente mais en le pondérant par la surface du bâtiment.

Périmètre moyen des bâtiments (m) : le périmètre d'un bâtiment est calculé par la somme des distances (\longleftrightarrow) entre les vertex définissant son contour (figure 2-4, bâtiment A). Si un bâtiment est coupé par le maillage, les côtés de la cellule ne

sont pas pris en compte dans cette somme, seuls les côtés réels du bâtiment sont comptabilisés (figure 2-4, bâtiment B). Une moyenne de tous les périmètres contenus dans un rugoxel est enfin calculée. Les cours intérieures des bâtiments ne sont pas prises en compte car c'est le périmètre extérieur du bâtiment qui donne une information sur sa taille.

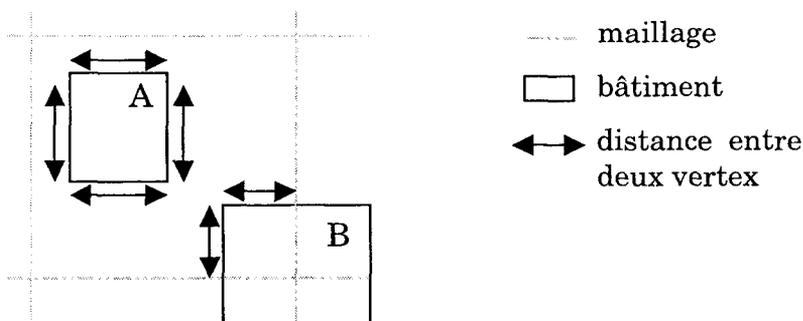


Figure 2-4: Côtés de bâtiments pris en compte dans le calcul du périmètre moyen

Compacité moyenne des bâtiments : cette fonction permet de se rendre compte de la forme plus ou moins découpée des bâtiments. On calcule tout d'abord le rapport R_b entre la surface du bâtiment et son périmètre, puis le périmètre du cercle dont la surface est égale à la surface de ce bâtiment. On réalise également le rapport R_c entre la surface et le périmètre du cercle et enfin la compacité est donnée par le rapport entre R_c et R_b (Groleau, 1997). On calcule enfin une moyenne des compacités des bâtiments contenus dans le rugoxel. Plus ce rapport est proche de 1, plus le bâtiment a une forme compacte. Le cercle a une compacité de 1, l'hexagone de 0.95 et le carré de 0.88.

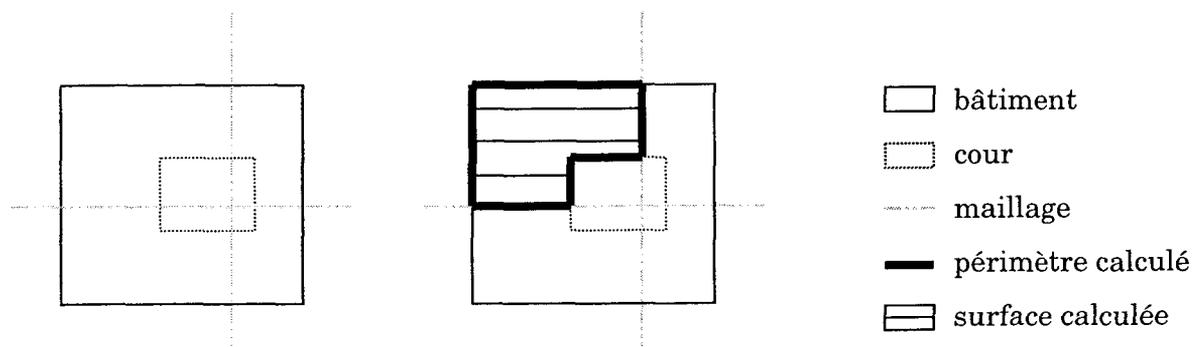


Figure 2-5: Cas d'un bâtiment composé d'une cour intérieure et découpé par le maillage pour le calcul de la compacité.

Pour les bâtiments découpés par le maillage, le calcul du périmètre est alors modifié en prenant en compte les côtés du rugoxel afin que le périmètre corresponde à la surface de bâtiment auquel il est rapporté (figure 2-5). Dans le cas d'une cour intérieure, la surface de la cour est enlevée à la surface du bâtiment et son périmètre -ne prenant en compte que les côtés réels de la cour- ajouté (figure 2.5).

2.2.5.3 Fonctions décrivant les axes routiers

Largeur moyenne des axes routiers (m) : la largeur moyenne d'un axe routier est calculée à partir du nombre de voies, une voie mesurant en moyenne 3.5 m (IGN, 1999). On calcule le nombre moyen de voies contenues dans la maille, en divisant la somme du nombre de voies par le nombre d'axes routiers. On obtient le nombre moyen de voies pour les axes routiers du rugoxel qu'on multiplie par 3.5 pour avoir la largeur moyenne des axes de circulation routière.

Longueur des axes routiers (m) : cette formule permet de calculer la longueur totale des axes de circulation dans une cellule. Cette longueur est la somme des distances entre les vertex constituant un axe routier.

2.2.5.4 Fonctions décrivant la répartition des bâtiments dans l'espace urbain

Nombre de bâtiments dans une cellule : cette fonction donne le nombre de bâtiments contenus dans un rugoxel. Si deux ou plusieurs « morceaux » du même bâtiment se trouvent dans une cellule ils ne seront comptés qu'une seule fois. Les cours intérieures ne sont pas prises en compte dans ce calcul mais les bâtiments superposés à un autre bâtiment le sont.

Espacement moyen entre les bâtiments (m) : cette formule permet de calculer une distance moyenne entre les bâtiments. Pour cela, on calcule d'abord la surface non-bâtie puis le périmètre de cette surface. On assimile cette surface à un rectangle, connaissant le périmètre et la surface de ce rectangle, il est alors possible d'en déduire sa largeur d'après la formule :

$$L = \frac{\frac{P_{non-bati}}{2} - \sqrt{\frac{P_{non-bati}^2}{4} - 4S_{non-bati}}}{2} \quad (Eq. 2.5)$$

avec $S_{non-bati}$, la surface non-bâtie et $P_{non-bati}$, le périmètre de la surface non-bâtie

2.2.5.5 Fonctions calculant des paramètres aérodynamiques

Il existe différents modèles numériques pour définir la longueur de rugosité et la hauteur de déplacement. D'après l'étude menée par Grimmond & Oke (1999), les formules de Bottema (1995), de Raupach (1994) et de Macdonald (1998) semblent les meilleures, sans être toutefois complètement satisfaisantes. Pour parvenir à cette conclusion, ils ont confronté différentes méthodes morphométriques sur des cas réels (11 sites dans 7 villes nord-américaines) et comparé les paramètres de rugosité obtenus par ces méthodes avec des mesures réalisées sur sites ou en souffleries. Ces trois modèles ont été retenus et sont utilisés dans DFMap pour calculer les paramètres aérodynamiques. Ils sont détaillés en annexe B.

Ces modèles peuvent tenir compte de la disposition régulière ou non régulière des bâtiments. Une disposition est dite régulière lorsque les bâtiments sont alignés et/ou, en quinconce, décalés les uns par rapport aux autres ; elle est dite non régulière lorsque les bâtiments sont disposés sans ordre ou alignements rectilignes apparents. Les dispositions régulières de bâtiments correspondent à celles d'expériences réalisées en soufflerie à partir desquelles les différents modèles ont été élaborés ; il est rare de trouver un tel agencement des bâtiments dans les villes européennes. Les densités surfaciques latérales et frontales sont calculées par DFMap selon les méthodes utilisées par ces trois auteurs.

Deux calculs de densité surfacique dépendent de la direction du vent : la densité latérale surfacique et la densité frontale surfacique. La surface latérale d'un bâtiment correspond à la surface des parois parallèles à la direction du vent ; la surface frontale correspond à la surface des parois perpendiculaires et face à la direction du vent (figure 2-6a). Dans le cas où les parois du bâtiment ne sont ni parallèles ni perpendiculaires à la direction du vent, la surface latérale correspond à la longueur D_L multiplié par la hauteur moyenne du bâtiment h_{bati} et la surface frontale à la longueur D_F multiplié par la hauteur moyenne du bâtiment h_{bati} dans la figure 2-6b. La somme des surfaces latérales ou frontales comprises dans un rugoxel (cours intérieures comprises) est calculée puis rapportée à la surface du rugoxel.

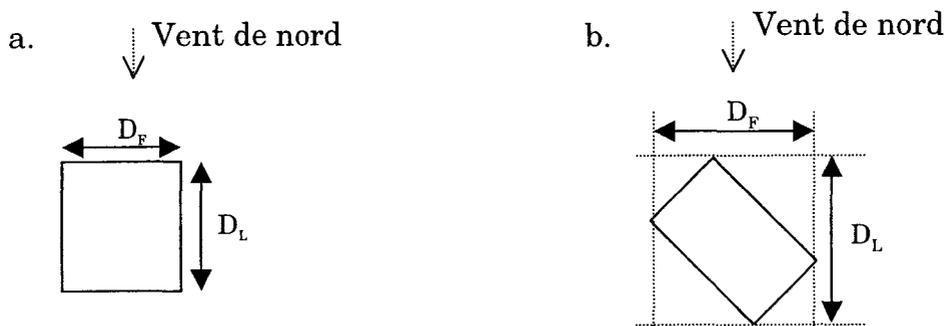


Figure 2-6: Surfaces latérale et frontale de deux bâtiments par vent de nord.

Rugosité fixée (m) : cette fonction permet d'afficher une valeur de rugosité choisie par l'utilisateur pour l'ensemble de la zone sélectionnée.

Hauteur de déplacement en m (Raupach, non régulier) : d'après Raupach (1994), pour une disposition non régulière des bâtiments, la hauteur de déplacement est calculée :

$$Z_d = H_{moy} \frac{\left(1 - \left(1 - \exp\left(-\left(2 * C_{dl} * \lambda_F\right)^{0.5}\right)\right)\right)}{\left(2 * C_{dl} * \lambda_F\right)^{0.5}} \quad (Eq. 2.6)$$

avec Z_d la hauteur de déplacement, H_{moy} la hauteur moyenne des bâtiments, λ_F la densité frontale et $C_{dl} = 7.5$.

Longueur de rugosité en m (Raupach, non régulier) : d'après Raupach (1994), pour une disposition non régulière des bâtiments, la longueur de rugosité est

$$Z_0 = H_{moy} (1 - Z_d) \exp\left(-0.4 \frac{U}{u_*} + \Psi\right) \quad (Eq. 2.7)$$

où

$$\frac{u_*}{U} = \min\left[\left(C_S + C_R \lambda_F\right)^{0.5}, \left(\frac{u_*}{U}\right)_{\max}\right] \quad (Eq. 2.8)$$

avec Z_0 la longueur de rugosité, H_{moy} la hauteur moyenne des bâtiments, U la vitesse du vent à grande échelle, u_* la vitesse de frottement, λ_F la densité frontale, $\Psi = 0.193$, $C_S = 0.003$, $C_R = 0.3$ et $\left(\frac{u_*}{U}\right)_{\max} = 0.3$.

Hauteur de déplacement en m (Bottema, non régulier) : d'après Bottema (1995), la hauteur de déplacement pour une disposition non régulière des bâtiments est :

$$Z_d = H_{moy} * \lambda_B^{0.6} \quad (Eq. 2.9)$$

avec Z_d la hauteur de déplacement, H_{moy} la hauteur moyenne des bâtiments et λ_B la densité bâtie.

Longueur de rugosité en m (Bottema, non régulier) : d'après Bottema (1995), la longueur de rugosité pour une disposition non régulière des bâtiments est :

$$Z_0 = (H_{moy} - Z_d) \exp\left(\frac{-0.4}{\sqrt{0.5 * C_{dh} * \lambda_F}}\right) \quad (Eq. 2.10)$$

avec Z_0 la longueur de rugosité, H_{moy} la hauteur moyenne des bâtiments, λ_F la densité frontale, et $C_{dh} = 0.8$.

Longueur de rugosité en m (Macdonald, régulier) : d'après Macdonald (1998), la longueur de rugosité est :

$$Z_0 = H_{moy} (1 - Z_d) \exp \left(- \left(0.5 \beta \frac{C_D}{\kappa^2} (1 - Z_d / H_{moy}) \lambda_F \right)^{-0.5} \right) \quad (Eq. 2.11)$$

$$\text{où } \frac{Z_d}{H_{moy}} = 1 + A^{-\lambda} (\lambda - 1) \quad (Eq. 2.12)$$

avec Z_0 la longueur de rugosité, H_{moy} la hauteur moyenne des bâtiments, Z_d la hauteur de déplacement, λ_F la densité frontale, λ la densité bâtie, $C_D = 1.2$, $A = 4.43$, $\beta = 1$. Les valeurs des coefficients sont ceux proposés par Grimmond & Oke (1999).

Rapport Hauteur des bâtiments / Largeur des rues : ce rapport permet de déterminer les différents régimes du vent selon la géométrie de la rue (Oke, 1987b). Il résulte du rapport entre la hauteur moyenne des bâtiments et l'espacement moyen entre les bâtiments d'un rugoxel, ces deux variables sont calculées selon les formules expliquées précédemment, la hauteur moyenne des bâtiments n'étant pas pondérée par leur surface.

2.2.5.6 Fonction de classification

Une fonction a été proposée par Chaillou (1996) lors de la création de DFMap ; elle permet de diviser l'espace urbain selon trois paramètres : la hauteur maximale des bâtiments, la continuité bâtie et la densité bâtie. Cette classification a été réalisée dans l'objectif de classer le tissu urbain selon des critères morphologiques. Cette fonction a été intégrée à DFMap en utilisant seulement deux critères : la hauteur maximale des bâtiments et la densité bâtie car la continuité bâtie est une variable qui ne peut pas être extraite de la BDTopo puisqu'elle assimile les bâtiments contigus comme une seule entité et ne sépare que les bâtiments discontinus.

Classification Chaillou :

- la classe 1 : $H_{max} < 15\text{m}$ et $\lambda_B < 0.3$
- la classe 2 : $H_{max} < 15\text{m}$ et $0.15 < \lambda_B < 0.3$
- la classe 3 : $H_{max} < 15\text{m}$ et $\lambda_B > 0.3$

- la classe 4 : $15 \text{ m} < H_{\max} < 30\text{m}$ et $\lambda_B < 0.15$
- la classe 5 : $15 \text{ m} < H_{\max} < 30\text{m}$ et $0.15 < \lambda_B < 0.3$
- la classe 6 : $15 \text{ m} < H_{\max} < 30\text{m}$ et $\lambda_B > 0.3$
- la classe 7 : $H_{\max} > 30\text{m}$ et $\lambda_B < 0.15$
- la classe 8 : $H_{\max} > 30\text{m}$ et $0.15 < \lambda_B < 0.3$
- la classe 9 : $H_{\max} > 30\text{m}$ et $\lambda_B > 0.3$

2.2.5.7 Fonctions secondaires

Plusieurs fonctions sont encore développées dans DFMap ; elles sont calculées à partir des fonctions précédentes. Il s'agit pour la plupart de fonctions logarithmiques. Elles permettent de mettre en évidence des différences très faibles sur une grande échelle.

- Log 10 (Surface frontale / Surface latérale) : les surfaces frontales et latérales sont calculées comme indiqué précédemment. Le rapport entre les deux est ensuite calculé puis le logarithme décimal.

- Log 10 (Surface frontale max / Surface frontale min) : les surfaces frontales et latérales sont calculées comme indiqué précédemment. On sélectionne la surface frontale maximale et la surface frontale minimale à l'intérieur d'un rugoxel. Le logarithme décimal du rapport entre les deux est enfin calculé.

- Surface bâtie / surface frontale : les surfaces bâties et frontales, en tenant compte des cours intérieures, sont calculées puis le rapport entre les deux est ensuite réalisé.

- Log10 Longueur de rugosité (Raupach, non régulier) : cette fonction est le logarithme décimal de la fonction calculant la longueur de rugosité selon le modèle de Raupach pour une disposition non régulière des bâtiments.

- Log 10 Longueur de rugosité (Bottema, non régulier) : cette fonction est le logarithme décimal de la fonction calculant la longueur de rugosité selon le modèle de Bottema pour une disposition non régulière des bâtiments.

- Log10 Longueur de rugosité 0° / longueur de rugosité 90° (Bottema, non régulier) : cette fonction est le logarithme décimal du rapport entre la longueur de rugosité calculée pour un vent de 0° et un vent de 90° selon la formule de Bottema pour une disposition non régulière des bâtiments.

- Log 10 Longueur de rugosité (Bottema, régulier) : cette fonction est le logarithme décimal de la fonction calculant la longueur de rugosité selon le modèle de Bottema pour une disposition régulière des bâtiments.

2.3 Validation de DFMap

2.3.1 État des lieux de la BDTopo

Avant de valider les calculs réalisés par DFMap, une vérification de la base de données a été effectuée avec deux objectifs : s'assurer d'une part que les dysfonctionnements relevés lors des tests ne sont pas dus à des erreurs de programmation de DFMap et vérifier d'autre part la fiabilité et la qualité de la base de données utilisée.

2.3.1.1 *Les erreurs de saisie dans la BDTopo*

Plusieurs types d'erreurs de la BDTopo ont été révélés. Tout d'abord, la zone d'étude correspond à deux feuilles de la BDTopo, celle de Marseille et celle d'Aubagne. On a pu noter que la jonction entre les deux feuilles était mauvaise, notamment pour les courbes de niveaux qui ne se rejoignent pas à la limite entre les deux feuilles. Concernant la topographie, la saisie est également de mauvaise qualité sur la feuille de Marseille. En effet, les courbes de niveaux sont d'une part discontinues et d'autre part certains vertex n'ont aucune altitude spécifiée en attribut.

De même, en ce qui concerne les bâtiments, certains vertex ont des altitudes inférieures à l'altitude du sol ou seulement un ou plusieurs points du bâtiment ont une altitude égale à celle du sol, ce qui provoque un décrochement important du niveau du toit. Cet aspect a été vérifié par observation de photos aériennes du site où les bâtiments en question étaient identifiables ; ces vertex correspondent généralement à des zones d'ombre qui peuvent expliquer ces erreurs.

On a pu noter également que certaines zones étaient saisies plusieurs fois sous une appellation et sur une surface identiques. Par exemple sur la BDTopo de Nantes, le tracé de la Loire est saisi quatre fois. On retrouve ce cas pour des zones de végétation et des bâtiments.

2.3.1.2 *Les chevauchements d'informations*

Lorsqu'on affiche sur un SIG l'ensemble des couches de la BDTopo, on peut noter certains chevauchements entre les différentes couches d'information. Par exemple, des bâtiments peuvent être saisis dans des zones de végétation sans que la surface de l'habitation ne soit déduite de la surface de végétation, ce qui signifie qu'une même surface correspond à la fois à une surface bâtie et à une surface de végétation. De même, les axes routiers qui traversent une zone de végétation sont superposés à la végétation : une même surface correspond alors à la fois à une zone goudronnée et à une zone de végétation.

2.3.1.3 Les surfaces non-identifiées

Malgré l'échelle des photos aériennes utilisées pour construire la BDTopo, on constate l'absence de certaines informations concernant les MOS. En effet, au niveau de la végétation, de grandes surfaces ne comportent aucune information ; sur la zone de Marseille, il s'agit dans la plupart des cas de zones de broussailles ou de végétations maigres, qui repoussent après un incendie par exemple. En milieu urbain, des zones de « terrains vagues » ne sont également pas identifiées laissant des surfaces, pourtant de tailles importantes, sans information. On retrouve surtout ces zones dans les quartiers d'habitat collectif où les immeubles sont souvent entourés de végétation peu entretenue et desséchée pendant l'été.

2.3.2 Validation des fonctions de base de DFMap

Chaque fonction développée dans DFMap a été validée selon un protocole mis en place par la société SIRIATECH. De nombreux tests ont été réalisés et sont recensés dans un document écrit avec les fichiers informatiques nécessaires à la réalisation de ces tests (Long & Gabet, 2002b). Ainsi à chaque modification de DFMap, il est possible de vérifier que les changements réalisés n'affectent pas d'autres fonctions.

La validité des résultats est présentée tout d'abord pour les fonctions de base de DFMap c'est-à-dire la hauteur moyenne d'un bâtiment, la surface d'une zone, l'espacement moyen entre les bâtiments, le périmètre d'un bâtiment, la largeur et la longueur des axes routiers, le nombre de bâtiments par cellule.

Les développements et les corrections apportées au programme de DFMap sont réalisés dans l'objectif de tenir compte des erreurs éventuelles recensés dans la BDTopo mais il ne s'agit en aucun cas de corriger la BDTopo.

2.3.2.1 Validation du calcul de la hauteur moyenne d'un bâtiment

Rappelons tout d'abord que dans la BDTopo, une valeur d'altitude est donnée pour chaque point délimitant un bâtiment. Cette altitude est la somme de l'altitude au sol et de la hauteur du bâtiment. Une procédure a été développée pour calculer l'altitude au sol de chaque point constituant un bâtiment ; elle est ensuite soustraite à l'altitude du point du bâtiment pour obtenir la hauteur de ce point du bâtiment.

Le bâtiment de la Préfecture est utilisé comme bâtiment-test pour le calcul de la hauteur d'un bâtiment (figure 2-7).

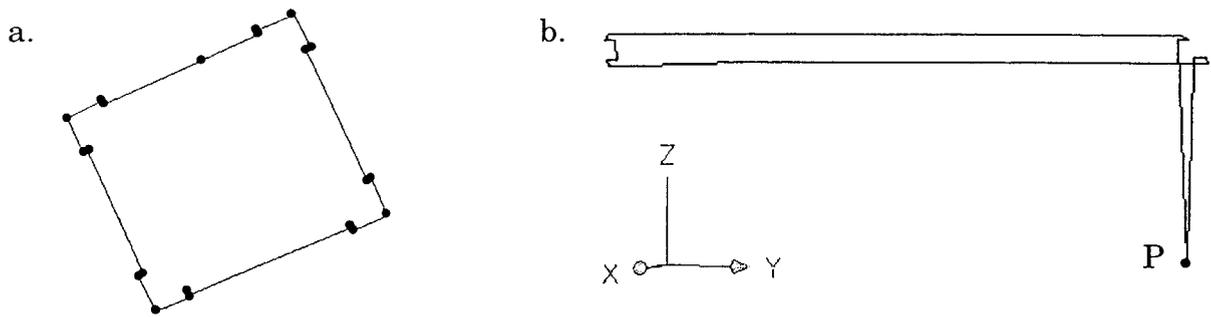


Figure 2-7: la Préfecture : vue en en plan (a) et vue en 3D (b)

Durant la mise en application de cette procédure, diverses erreurs sont survenues. Tout d'abord, la différence entre l'altitude d'un point du bâtiment et l'altitude au sol pouvait être négative, comme le montre la première ligne du tableau 2-1 ; ce point correspond au point P de la figure 2-7b. Pour cela une condition a été mise en place dans le programme de cette fonction : si la différence entre ces deux altitudes est négative, la hauteur de ce point du bâtiment est alors nulle.

De même, pour calculer l'altitude du sol, une méthode d'interpolation sur 4 points était utilisée. Les 4 points des courbes de niveau les plus proches de chaque point du bâtiment étaient retenus selon certaines conditions, mais toutes ces conditions n'étaient pas toujours vérifiées et donc l'interpolation ne pouvait pas se faire entre 4 points. Une méthode d'interpolation avec 3 points était déjà développée dans le programme de DFMap, elle a seulement été mise en place pour les cas où la précédente ne fonctionne pas. Mais à ce niveau là, des erreurs étaient encore présentes car l'altitude au sol pouvait encore être négative. Une condition supplémentaire a donc été ajoutée : si la hauteur au sol est négative, la hauteur de ce point du bâtiment est nulle.

La hauteur moyenne de chaque bâtiment est ensuite calculée sans prendre en compte les valeurs à 0 m. La moyenne se fait par exemple sur 3 points au lieu de 4, mais au moins ces 3 points sont justes (ou du moins réalistes). Dans le cas où aucun point d'un bâtiment n'a une valeur supérieure à 0 m, la hauteur moyenne du bâtiment est de 0 m. Par la suite, lors du calcul de la hauteur moyenne des bâtiments contenus dans une maille, ces valeurs de 0 m ne sont également pas prises en compte. D'après le tableau 2-1, les hauteurs calculées par DFMap sont très proches des hauteurs réelles et les erreurs de la BDTopo sont prises en compte dans les calculs.

Altitude des points du bâtiment	Altitude au sol (d'après MNT)	Altitude au sol (d'après DFMap)	Hauteur des points du bât. (col. 1 – col. 2)	Hauteur des points du bât. (DFMap)
10.26	11	11.67	-0.74	0.00
40.60	11	11.84	29.6	28.75
40.60	11	11.79	29.6	28.8
40.60	11	11.44	29.6	29.15
40.60	11	11.87	29.6	28.72
40.60	11	11.87	29.6	28.72
40.70	14	13.76	26.7	26.93
40.70	14	13.74	26.7	26.95
40.70	16	14.19	24.7	26.5
40.70	15	13.91	25.7	26.78
40.70	15	13.87	25.7	26.82
40.90	12	12.11	28.9	28.78
40.90	11	11.79	29.9	29.10
40.90	11	11.85	29.9	29.04
41.00	11	11.90	30	29.09
40.70	16	19.99	24.7	20.70
40.70	16	19.99	24.7	20.70
40.70	17	19.99	23.7	20.70
40.90	15	19.99	25.9	20.90
40.90	15	19.99	25.9	20.90
40.90	12	19.99	28.9	20.90
		Moyenne	26.15	25.94

Tableau 2-1 : Calcul de la hauteur moyenne en m d'un bâtiment : cas de la Préfecture.

Il reste cependant un dernier problème : il arrive que tous les vertex d'une même courbe de niveau n'aient pas la même valeur, à cause de la mauvaise jointure entre les deux feuilles de la BDTopo constituant la zone d'étude. A cette jointure, pour quelques points des courbes de niveau, l'altitude est à 0 m au lieu d'être aux mêmes valeurs que le reste de la courbe. L'altitude du sol estimée par interpolation est donc sous-estimée et la hauteur du bâtiment surestimée. Une condition a alors été mise en place à la lecture des fichiers des courbes de niveaux pour attribuer la même valeur à chaque vertex d'une courbe.

Des tests ont été réalisés sur un quartier de Marseille afin de valider et d'améliorer les résultats obtenus. La figure 2-8 présente un quartier de Marseille, au sud du Vieux Port, le Vieux Port étant délimité par la courbe de niveau à 0 m. Ce quartier a été choisi comme zone-test car il contient toutes les erreurs de la BDTopo, citées précédemment.

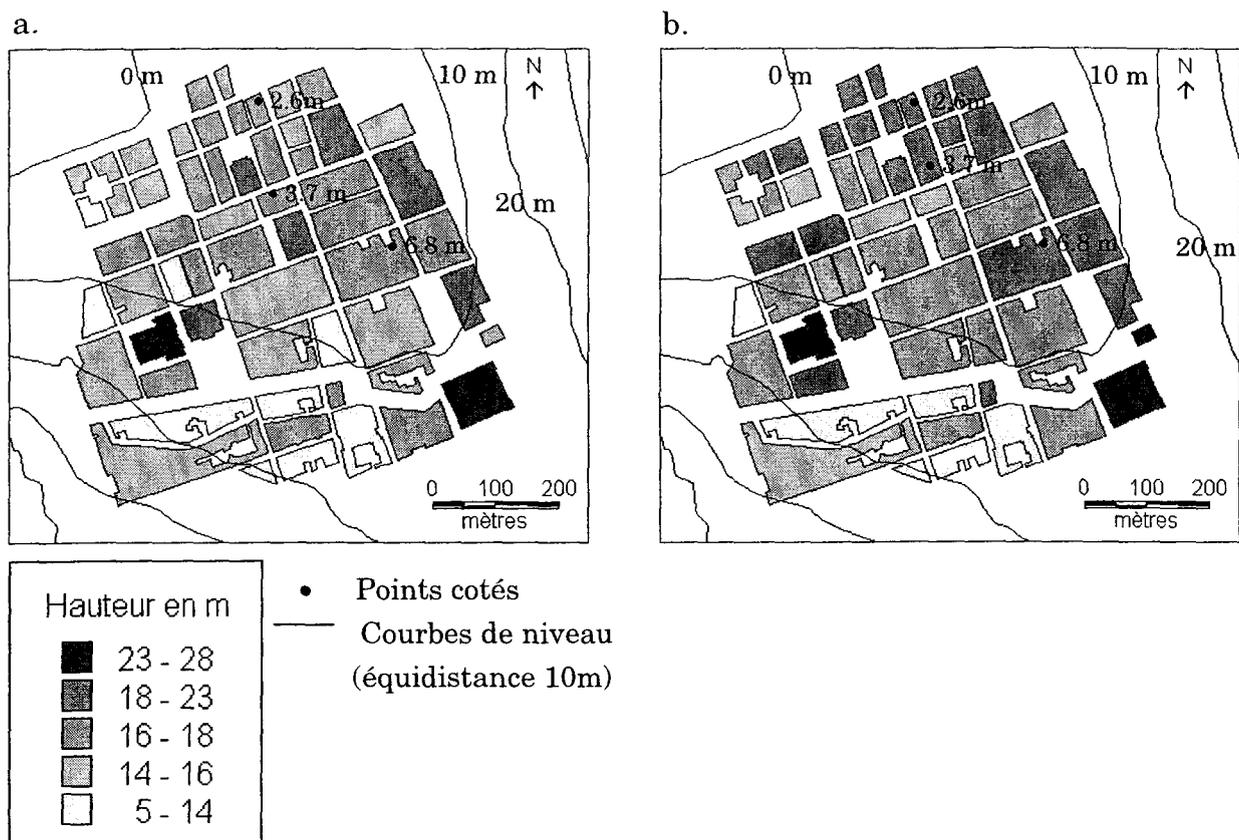


Figure 2-8: Hauteurs moyennes de bâtiment calculées à partir de la BDTopo, sans aucune correction (a) et avec la prise en compte des erreurs de la BDTopo (b).

Pour calculer manuellement la hauteur moyenne de chaque bâtiment, l'altitude de chaque vertex a été relevée pour chacun des bâtiments représentés ici. Ensuite, une altitude moyenne a été calculée pour chaque bâtiment. Grâce aux courbes de niveau, aux points cotés qui figurent dans la BDTopo et à un MNT (Modèle Numérique de Terrain) calculé par le logiciel MapInfo, l'altitude au sol a été estimée pour chaque bâtiment, puis la différence entre l'altitude moyenne du bâtiment et l'altitude au sol a été calculée. La figure 2-8a représente les hauteurs moyennes de bâtiments calculées manuellement à partir de l'ensemble des données fournies par la BDTopo, erreurs comprises. La figure 2-8b représente également les hauteurs moyennes de bâtiments mais lorsque les valeurs aberrantes ne sont pas prises en compte. Par exemple, les bâtiments entourant le Vieux Port sont formés de 4 points qui varient autour de 20 m d'altitude, sauf un point entre 0 et 2 m. Ce point a été supprimé dans le calcul de la moyenne pour les résultats de la figure 2-8b.



Figure 2-9: Hauteurs moyennes des bâtiments calculées par DFMap avec une résolution de 25 m*25 m

Enfin, la figure 2-9 présente les hauteurs moyennes des bâtiments calculées par DFMap, sur un maillage composé de cellules de 25 m*25 m. Si on compare la figure 2-8b et la figure 2-9, on retrouve les bâtiments à plus de 20 m sur les deux cartes et celui de moins de 6 m. On remarque également la différence de hauteur sur le nord-est de la zone : la hauteur moyenne des bâtiments est sous-estimée par DFMap. Cette sous-estimation vient en réalité d'une surestimation de l'altitude au sol : dans cette zone, elle est estimée par DFMap entre 5 et 7 m, mais d'après les points cotés de la BDTopo, l'altitude au sol varie seulement entre 2.6 et 3.7 m. D'autre part, dans DFMap, l'altitude au sol est calculée pour chaque point du bâtiment, il en est de même pour le calcul de la différence entre l'altitude du bâtiment et l'altitude au sol. Les différentes hauteurs sont ensuite moyennées pour chaque bâtiment. Pour les calculs manuels, une altitude moyenne pour chaque bâtiment et une altitude moyenne au sol sont calculées ; les deux méthodes de calculs ne sont pas identiques mais il était difficile d'être plus précis dans la méthode manuelle. La moyenne des

différences entre les figures 2-8b et 2-9 est de 3.6 m avec, en valeur absolue, un maximum de 8 m et un minimum de 0.26 m.

L'utilisation des points cotés présents dans la BDTopo a alors été introduite dans DFMap afin d'augmenter la précision du calcul de l'altitude au sol. Avec cette amélioration, la différence entre les hauteurs de bâtiments évaluées manuellement et les hauteurs calculées par DFMap est beaucoup moins importante (figure 2-10). En moyenne, la différence est de 0.55 m avec un maximum en valeur absolue de 1.86 m.

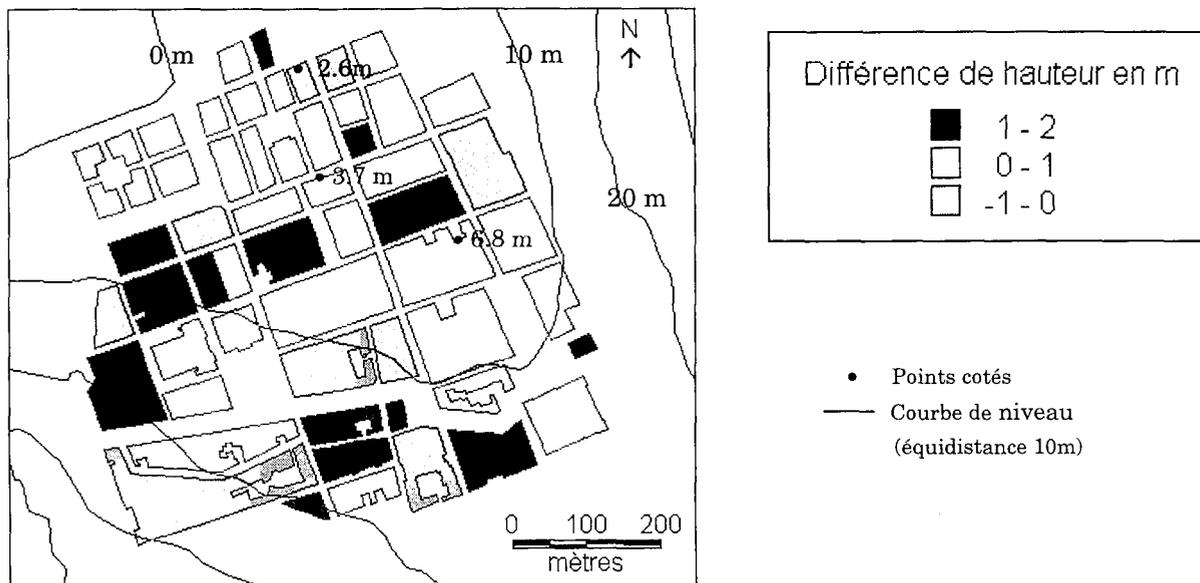


Figure 2-10: Différence entre les hauteurs calculées manuellement et les hauteurs calculées par DFMap après amélioration du calcul de l'altitude au sol

Une tentative de validation des hauteurs des bâtiments par rapport à la réalité a été réalisée en utilisant le nombre d'étages pour définir la hauteur d'un bâtiment. Durant la campagne ESCOMPTE, le nombre d'étages de tout les bâtiments d'un quartier a été relevé ; il s'agit du quartier autour de la Cour d'Appel Administrative. En centre-ville, les immeubles datent du siècle dernier et la hauteur de chaque étage est très variable avec des étages importants dans les premiers niveaux puis un ou deux étages beaucoup moins hauts sous les toits. Il était donc difficile d'estimer dans un premier temps la hauteur moyenne d'un étage et d'en déduire dans un second temps la hauteur précise des bâtiments.

De même, pendant la campagne ESCOMPTE, la hauteur de certains bâtiments a été mesurée là où des stations de mesures étaient installées. Il est difficile de vérifier là aussi la précision des mesures car ces bâtiments font partis d'un îlot de

bâtiments alors que dans la BDTopo, c'est le contour de l'îlot qui est saisi, sans indication sur le découpage en bâtiments.

2.3.2.2 Validation du calcul des surfaces

La surface d'une zone est également une variable très utilisée dans DFMap. Plusieurs cas doivent être pris en compte afin de calculer une surface exacte : la superposition de deux objets et les surfaces *vides* comme les cours intérieures des bâtiments.

Tout d'abord, le calcul des surfaces est validé par comparaison avec des études de détail réalisées avec le logiciel Autocad : quatre types d'habitat ont été sélectionnés dans le tissu urbain de Marseille (figure 2-11). Le premier type (a) correspond à des maisons individuelles avec généralement un garage ou une construction annexe, caractérisé par un décrochement dans la forme du bâtiment. Pour ce type de structure, la surface est sous-estimée par DFMap de 0.02 %. Le type (b) correspond à des bâtiments du centre-ville, disposés de manière très régulière le long de la voirie. La surface est surestimée de 0.003 %, ce qui est très acceptable. Le type (c) représente des bâtiments collectifs, des immeubles barres. La surface est sous-estimée par DFMap de 0.07 %. Enfin, le type (d) représente des îlots du centre-ville avec des cours intérieures et des formes très découpées : les surfaces sont surestimées de 0.28 %.

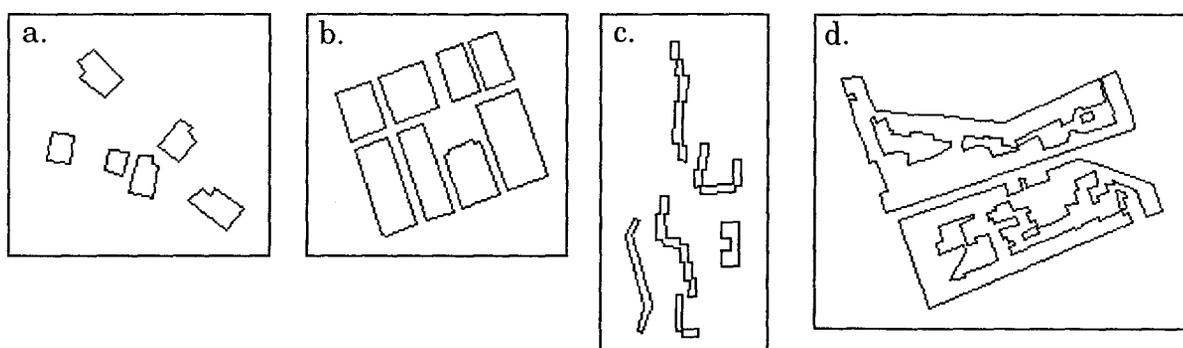


Figure 2-11: Types de bâtiments individuels (a), réguliers du centre-ville (b), collectifs (c) et découpés du centre-ville (d) (l'échelle entre les 4 figures n'est pas identique).

On note que plus la forme des bâtiments est proche de la forme rectangulaire, plus la précision du calcul des surfaces est bonne ; lorsque les formes deviennent complexes, DFMap a tendance à surestimer les surfaces. Au vu de ces quatre exemples, on peut dire que DFMap surestime de 0.11 % en moyenne les surfaces des bâtiments.

Dans la BDTopo, deux bâtiments peuvent être superposés. Par exemple, un bâtiment industriel au rez-de-chaussée peut être surmonté d'un bâtiment quelconque, à fonction résidentielle par exemple. Lors du calcul de densité, les deux surfaces sont cumulées et le rapport à la surface de la maille est donc surestimé. Une fonction a donc été développée pour identifier les bâtiments qui sont superposés. Dans le cas où un bâtiment A est superposé à un bâtiment B, le bâtiment A n'est pas pris en compte dans le calcul de la densité surfacique bâtie.

Voici un premier cas (figure 2-12) où un bâtiment industriel est superposé à un bâtiment quelconque, seule la surface du bâtiment le plus grand est prise en compte. Dans le deuxième cas (figure 2-13), on a un bâtiment avec une cour intérieure ; les surfaces représentées par les cours intérieures des îlots sont enlevées à la surface de l'îlot.

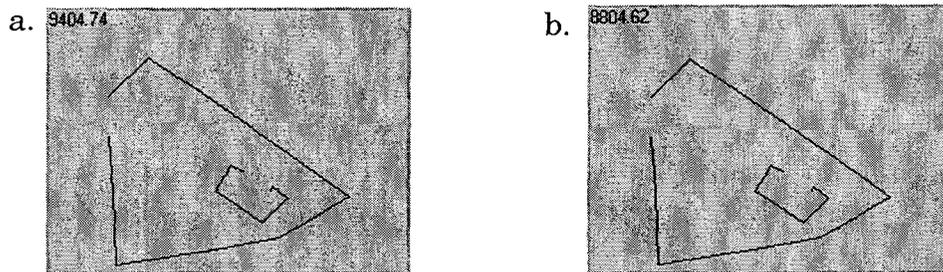


Figure 2-12: Surface en m^2 des bâtiments dans le cas où deux bâtiments sont superposés avant modifications du code (a) et après modifications (b).

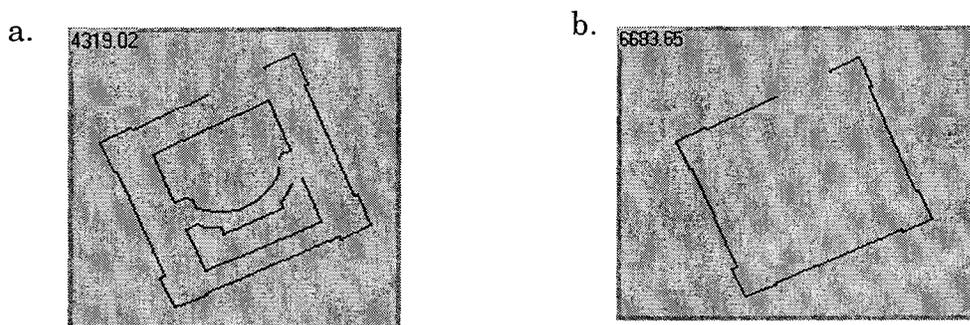


Figure 2-13: Surface en m^2 d'un bâtiment avec ou sans cours intérieures, respectivement (a) et (b).

Le cas de superposition de zones et de zone *vide* à l'intérieur d'une autre est également à prendre en compte pour la végétation. Il s'agit de deux catégories de végétation dont la première entoure complètement la seconde. Par exemple, une surface de bois peut être complètement entourée de broussailles. Dans la BDTopo, la zone entourée est saisie une première fois pour représenter un vide et une

deuxième fois pour représenter une autre sorte de végétation (figure 2-14). Cette vérification permet de valider toutes les formules de calcul de densité.

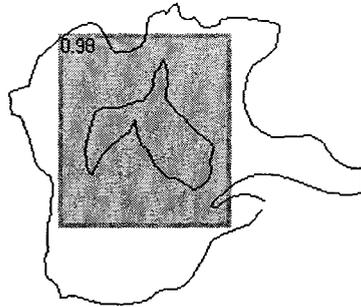


Figure 2-14: Densité surfacique d'une zone de végétation comprise dans une autre zone de végétation

2.3.2.3 Validation du calcul de l'espacement moyen entre les bâtiments

Calculer l'espacement moyen entre les bâtiments n'a de sens réel que par rapport au concept de *rue canyon*. En effet, une rue canyon peut être définie par le rapport entre la hauteur des bâtiments et l'espacement entre les deux rangées de bâtiments. Il est alors apparu nécessaire de valider les calculs sur un quartier où cette variable a véritablement un sens aérodynamique. Par contre, lorsque la densité bâtie est moins importante, il est difficile de mesurer l'espacement entre les bâtiments car il faut choisir si on tient compte de tous les bâtiments autour d'un bâtiment ou seulement des bâtiments en vis-à-vis ou encore seulement des bâtiments les plus proches. Il est ainsi quasiment impossible de définir de manière précise l'espacement moyen entre les bâtiments dans une zone d'habitat collectif, par exemple, et la valeur obtenue n'a que peu de sens.

Plusieurs méthodes ont été testées pour calculer l'espacement moyen entre les bâtiments contenus dans un rugoxel :

- **Première méthode** : on peut supposer qu'entre chaque bâtiment ou îlot de bâtiment passe une route, calculer l'espacement entre les bâtiments revient alors à calculer la largeur des axes routiers.
- **Deuxième méthode** : entre les bâtiments, se trouvent non seulement les axes routiers mais cet espacement correspond également à la zone non-bâtie. On peut alors calculer la surface non-bâtie et la longueur totale de route dans une maille. En considérant que la surface non-bâtie est celle d'un polygone, on peut déduire la largeur de ce polygone par le rapport entre la surface et la longueur du polygone (longueur des axes routiers).

- **Troisième méthode** : utiliser la formule développée par Dupont (2001) :

$$E = \frac{(1 - \lambda_B)^* \sqrt{S_{bati}}}{2\lambda_B} \quad (Eq. 2.13)$$

avec E l'espacement entre les bâtiments, λ_B la densité surfacique bâtie et S_{bati} la surface bâtie.

- **Quatrième méthode** : cette méthode est inspirée du calcul du rapport hauteur des bâtiments sur largeur des rues par Burian *et al.* (2002). A partir des coordonnées minimales et maximales, en x et y , d'un bâtiment A, des droites sont tracées verticalement et horizontalement (figure 2-15). Les intersections avec les bâtiments voisins sont, de cette manière, identifiées. Il reste alors à calculer la distance entre la coordonnée de A et le point d'intersection du bâtiment voisin, en ramenant cette intersection à la perpendiculaire (d_1 et d_2). Seules les plus petites distances sont conservées afin de ne pas prendre en compte les bâtiments qui ne sont pas directement voisins de A. De même la droite projetée ne doit pas couper les côtés de A pour ne prendre en compte que les bâtiments qui sont en vis à vis du point d'origine de la droite.

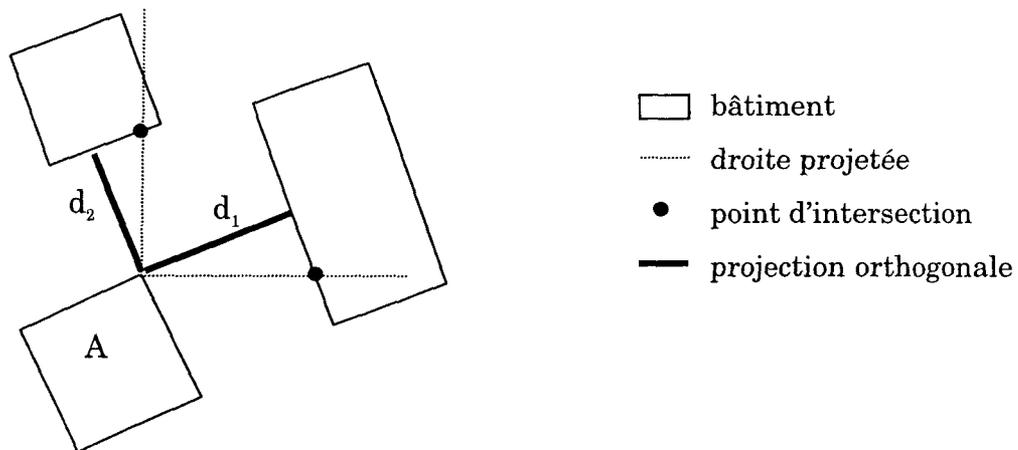


Figure 2-15: Calcul des distances d_1 et d_2 entre deux bâtiments à partir de la coordonnée maximale en y du bâtiment A.

- **Cinquième méthode** : on calcule tout d'abord la surface non-bâtie et le périmètre de cette surface. On assimile cette surface à un rectangle, connaissant le périmètre et la surface de ce rectangle, il est alors possible d'en déduire sa largeur d'après la formule :

$$L = \frac{\frac{P_{non-bati}}{2} - \sqrt{\frac{P_{non-bati}^2}{4} - 4S_{non-bati}}}{2} \quad (Eq. 2.14)$$

avec $S_{\text{non-bâti}}$, la surface non-bâtie et $P_{\text{non-bâti}}$, le périmètre de la surface non-bâtie.

Des tests ont été réalisés sur un quartier de Marseille afin d'estimer la précision des résultats. Une zone-test a été définie sur le centre-ville de Marseille (figure 2-16). Cette zone a été choisie car la densité bâtie est importante et les rues peuvent être assimilées à des rues canyons.

Sur la zone-test, chaque espacement entre deux bâtiments a été mesuré sous MapInfo puis moyenné pour chaque maille. Ces mesures servent de référence pour évaluer la qualité des résultats obtenus pour les différentes méthodes (tableau 2-2a).

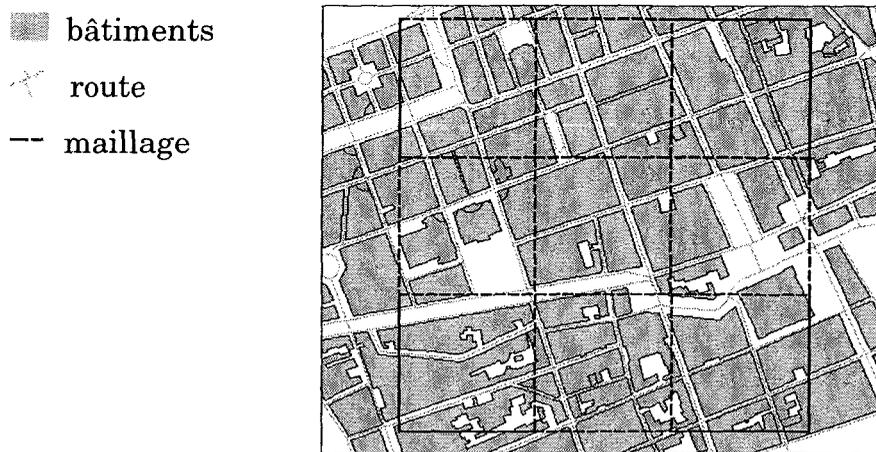


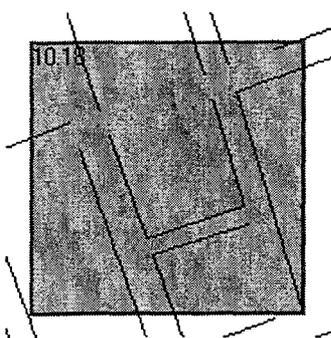
Figure 2-16: Zone-test pour calculer l'espacement moyen entre les bâtiments : quartier du centre-ville.

a.				b.			
	16.43	11.14	9.81		1.56	0.64	1.86
	20.43	16.83	25		4.44	3.75	3.78
	14.13	9.66	11.9		2.38	1.62	1.95

Tableau 2-2 : Espacement moyen entre les bâtiments sur la zone-test (figure 2-16) calculé manuellement (a) et différence entre les résultats de (a) et les résultats de la cinquième méthode (b). Les cellules des tableaux correspondent aux mailles de la zone-test.

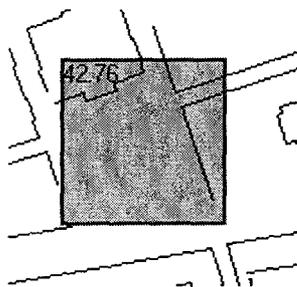
La première méthode sous-estime l'espacement moyen entre les bâtiments car elle ne tient compte que de la largeur de l'axe routier sans comptabiliser les zones occupées par des places publiques ou par les trottoirs. La deuxième méthode est

plus précise, à +/- 5 m près ; cette différence est due à la présence de plusieurs axes routiers entre deux bâtiments et des places publiques. La troisième méthode ne donne également pas de très bons résultats, tout comme la quatrième qui semblait pourtant la plus précise. Cette dernière est fortement influencée par la direction principale des bâtiments et également par la taille et l'orientation nord-sud / est-ouest des mailles. Enfin, la cinquième méthode sous-estime encore légèrement l'espacement moyen entre les bâtiments. On peut estimer la précision de ce calcul à 2.5 m (tableau 2-2b). Cependant, pour les cellules qui englobent un espace vide, comme une place publique, les écarts sont beaucoup plus grands et varient autour de 4 m.



Dans ce premier cas (figure 2-17), la cellule est de 100 m. On remarque que dans cette zone le maillage coupe les rues de manière oblique et chaque bâtiment est bien pris en compte pour mesurer l'espacement qui les sépare. Manuellement, on trouve un espacement moyen de 10.06 m pour cette cellule.

Figure 2-17: *Espacement moyen entre les bâtiments : cas de rues*



Dans ce deuxième cas (figure 2-18), la maille de 100 m comporte une large place de plus de 80 m de large (de gauche à droite). Mais cette fois-ci le maillage coupe la rue qui se trouve en bas de l'image ce qui ne permet pas de rendre compte de l'espacement réel entre les bâtiments entourant cette place. On peut supposer que la taille de la maille est trop petite mais même en l'agrandissant, de manière à englober tous les bâtiments, le résultat n'est pas satisfaisant. Manuellement, on trouve un espacement moyen de 36.8 m.

Figure 2-18: *Espacement moyen entre les bâtiments : cas d'une place publique*

2.3.2.4 Validation du calcul du périmètre moyen des bâtiments

Le périmètre moyen des bâtiments est calculé sans tenir compte des cours intérieures des îlots de bâtiments. En revanche, lorsque deux bâtiments sont superposés, le périmètre des deux bâtiments est calculé. Enfin, lorsqu'un bâtiment est coupé en deux par le maillage, seule la partie réelle du bâtiment est comptabilisée (figure 2-19).

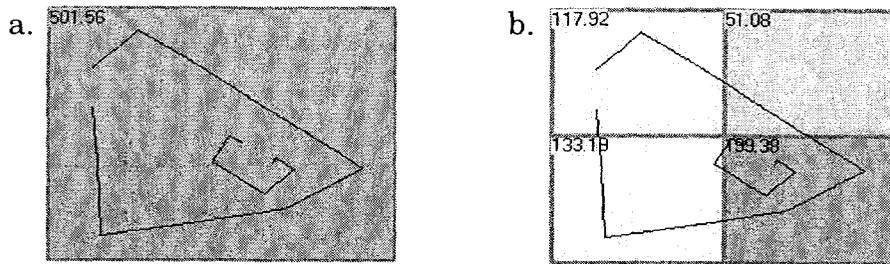


Figure 2-19: Somme des périmètres des deux bâtiments superposés, non découpés (a) et découpés par le maillage (b).

Le calcul du périmètre d'un bâtiment a été vérifié sous MapInfo et donne une précision à 0.3 m près. Cette différence peut être due à une imprécision des mesures sous MapInfo.

2.3.2.5 Validation du calcul de la longueur et de la largeur des axes routiers et de la densité des surfaces goudronnées

La longueur de chaque axe routier est calculée puis la somme est réalisée dans chaque rugoxel. En comparant les résultats obtenus avec MapInfo, on obtient des résultats similaires à 0.4 m près.

Pour la largeur des axes routiers, elle est calculée en fonction du nombre de voies sachant qu'une voie mesure 3.5 m de large. La largeur des axes routiers a été vérifiée sur des photos aériennes. En centre-ville, ils sont principalement à deux voies avec quelques axes à une voie. Mesurée sous Mapinfo, la largeur des axes varie de 4 m à 8 m pour les axes à une voie et de 7.5 m à 10 m pour les axes à deux voies. D'autres mesures ont été réalisées dans un quartier d'habitat individuel : la largeur moyenne des routes à deux voies est de 7.8 m mais si la densité bâtie diminue la largeur moyenne augmente à 8.8 m. Enfin, d'une manière plus générale, les axes à 3 voies ont une largeur de 18 m et les axes à 4 voies de 20 m.

Les vérifications n'ont pas été plus approfondies car la largeur des axes d'un même nombre de voies varie d'un quartier à un autre selon la structure et l'organisation des bâtiments. De plus, les photos aériennes ne sont pas prises à la verticale du sol, les bâtiments sont donc légèrement « penchés » ce qui ne permet pas de réaliser des mesures très précises, la rue étant en partie cachée par les bâtiments. Utiliser la largeur moyenne de 3.5 m peut donc être remis en cause mais vue la diversité des valeurs qui varient non seulement d'un quartier à l'autre mais également en fonction de la densité bâtie, il semble difficile de quantifier la sous-

estimation de la largeur des voies par DFMap. Ce point est repris en parti au chapitre 4 à travers l'estimation des surfaces imperméables.

Enfin, pour calculer la densité des surfaces goudronnées, le nombre moyen de voies aurait pu être pondéré par la longueur des axes routiers mais cette précision n'apportait pas des résultats significativement plus proches de la réalité.

2.3.2.6 Validation du calcul du nombre de bâtiments par cellule

Cette formule est simple à valider car il suffit de compter le nombre de bâtiments par cellule. Dans le rugoxel en haut à gauche (figure 2-20), un bâtiment est coupé en deux parties par le maillage (bâtiments en gras) mais il est considéré comme un seul bâtiment. Dans les rugoxels à droite, on reconnaît le bâtiment de la Préfecture (cf. figure 2-7) avec ses deux cours intérieures ; elles ne sont pas prises en compte dans le calcul. Par contre, ce même bâtiment est comptabilisé quatre fois à cause du découpage par le maillage ce qui entraîne une surestimation du nombre de bâtiments au total. D'un autre côté, les bâtiments contigus sont représentés par une seule entité dans la BDTopo qui sous-estime alors, à ce niveau là, le nombre réel de bâtiments dans une cellule.

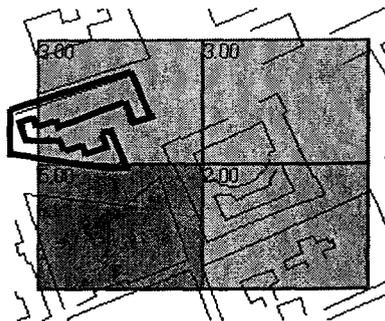


Figure 2-20: Nombre de bâtiments par cellule

2.3.3 Validation des fonctions secondaires

Les fonctions secondaires correspondent aux fonctions qui utilisent les fonctions de base dans leur calcul.

2.3.3.1 Densité surfacique des bâtiments avec choix de la hauteur

La hauteur des bâtiments et la densité surfacique sont deux formules dont les résultats ont déjà été validés ; il reste alors à vérifier que seuls les bâtiments à une certaine hauteur sont pris en compte dans le calcul de la densité.

L'exemple figure 2-21 montre deux bâtiments de même surface, l'un de 30 m de haut et l'autre de 40 m. La densité bâtie de la zone regroupant ces deux bâtiments est de 0.24. Si on impose une hauteur minimale de 35 m pour calculer la densité bâtie, elle est alors de 0.12.

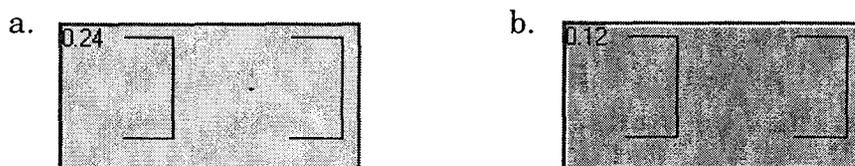


Figure 2-21: Densité bâtie au niveau du sol (a) et au-dessus de 35 m (b)

2.3.3.2 Densité surfacique des zones goudronnées

Les surfaces goudronnées sont calculées en multipliant la somme des longueurs des axes routiers dans une cellule par la largeur moyenne des routes. Sachant que la largeur des routes est légèrement sous-estimée, la densité surfacique des axes routiers sera également sous-estimée. Des précisions sur les mesures seront amenées dans le chapitre 4.

2.3.3.3 Hauteur moyenne des bâtiments et écart type

La hauteur moyenne de chaque bâtiment a été validée. La hauteur moyenne des bâtiments dans un rugoxel est pondérée par la surface du bâtiment.

Sur la figure 2-22a se trouve deux bâtiments, le plus petit mesure 30 m de haut avec une surface de 450 m² et le plus grand 40 m avec une surface de 932.7 m² (mesures réalisées sous Autocad). La hauteur moyenne des bâtiments est bien pondérée par leur surface.

Sachant qu'il y a une différence de 10 m dans la hauteur de ces deux bâtiments, l'écart type est de 5 m (figure 2-22b).



Figure 2-22: Hauteur moyenne (a) et écart-type de la hauteur des bâtiments (b).

2.3.3.4 Volume moyen des bâtiments et volume pondéré par la surface du bâtiment

Cette fonction utilise la hauteur moyenne des bâtiments et leur surface. Ces deux fonctions ont été validées précédemment.

D'après les mesures des bâtiments précisées ci-dessus, le volume moyen des bâtiments est de 25403 m^3 . Avec pondération par la surface du bâtiment, le volume moyen est de $29558,7 \text{ m}^3$. La différence vient de la précision à 0.01 près des calculs (figure 2-23).



Figure 2-23: Volume moyen des bâtiments (gauche) et pondéré par la surface (droite)

2.3.3.5 Compacité des bâtiments

Cette fonction utilise la surface et le périmètre des bâtiments, deux fonctions validées précédemment.

Le bâtiment comporte une cour intérieure qui a été découpée lors du tracé du maillage (figure 2-24). La compacité est alors calculée pour le bâtiment rayé dans le rugoxel en haut à gauche.

D'après les mesures réalisées sous Autocad, on a une surface bâtie de 3377.2 m^2 avec un périmètre de 240.76 m . La compacité calculée est alors de 0.85 . On remarque une variation de 0.01 car les résultats sont arrondis lors de l'affichage des valeurs.

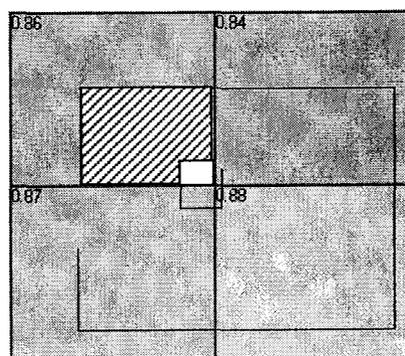


Figure 2-24: Compacité moyenne d'un bâtiment composé d'une cour et découpé par le maillage

2.3.3.6 Densité surfacique frontale et latérale

Ces deux fonctions sont calculées selon le même principe : définir la surface qui est face ou parallèle à la direction du vent. Elles utilisent le calcul de la hauteur moyenne de bâtiment.

Dans le cas du bâtiment de la figure 2-25, pour un vent de nord, la largeur de la paroi frontale est représentée par D_F et la dimension de la paroi latérale par D_L . Ces dimensions correspondent à la différence entre les coordonnées minimales et maximales en x et en y.

$$D_F = 846906 - 846874$$

$$D_L = 114575.3 - 114543.5$$

Sachant que la hauteur du bâtiment est de 30 m et la surface de la maille de 6300 m², le calcul est validé.

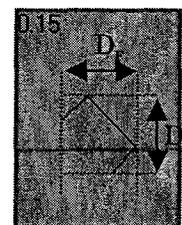


Figure 2-25: Densité frontale et latérale pour un vent de nord

Ce calcul ne prend pas en compte les effets d'abris d'un bâtiment sur un autre, la surface frontale est calculée pour chaque bâtiment comme s'il était isolé. Elle est cependant calculée de cette manière dans les modèles de longueur de rugosité (Raupach, 1994, Macdonald, 1998). Bottema tient compte de ce phénomène à travers le calcul de la hauteur de déplacement (Eq 2-11).

2.3.3.7 Les dernières fonctions

Il reste un certain nombre de fonctions dont la validation n'est pas présentée dans ce chapitre. Il s'agit de la classification Chaillou, du calcul des paramètres de rugosité et de fonctions secondaires des fonctions de base. Ces fonctions sont calculées à partir de variables comme la hauteur et la densité surfacique qui ont été validées ; il n'a donc pas été jugé nécessaire de reprendre chacune d'elles dans le détail. La vérification des calculs numériques a été réalisée par Long & Gabet (2002b).

2.4 Taille de la maille

La taille de la maille est un paramètre important à définir avant de calculer les différents paramètres descriptifs du tissu urbain. En effet, le calcul sur une maille permet de généraliser une information donnée ; celle-ci doit donc être ni trop petite,

ni trop grande. Dans le cas d'une maille trop petite, elle ne représente qu'un fragment du tissu urbain, dans le cas contraire, elle risque d'englober plusieurs sortes de tissu et de donner une valeur moyenne qui n'est pas représentative de la surface. De plus, une seule taille sera utilisée pour l'ensemble de la zone d'étude, elle doit donc correspondre et être adaptée à chaque type de tissu urbain.

Pour cela quatre quartiers-tests ont été définis ; ils sont représentés par des zones d'un kilomètre sur un kilomètre. Il s'agit du centre-ville (figure 2-26a), du quartier d'habitat collectif de la Rose (figure 2-26b), du quartier St Barnabé composé d'habitat individuel (figure 2-26c) et de la zone industrielle de la Delorme (figure 2-26d), en arrière du PAM. Ces quartiers ont été définis de manière arbitraire, à partir de la visualisation du bâti, en essayant de sélectionner une zone homogène. Des extraits des photos aériennes correspondant à ces quatre quartiers sont présentés en annexe C (photos 1 à 4).

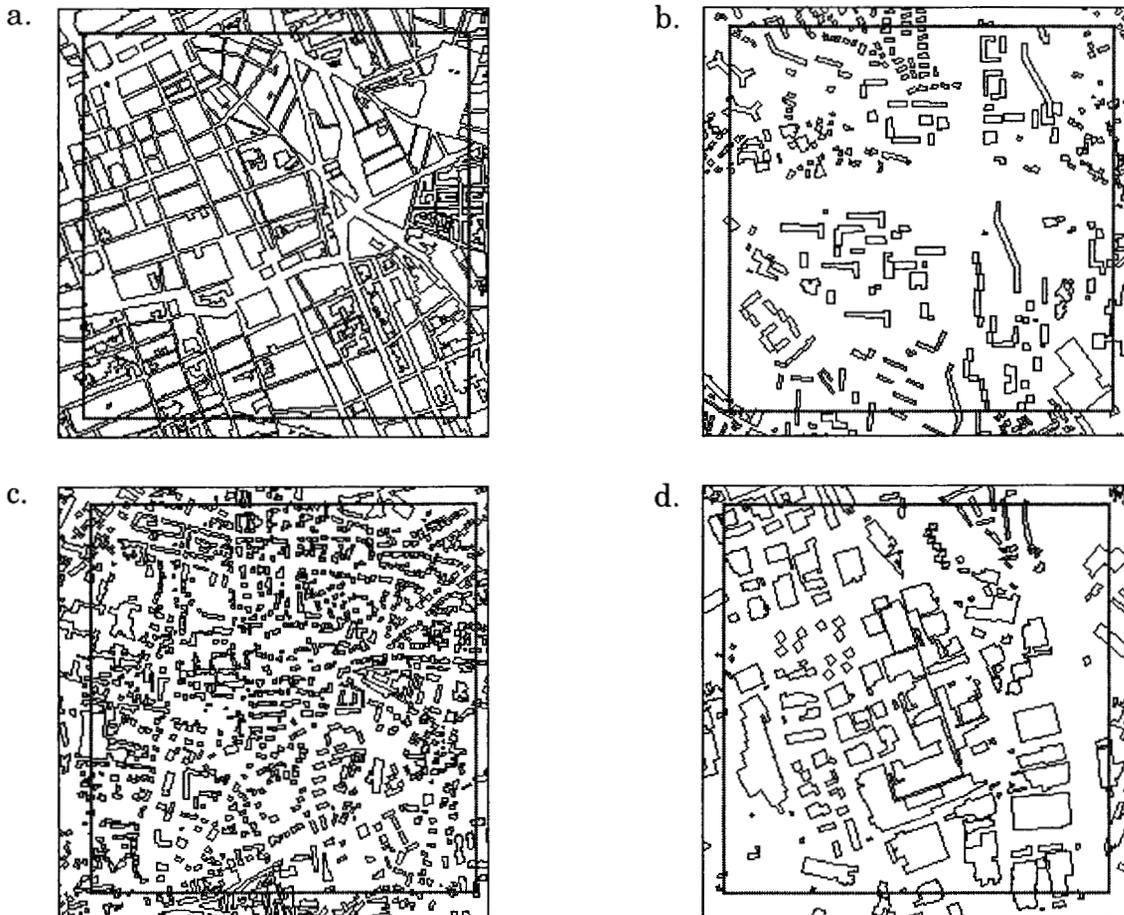


Figure 2-26: Zones-test de 1 km^2 du quartier centre-ville (a), d'une zone d'habitat collectif (b), d'une zone d'habitat individuel (c) et d'une zone industrielle (d) pour valider la taille des mailles.

Pour chacune de ces zones, la densité bâtie, la hauteur moyenne des bâtiments, l'écart type de la hauteur des bâtiments à l'intérieur du rugoxel, l'espacement moyen entre les bâtiments et le nombre de bâtiments par rugoxel ont été calculés. Ces cinq variables ont été choisies car elles dépendent directement du maillage et notamment de sa surface.

Trois tailles sont testées : 50 m, 100 m et 200 m. Par simple visualisation du maillage sur le bâti, on peut se rendre compte que la maille de 50 m n'est pas adaptée au quartier du centre-ville car elle n'englobe qu'un fragment du tissu urbain. En effet, le centre-ville se compose d'îlots de bâtiments dont les dimensions varient autour de la centaine de mètres. Le choix porte donc entre une résolution de 100 ou 200 m. Des statistiques descriptives ont été calculées afin de juger de la dispersion ou de l'homogénéité des séries selon ces deux résolutions pour les quatre types d'habitats (tableaux 2-3 à 2-6). Le nombre de bâtiments par rugoxel a été remplacé par le nombre de bâtiments par hectare afin de rendre comparables les résultats des deux résolutions.

CENTRE -VILLE	Densité surfaccique bâtie		Hauteur moyenne des bâtiments (m)		Écart type de la hauteur des bâtiments (m)		Espacement moyen entre les bâtiments (m)		Nombre de bâtiments par hectare	
	100m	200m	100m	200m	100m	200m	100m	200m	100m	200m
Résolution										
Moyenne	0.60	0.60	16.52	16.49	2.44	2.76	16.16	16.82	7.28	4.6
Médiane	0.62	0.61	16.63	16.09	2.23	2.56	13.15	14.91	7.00	4.5
Ecart type	0.15	0.10	2.82	1.96	1.15	0.72	9.77	6.39	2.07	0.93
Maximum	0.88	0.74	26.51	21.18	5.46	4.26	76.81	32.62	15.0	7
Minimum	0.05	0.41	10.94	13.08	0.21	1.52	6.29	9.25	3.00	3.25

Tableau 2-3 : Statistiques calculées sur des paramètres morphologiques des bâtiments du centre-ville pour une résolution de 100 m et 200 m.

COLLEC -TIF	Densité surfaccique bâtie		Hauteur moyenne des bâtiments (m)		Écart type de la hauteur des bâtiments (m)		Espacement moyen entre les bâtiments (m)		Nombre de bâtiments par hectare	
	100m	200m	100m	200m	100m	200m	100m	200m	100m	200m
Résolution										
Moyenne	0.14	0.14	14.42	15.47	4.38	7.37	31.55	50.68	3.99	3.05
Médiane	0.14	0.12	11.38	12.21	1.86	5.84	31.49	48.66	3.00	2.5
Ecart type	0.09	0.07	11.08	7.80	5.19	4.68	19.45	14.56	2.85	1.92
Maximum	0.50	0.41	45.18	40.12	21.93	18.29	84.38	76.30	15.0	8.75
Minimum	0.00	0.06	0.00	5.61	0.00	0.57	0.00	29.12	0.00	0.75

Tableau 2-4 : Statistiques calculées sur des paramètres morphologiques d'une zone d'habitat collectif pour une résolution de 100 m et 200 m.

ZONE INDUS.	Densité surfaccique bâtie		Hauteur moyenne des bâtiments (m)		Ecart type de la hauteur des bâtiments (m)		Espacement moyen entre les bâtiments (m)		Nombre de bâtiments par hectare	
	100m	200m	100m	200m	100m	200m	100m	200m	100m	200m
Résolution										
Moyenne	0.31	0.31	7.95	8.28	1.65	2.41	26.97	46.67	3.79	2.57
Médiane	0.30	0.35	7.77	8.16	1.53	2.34	27.73	39.49	4.00	2.5
Ecart type	0.21	0.16	2.71	1.86	1.35	0.92	16.64	27.84	1.99	1.11
Maximum	0.91	0.69	15.81	12.26	6.44	4.42	82.70	127.0	12.0	5.25
Minimum	0.00	0.01	0.00	4.99	0.00	0.55	0.00	17.91	0.00	0.75

Tableau 2-5 : Statistiques calculées sur des paramètres morphologiques d'une zone d'habitat individuel pour une résolution de 100 m et 200 m.

HAB. INDIV.	Densité surfaccique bâtie		Hauteur moyenne des bâtiments (m)		Ecart type de la hauteur des bâtiments (m)		Espacement moyen entre les bâtiments (m)		Nombre de bâtiments par hectare	
	100m	200m	100m	200m	100m	200m	100m	200m	100m	200m
Résolution										
Moyenne	0.22	0.22	7.14	7.20	2.12	2.25	20.45	22.49	12.4	10.5
Médiane	0.21	0.22	6.65	6.96	1.84	2.06	19.14	21.33	12.0	10.2
Ecart type	0.08	0.04	2.27	1.65	0.98	0.81	5.96	4.80	4.21	3.15
Maximum	0.49	0.30	13.56	10.00	4.81	3.86	41.16	35.6	29.0	19.7
Minimum	0.08	0.15	3.56	4.84	0.81	1.12	11.31	15.33	4.00	5.75

Tableau 2-6 : Statistiques calculées sur des paramètres morphologiques des bâtiments d'une zone industrielle pour une résolution de 100 m et 200 m.

Pour le calcul de la densité, la résolution n'a pas d'importance, du moins pour la valeur moyenne, car la densité d'une maille de 200 m est égale à la moyenne des densités des quatre mailles de 100 m correspondantes.

La comparaison entre la valeur moyenne et médiane permet de voir la dispersion des valeurs de la série ; plus elles sont proches, plus la distribution de la série est proche de la normale. On remarque que pour les deux résolutions, la moyenne et la médiane sont très proches voire égales quel que soit le quartier. Ce sont les variables espacement moyen entre les bâtiments et nombre de bâtiments par hectare qui semblent les moins homogènes et les plus sensibles aux effets de taille. En effet, l'écart type de ces deux variables semble être plus important lorsqu'on a une résolution de 100 m, ce qui peut apparaître logique car avec une résolution de 200 m, une certaine homogénéisation du tissu est réalisée.

En revanche, l'écart type de la hauteur des bâtiments calculé par cellule permet de rendre compte de la variabilité des données à l'intérieur des rugoxels. Pour le centre-ville et les zones d'habitat individuel, les valeurs moyennes et médianes des écarts types restent très proches pour les deux résolutions. Pour les deux autres quartiers, la différence entre les moyennes pour les deux résolutions est plus importante ; l'écart type est plus important en moyenne pour la résolution de 200 m mais on note également que l'écart type de cette variable est plus faible, ce qui montre une plus grande homogénéité des valeurs avec une résolution de 200 m.

Vu le mitage du tissu urbain de Marseille, la maille de 200 m est conservée car on peut noter tout d'abord une différence notable entre chacun des paramètres pour ces quatre quartiers. En effet, la hauteur moyenne par exemple du centre-ville est de 16.5 m, elle est de 15.5m pour le quartier La Rose, de 8.3 m pour la zone industrielle et de 7.2 m pour le quartier St Barnabé. De plus, réaliser un certain lissage du tissu urbain à travers le maillage n'est peut être pas à remettre en cause car le tissu urbain est une combinaison de structures de petite taille.

Enfin, la maille de 100 m a une taille trop fine pour qualifier le tissu du centre-ville car ses composants ont une dimension supérieure à la centaine de mètre, les objets seraient alors forcément très découpés par le maillage et donc non représentatifs de la réalité.

2.5 Conclusion

Une trentaine de variables est ainsi calculée à partir de la BDTopo ; elles permettent de décrire le tissu urbain d'une ville, d'un point de vue morphologique et aérodynamique, et les MOS. Elles sont calculées à l'aide du logiciel DFMap, développé afin d'extraire les informations contenues dans la BDTopo et de les transposer sur une grille. Un SIG est construit à partir de ces variables et documente la zone d'étude de Marseille.

La phase de validation de ce logiciel a été une partie importante de ce travail de recherche car il permet la création d'une nouvelle base de données qui est directement utilisée pour analyser le tissu urbain de la ville de Marseille, d'où l'intérêt de s'assurer de sa qualité avant de débiter toute analyse. Les résultats obtenus aux différents tests sont satisfaisants et montrent la précision des calculs effectués.

Le choix de la taille de la maille est également important ; ce choix a été fait en faveur de la maille de 200 m d'après les résultats statistiques obtenus. La maille de 200 m permet de réaliser un certain lissage du tissu urbain. De plus, cette taille permet de limiter les temps de calcul et la taille des fichiers ; la précision apportée par un maillage de 100 m n'a pas été jugée nécessaire par rapport à l'augmentation du temps de calcul que cela aurait provoqué. Ce choix de 200 m s'avère fonctionnel dans la suite de cette étude.

Une base de données a ainsi été mise en place et va permettre d'analyser la zone d'étude de Marseille dans l'objectif de délimiter des zones homogènes pouvant avoir une influence sur les conditions atmosphériques.

Chapitre 3: Analyse du tissu urbain de Marseille

Le tissu urbain d'une ville peut être défini comme la superposition ou l'imbrication de 2 ensembles : le réseau des voies de communications et les constructions (Panerai *et al.*, 1999). C'est la relation entre la parcelle, c'est-à-dire une unité de sol urbain orientée à partir de la rue, et la rue qui structure le bâti. L'IAURIF (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Île de France) définit également le tissu urbain comme une combinaison organisée d'éléments urbains dont l'assemblage constitue une zone urbanisée. Pour le cas des villes européennes, on retrouve des quartiers et une structure typiques : le centre-ville entouré le plus souvent d'un péricentre, puis d'une ou plusieurs couronnes périphériques et enfin d'une grande périphérie englobant le plus souvent des noyaux villageois et un habitat périurbain (Laborde, 1994).

Le tissu urbain de Marseille est le résultat actuel des différentes politiques urbaines menées lors du dernier siècle et de la mode architecturale traditionnelle propre à la région. Dans ce chapitre, son étude est menée de manière quantitative grâce aux données calculées par le logiciel DFMap à partir de la BDTopo. Un SIG a été construit avec les différentes variables statistiques ainsi calculées, qui vont permettre d'analyser la structure de la ville et de définir des zones homogènes selon des critères morphologiques et les MOS.

3.1 Description du tissu urbain marseillais à partir de la BDTopo

Parmi la trentaine de variables calculées par DFMap, une dizaine seulement a été sélectionnée dans le SIG pour analyser les MOS et le tissu urbain de Marseille. Tout d'abord trois variables définissent les MOS : la densité surfacique bâtie, la densité de la végétation et la densité des zones goudronnées, représentées seulement par la surface des axes routiers. Dans un deuxième temps, le tissu urbain est défini d'un point de vue morphologique à l'aide de quatre variables : la compacité moyenne des bâtiments, la hauteur moyenne, le périmètre et le volume

moyens des bâtiments. Deux autres variables renseignent sur la disposition et la répartition des bâtiments dans l'espace : l'espacement moyen entre les bâtiments et le nombre de bâtiments par cellule.

Cette analyse est effectuée sur deux effectifs différents : le premier correspond à l'ensemble des observations, soit 6300 cellules (18 km * 14 km) et permet, en outre, une analyse complète des MOS de la zone d'étude. On parlera dans la suite du texte de **la zone d'étude de Marseille** pour désigner les analyses portant sur l'effectif de 6300 cellules. Le deuxième effectif regroupe seulement les cellules où la densité surfacique bâtie est supérieure à 0, soit 3846 cellules. Il permet de s'intéresser plus spécifiquement à l'espace bâti et donc au tissu urbain de la ville. On parlera cette fois-ci du **tissu urbain marseillais** lorsque les analyses porteront uniquement sur cet effectif de 3846 cellules.

Pour réaliser cette description, des outils statistiques (statistiques descriptives, histogrammes) et cartographiques sont utilisés. L'histogramme permet d'analyser la distribution de la série. Il est formé de rectangles de même base dont la hauteur est proportionnelle à l'effectif compris dans chaque classe. Le nombre de classes est défini selon deux formules mathématiques où n est l'effectif :

- la formule de Huntsberger : $5 \log n$
- la formule de Brooks Carruthen : $1+3.3 \log n$

Le tableau 3-1 donne les résultats arrondis de ces deux formules pour les deux effectifs utilisés dans cette étude. Le nombre de 16 classes a alors été retenu car il semble être un juste milieu entre le résultat des deux formules pour les deux effectifs.

Effectifs	Formule de Huntsberger	Formule de Carruthen
6300	19	14
3846	18	13

Tableau 3-1 : Nombres de classes calculés selon la formule de Huntsberger et celle de Carruthen

La carte est l'outil qui permet de représenter une variable dans l'espace. Une discrétisation de la série doit également être faite en fonction de sa distribution. Seulement 7 paliers sont retenus car au-delà de 8 classes l'œil humain ne distingue plus les différences de couleur (Beguin & Pumain, 2000). Le seuil de chaque classe est théoriquement choisi en fonction de la distribution de la variable ; dans le cas présent, la plupart des distributions sont dissymétriques (figures 3-1 à 3-7), on ne peut donc pas utiliser les valeurs centrales, les valeurs de dispersion ou les

quartiles pour réaliser cette discrétisation car elles ont peu de sens et ne sont pas représentatives de la série. Les seuils des classes sont alors fixés en fonction des ruptures de pentes de l'histogramme.

3.1.1 Les modes d'occupation des sols de l'agglomération marseillaise

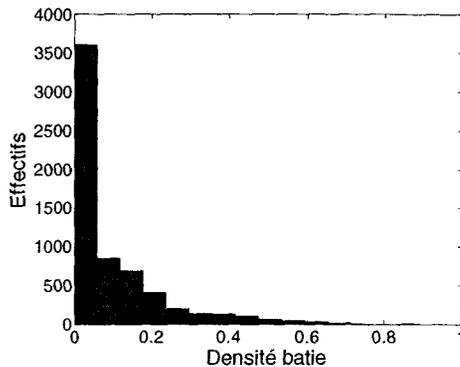
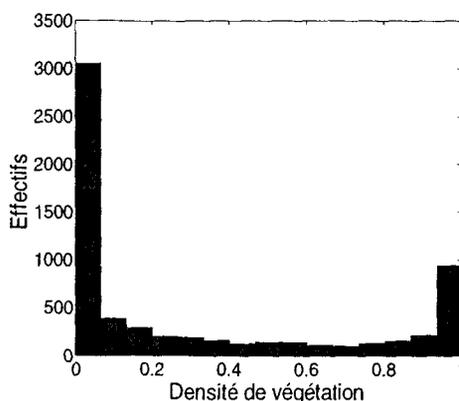


Figure 3-1: Distribution de la variable densité bâtie

Trois types de MOS ont été définis d'après la BDT_{Topo}. Tout d'abord, la densité bâtie est en moyenne de 0.09 sur l'ensemble de la zone d'étude mais cette valeur est assez peu représentative de la série car la distribution de la densité bâtie est fortement dissymétrique avec un fort étirement vers les valeurs maximales (figure 3-1).

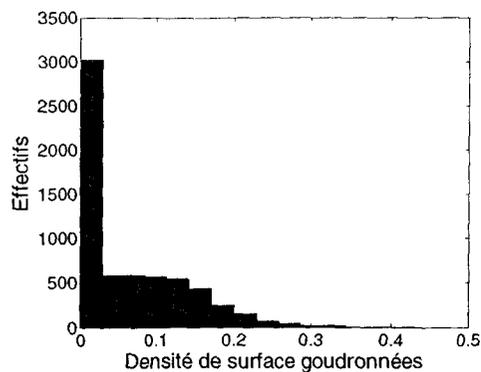
En effet, d'après les valeurs des premier et troisième quartiles, 50 % de l'espace est bâti entre 0 et 13%. Si on considère seulement le tissu urbain, la densité moyenne est de 0.15 mais cette valeur n'est également pas très représentative de Marseille car l'écart type est de 0.13, ce qui montre l'hétérogénéité du tissu urbain.

La représentation spatiale de cette variable confirme par ailleurs la variabilité de la densité bâtie sur l'agglomération (carte 3-1). La densité est en effet très élevée en centre-ville avec une densité supérieure à 0.47. Elle est plus faible sur les quartiers du péricentre et en arrière du PAM avec des densités comprises entre 0.2 et 0.47. En banlieue, les densités sont plus faibles et diminuent progressivement vers la zone rurale au profit de la densité de végétation qui augmente de la périphérie de la ville vers les collines. La végétation est résiduelle en banlieue et se mêle aux constructions (carte 3-2).



La densité de végétation est en moyenne de 0.3 sur la zone d'étude avec 50% de l'espace couvert entre 0 et 63% par de la végétation. La végétation occupe plus de surface que les bâtiments. La distribution de la série montre une opposition entre les zones de végétation (densité de 1) et les zones non-végétatives (densité de 0); entre les deux, une zone intermédiaire où la densité de végétation varie de 0.08 à 0.48 (figure 3-2).

Figure 3-2: Distribution de la variable densité de la végétation



Enfin, la densité des surfaces goudronnées est en moyenne de 0.06 sur l'ensemble de la zone d'étude. Cette variable a une distribution très dissymétrique avec une classe modale à 0 (figure 3-3). Elle présente également une grande variabilité avec un écart type de 0.07 et 50% des valeurs sont comprises entre 0 et 0.11.

Figure 3-3: *Distribution de la variable densité des surfaces goudronnées*

Si on considère seulement le tissu urbain de la ville, la moyenne s'élève à 0.10, la valeur de la médiane est très proche (0.09). La forme de l'histogramme se rapproche d'une distribution normale avec toutefois une dissymétrie positive. Cette variable est celle qui présente le moins de variabilité spatiale ; en effet la majorité du tissu urbain a une densité de surface goudronnée comprise entre 0.09 et 0.17. Les grands axes de circulation de Marseille se distinguent également avec les deux autoroutes qui arrivent au nord de la ville parallèlement à la côte et celle qui part vers l'est en direction d'Aubagne. L'avenue du Prado, le boulevard Michelet, en direction du sud, et les boulevards du Maréchal Juin et Françoise Duparc à l'est du centre-ville sont également identifiables (carte 3-3).

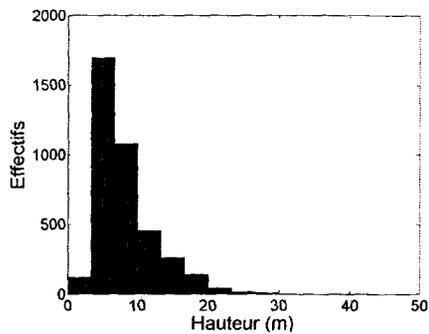
3.1.2 La morphologie des bâtiments du tissu urbain marseillais

La morphologie des bâtiments est étudiée à travers la hauteur, le périmètre, le volume et la compacité des bâtiments.

Autour du Vieux port, les bâtiments ont une hauteur comprise entre 14.5 et 20 m (carte 3-4), un périmètre qui varie entre 130 et 306 m (carte 3-5) et un volume situé entre 10000 et 40000 m³ avec quelques valeurs supérieures à 40000 m³ (carte 3-6). Les configurations spatiales des variables périmètre et volume sont très proches avec une deuxième auréole autour du centre-ville et dans la vallée de l'Huveaune où les valeurs sont plus faibles et une troisième zone, le nord-est de l'agglomération, où les bâtiments ont un périmètre qui varie de 40 à 65 m et un volume de 600 à 2000 m³.

La hauteur des bâtiments varie beaucoup plus d'un quartier à l'autre du tissu urbain marseillais que les deux variables précédentes. En effet, des zones sont caractérisées par des hauteurs de bâtiments supérieures à 20 m (carte 3-4) ; il s'agit de zones d'habitat collectif comme au sud de Marseille, les quartiers Mazargues, St Marguerite, St Tronc et St Loup, à l'est les quartiers La Pomme et la Rouguière et au nord les quartiers St Barthélemy, St Just, La Rose, St Jérôme et St Mitre (cf.

carte 1-3). Cette variable permet de mettre en évidence d'une part l'hétérogénéité du tissu urbain et d'autre part l'effet de mitage de l'espace urbain, conséquence du développement « incontrôlé » de la ville au cours du dernier siècle.



L'histogramme représentant la distribution de la série montre une distribution proche de la normale avec un étirement vers les valeurs maximales (figure 3-4). La hauteur moyenne est de 8.2 m avec un écart type de 2.5 m. 50% des hauteurs moyennes des bâtiments sont comprises entre 5.1 et 9.9 m.

Figure 3-4: Distribution de la variable hauteur des bâtiments

La distribution du périmètre et du volume des bâtiments est très dissymétrique avec un fort étirement vers les valeurs maximales, le maximum étant respectivement de 908 m et de 201267 m³ (figure 3-5). 50 % des valeurs de la série périmètre sont comprises entre 46 et 89 m ; pour le volume, 50 % des valeurs sont comprises entre 706 et 4350 m³.

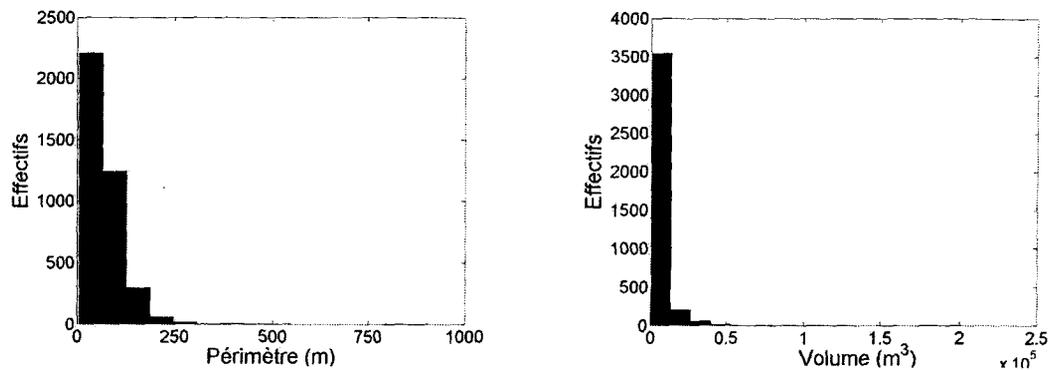
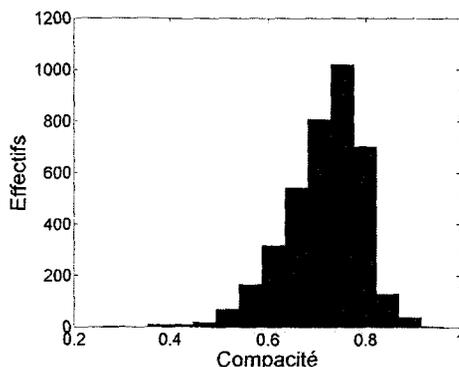


Figure 3-5: Distributions des variables périmètre (gauche) et volume des bâtiments (droite)



Enfin, la compacité des bâtiments permet de rendre compte de la forme plus ou moins découpée des bâtiments. La figure géométrique la plus compacte est le cercle, l'hexagone a une compacité de 0.95 et le carré de 0.88. La distribution de cette variable est proche de la normale ce qui signifie que la variabilité de la série est faible (figure 3-6).

Figure 3-6: Distribution de la variable compacité des bâtiments

En effet, la compacité moyenne est de 0.7 et l'écart type est 0.08, ce qui confirme la faible dispersion des valeurs de la série. 50% des valeurs sont comprises entre 0.66 et 0.77. D'un point de vue spatial, les bâtiments ont les formes les plus découpés en centre-ville élargi et dans la zone située en arrière du PAM avec une compacité inférieure à 0.68. En banlieue, les bâtiments ont des formes plus simples avec toutefois une forte variabilité spatiale (carte 3-7).

3.1.3 La répartition spatiale des bâtiments du tissu urbain marseillais

Le nombre de bâtiments par cellule permet de se rendre compte de la concentration des bâtiments sur un espace défini. Cette variable a une distribution asymétrique (figure 3-7) avec un étirement vers la valeur maximale (88 bâtiments dans une maille). 50% des cellules comptent moins de 16 bâtiments.

La répartition spatiale de cette variable met en évidence des quartiers de la ville (carte 3-8). Le centre-ville et le péricentre ressortent comme des quartiers où le nombre de bâtiments est faible comme dans la périphérie la plus éloignée du centre-ville. Dans le centre-ville, les bâtiments sont en réalité collés les uns aux autres pour ne former qu'une seule entité, un îlot urbain, qui est représenté dans la BDTopo par un seul objet. Les zones de lotissements, les quartiers résidentiels constitués de maisons individuelles, de villas apparaissent très nettement : le quartier à l'ouest de Notre Dame de la Garde, la bordure côtière de la Pointe Rouge et Montredon, qui se poursuit le long de la vallée de l'Huveaune, en englobant également le quartier St Anne (cf. carte 1-3). Plus au nord, on retrouve les deux poches du quartier St Barnabé avec à l'est le quartier St Julien et à l'ouest le quartier Bon Secours. Enfin au nord-est, Plan de Cuques ressort avec un nombre de bâtiments assez important par 4000 m². Des lotissements se distinguent également au nord-ouest de la ville.

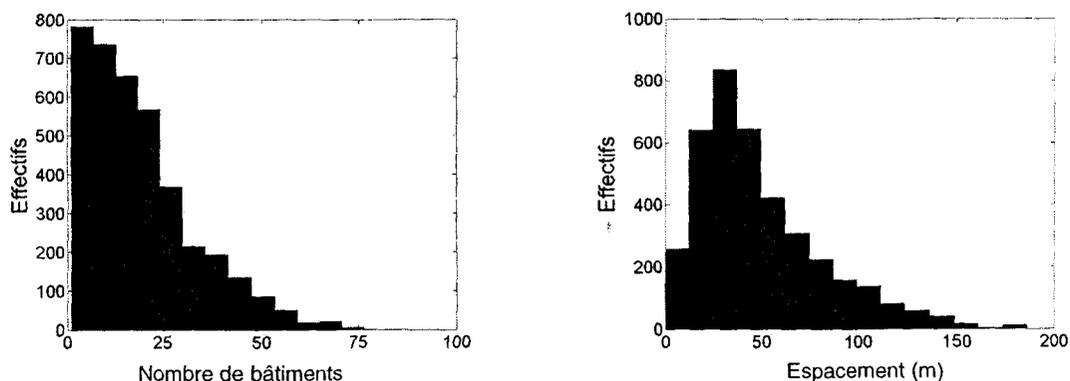


Figure 3-7: Distribution du nombre de bâtiments par cellule (gauche) et de l'espacement moyen entre les bâtiments (droite).

L'espacement moyen entre les bâtiments permet de se rendre compte de la structure de la ville ; cette variable est utilisée pour calculer le rapport entre la hauteur des bâtiments et l'espacement entre les bâtiments (c'est-à-dire la largeur de la rue en centre-ville). Ce rapport permet de définir le concept de « rue canyon » dans les quartiers où la densité bâtie est élevée ; cette variable sera simplement considérée comme une variable indicatrice du resserrement des bâtiments.

L'espacement moyen entre les bâtiments est de 48.3 m avec un maximum de 186 m. La distribution de cette variable est proche de la normale avec un étirement vers les valeurs maximales (figure 3-7). 50% des valeurs sont comprises entre 25.7 et 65.2 m et l'écart type est de 32.5 m, ce qui confirme l'hétérogénéité du tissu urbain. Cette variabilité est mise en évidence par la représentation spatiale de cette variable (carte 3-9). Dans les quartiers du centre-ville, du péri-centre et les quartiers où le nombre de bâtiments est très important, l'espacement entre les bâtiments est inférieur à 30 m. En banlieue, l'espacement entre les bâtiments est plus important dans les quartiers d'habitat collectif et devient supérieur à 60 m lorsque l'habitat est dispersé. On peut noter un effet de bordure de cette variable aux zones de transition entre les surfaces bâties et un autre type de surface comme la mer ou la végétation.

3.2 Identification des quartiers urbains : méthodologie

D'après l'analyse de la variabilité spatiale de ces dix variables du SIG, des quartiers semblent se dessiner, caractérisés par une structure morphologique et des MOS similaires. C'est pourquoi une méthodologie a été mise en place pour définir, d'une part, et délimiter, d'autre part, des quartiers dans le tissu urbain ayant un sens d'un point de vue climatologique. Il est nécessaire toutefois de rappeler l'objectif de cette discrétisation car les méthodes ne seront pas les mêmes selon le résultat voulu ou espéré.

L'objectif principal de cette classification est de mettre en évidence des zones homogènes et différentes entre elles pouvant avoir une influence sur la climatologie locale. Les paramètres qui ont le plus d'influence sur les conditions atmosphériques sont la morphologie des éléments de rugosité, leur densité, leur répartition dans l'espace. Les principaux éléments de rugosité sont représentés en milieu urbain par les constructions verticales et la végétation arbustive ; elles constituent alors des obstacles à l'écoulement des flux. Les MOS urbains correspondent aux surfaces bâties, de végétation, d'eau, naturelles ou artificielles et jouent un rôle important dans les bilans d'énergie. De ces caractéristiques, des zones plus ou moins homogènes peuvent être définies, on peut alors parler de **quartiers**

aérodynamiques car ils ont une signification surtout du point de vue de la dynamique de l'atmosphère.

Dans ce même objectif, des classifications ont été proposées par certains auteurs. En effet, Theurer (1999) a réalisé une classification du tissu urbain afin d'identifier différents quartiers à partir de paramètres comme la hauteur, la longueur, la largeur des bâtiments, la densité surfacique bâtie, la largeur de la rue, la distance entre le bâtiment et le milieu de la rue, le rapport entre la hauteur et la largeur des rues, la longueur de la rue (d'un croisement à un autre), l'espacement entre les bâtiments, le type de toit et enfin la végétation. Neuf types de quartiers dont deux zones d'espaces verts ont ainsi été mis en évidence sur trois villes de l'Allemagne de l'Ouest. Il s'agit du centre-ville, des zones industrielles, des zones commerciales, des zones d'habitat familial de un à deux étages, de zones de développement urbain dense de type résidentiel ou commercial de deux à trois étages, de zones de bâtiments disposés en rangées ou de bloc de bâtiments de deux à quatre étages, de zones de blocs d'immeubles en bordure des axes de circulation de deux à quatre étages, d'espaces verts constitués de quelques arbres et enfin de parcs avec des arbres ou des forêts. Les caractéristiques de chaque quartier sont définies et mises en relation avec les concentrations de polluants afin d'analyser l'influence de la ville sur la dispersion de la pollution.

Cianco & Ellefsen (1998) ont défini quinze types de zones urbaines selon la continuité des bâtiments (éloignés ou rapprochés), les fonctions des bâtiments (commerces, appartements, bureaux, usines, maisons, centres commerciaux modernes), et leur localisation dans la ville (le centre-ville, les docks, alignés le long des axes de circulation, à proximité d'un parking ou en lotissement). Ces quartiers sont définis par la densité bâtie, la hauteur et l'orientation des bâtiments, la forme et la réflectivité du toit, la surface et la réflectivité des surfaces imperméables, le pourcentage des surfaces au sol et des bâtiments à l'ombre des arbres, les surfaces de bois et vergers, les surfaces d'herbe, les surfaces de sol nu et de rochers et les surfaces d'eau. Cette classification a été réalisée afin d'étudier l'influence de la ville, et notamment la présence des arbres, sur la météorologie avec pour objectif de mieux gérer le développement et l'aménagement des villes pour améliorer la qualité de vie des citoyens.

Pauliet & Duhme (2000) ont par ailleurs réalisé une étude sur la ville de Munich permettant de délimiter des types de zones urbaines d'après leur MOS afin d'adapter les politiques urbaines à chaque type d'unité urbaine. Vingt-quatre types de MOS urbains sont identifiés et regroupés selon deux grandes catégories : les espaces construits définis par la continuité des bâtiments et le nombre d'étages, et les espaces ouverts avec des parcs ou des bois. Ces unités sont définies par les MOS mais également par des paramètres sociaux comme le nombre d'habitants ou de

voitures et des variables environnementales comme la température de surface, l'infiltration ou le ruissellement des précipitations, les émissions de dioxyde de carbone, l'énergie utilisée pour le chauffage...

Ces trois classifications ont été réalisées plus ou moins manuellement, par interprétation de diverses sources d'informations. Une méthode de classification plus « automatique » a été proposée par Chaillou (1996) pour réaliser une classification du tissu urbain d'après des critères morphologiques. Trois variables sont utilisées : la hauteur maximale des bâtiments, la continuité des bâtiments et la densité surfacique bâtie. Des seuils sont fixés afin de discrétiser chaque série en trois classes, puis ces classes sont combinées entre elles pour définir des zones urbaines ; les classes n'ayant pas d'objets sont supprimées.

3.2.1 Application de la méthode de Chaillou à Marseille

Cette méthode de classification (cf § 2.2.5.6) a été mise en place sur la ville de Nantes et donne des résultats encourageants. Cette méthode est appliquée ici sur la zone d'étude à partir de la hauteur maximale des bâtiments et de la densité surfacique des bâtiments. Seules ces deux variables ont été retenues car la continuité des bâtiments n'est pas définie à partir de la BDTopo. Un seuil a été fixé pour chacune des deux séries. Ce seuil est à 10 m pour la hauteur des bâtiments, ce qui correspond à 3 étages à peu près, et à 0.3 pour la densité bâtie. Quatre classes sont ainsi définies. Ces classes permettent de mettre en évidence des zones correspondant au centre-ville de Marseille, aux zones industrielles, aux zones d'habitat collectif et aux zones d'habitat individuel (carte 3-10). Ces résultats sont satisfaisants dans un premier temps mais la variabilité reste importante à l'intérieur de chaque classe. De plus, les zones d'habitat individuel sont regroupées en une seule classe alors que les densités bâties et les densités de végétation varient selon les quartiers. Des variables complémentaires peuvent être utilisées afin de mieux définir les zones car avec deux variables seul le tissu urbain est découpé en classes ; le reste de la zone d'étude n'étant pas défini par ces deux variables. Mais en augmentant le nombre de variables, la méthode devient compliquée à cause du nombre de combinaisons alors possible entre les variables discrétisées. C'est pourquoi d'autres méthodes sont testées afin de mettre en évidence une structure spatiale.

3.2.2 Les Méthodes de classification statistique

3.2.2.1 *Les méthodes linéaires*

Plusieurs méthodes statistiques sont employées pour réaliser des régionalisations de l'espace à partir de plusieurs types d'informations. Tout d'abord, les méthodes d'analyses multivariées comme l'analyse en composantes principales (ACP) ou l'analyse factorielle des correspondances (AFC) permettent d'extraire le maximum d'information sous une forme simple et cohérente à partir d'un ensemble important de données. Ces méthodes mettent en évidence les interrelations entre les variables, et les ressemblances et les oppositions entre les unités géographiques (Sanders, 1990). L'ACP est une méthode adaptée à tout type de données quantitatives alors que l'AFC est utilisée simplement avec des tableaux de contingences (où les lignes et les colonnes peuvent être sommées). Une condition majeure doit être vérifiée pour pouvoir appliquer une ACP à une matrice de données : les relations entre les variables doivent être linéaires. Cette méthode ne peut donc pas être utilisée dans le cas de Marseille, car aucune variable ne présente de relation linéaire avec une autre.

3.2.2.2 *Les méthodes de statistique non-paramétrique*

La statistique non-paramétrique propose des méthodes de classifications automatiques ne posant aucune condition de linéarité entre les variables. Ces méthodes sont apparues dans les années 30 et se sont réellement développées à partir des années 70 avec l'amélioration des capacités des ordinateurs. Ces techniques de classification ont été développées en collaboration entre mathématiciens et spécialistes d'autres disciplines. Elles sont très utilisées depuis plusieurs décennies dans des disciplines comme la biologie, la zoologie, la psychologie, la sociologie, la médecine, la géographie et la botanique.

En climatologie, ces méthodes de classification sont utilisées pour réaliser des régionalisations de l'espace en fonction d'un ou plusieurs paramètres météorologiques : par exemple, Gong & Richman (1995) ont réalisé une classification des précipitations sur le nord-est de l'Amérique. Ils ont réalisé une comparaison des résultats obtenus par l'utilisation de plusieurs méthodes de classifications automatiques. En géographie humaine, et pour ne citer que ces deux exemples, Buckley & Mookherjee (1999) ont utilisé également des méthodes de classification pour étudier les indicateurs de la qualité de vie d'une ville et classer ainsi les quartiers en fonction de leur qualité de vie.

Ces méthodes de classification peuvent être divisées en deux catégories : les classifications hiérarchiques (CH) et les classifications non-hiérarchiques (CNH). Les CH utilisent les dissemblances ou les distances entre les objets pour former des classes. Ces calculs de distance sont basés sur une dimension simple ou multiple. La méthode la plus directe pour calculer la distance entre deux objets dans un espace multidimensionnel est le calcul de la distance euclidienne. Avec un espace à n dimensions, cette mesure est celle des distances géométriques normales entre les objets u et v (Eq. 3-1).

$$d(u,v) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (u_i - v_i)^2} \quad (\text{Eq. 3-1})$$

Plusieurs méthodes sont proposées par les logiciels pour calculer les distances entre les objets mais nous retiendrons seulement la distance euclidienne dans cette étude (Gong & Richman, 1995). La construction d'une hiérarchie nécessite la connaissance d'une mesure de ressemblance entre les groupes appelée **indice d'agrégation** pour déterminer le moment où deux classes sont suffisamment similaires pour n'en former plus qu'une.

Les CH peuvent être ascendantes ou descendantes, la première méthode restant la plus utilisée. Elle consiste à partir d'une partition initiale où chaque classe est réduite à un élément, puis une nouvelle partition est construite en réunissant les classes selon l'indice d'agrégation, de façon à ce que la variance soit minimisée ; le procédé est poursuivi jusqu'à ce que tous les éléments soient regroupés en une seule classe. La méthode descendante part, au contraire, d'une classe qui contient tous les éléments qui sont ensuite répartis dans plusieurs classes jusqu'à ce qu'il y ait autant de classes que d'éléments (Diday *et al.*, 1982 ; Celeux *et al.*, 1989).

Les CNH sont des méthodes qui utilisent des algorithmes différents : une partition initiale des données est effectuée puis elle est modifiée afin d'obtenir une nouvelle partition qui révèle mieux la structure naturelle des données. La méthode des nuées dynamiques (*k-means* en anglais) est une CNH. Avec cette méthode, k points sont spécifiés comme les centres des k classes, la distance euclidienne entre chaque élément et les centres est calculée et les éléments sont assignés à la classe dont le centre est le plus proche. Les centres de chaque classe sont recalculés et la procédure précédente est réitérée jusqu'à ce que l'algorithme converge vers une position stable en minimisant à chaque itération un critère statistique, la variance.

La méthode des nuées dynamiques impose à l'utilisateur de faire deux choix : définir les centres des classes initiales et le nombre de classes. Pour déterminer le centre des classes initiales, plusieurs méthodes sont disponibles dans les logiciels

permettant des traitements statistiques (Matlab, Statistica, par exemple), k désignant le nombre de classes :

- Choix « sample » : k observations prises au hasard dans la matrice de données ;
- Choix « uniform » : k observations sélectionnées à intervalle régulier, l'intervalle étant défini au hasard ;
- Choix « cluster » : une première classification réalisée avec la méthode « sample » en prenant au hasard 10 % de la matrice de données ;
- Choix 1 : choix des observations maximisant la distance inter-classe initiale ;
- Choix 2 : observations à intervalles réguliers après tri des distances ;
- Choix 3 : les k premières observations ;
- Choix 4 : l'utilisateur choisit lui-même les k points. Cette dernière méthode ne sera pas testée car on recherche une méthode automatique qui ne nécessite pas d'étude préliminaire.

En revanche, il n'existe pas de méthode bien précise permettant de définir le nombre de classes pour des classifications automatiques ; ce choix se fait de manière plus ou moins aléatoire selon les résultats désirés et peut être modifié si le résultat obtenu n'est pas satisfaisant. Deux méthodes sont proposées, inspirées de méthodes appliquées à des classifications de données chronologiques et non spatiales comme c'est le cas de cette étude (Ramos, 2001 ; Yu & Chang, 2001) :

- la première consiste à sommer les écarts types d'une variable des k classes calculées et à les représenter sur un graphique en fonction du nombre de classes. On suppose que lorsque la somme des écarts types de cette variable n'évolue plus, les nouvelles classes créées n'apportent plus de nouvelle information à cette variable.
- la deuxième calcule le rapport entre la variance intra-classe d'une variable et la variance totale ; de la même manière, ce rapport est représenté sur un graphique en fonction du nombre de classes. Selon l'algorithme des nuées dynamiques, la variance intra-classe est minimisée tandis que la variance inter-classe est maximisée. En théorie, si on calcule le rapport entre la variance intra-classe et la variance totale, ce rapport vaut 1 lorsqu'on a une seule classe puis diminue lorsque le nombre de classes augmente et vaut à nouveau un lorsqu'on a autant de classes que d'individus. On peut supposer que le nombre de classes est optimum lorsque le rapport n'évolue plus ou change de sens.

Les deux méthodes de CH ou de CNH répondent à notre objectif de discrétiser le tissu urbain de Marseille mais seule la méthode des nuées dynamiques a été retenue pour cette étude car elle est la moins coûteuse en temps de calcul.

3.3 Identification des zones homogènes à Marseille : application de la méthode des nuées dynamiques

La méthode des nuées dynamiques a été appliquée à une matrice composée de 10 variables (la compacité des bâtiments, la densité bâtie, l'espacement moyen entre les bâtiments, la hauteur moyenne des bâtiments, le nombre de bâtiments par cellule, le périmètre moyen des bâtiments, le volume moyen des bâtiments, la densité de la végétation, la densité des surfaces goudronnées, la densité des surfaces d'eau) et 6300 observations (les cellules de 200 m * 200 m couvrant une zone de 18 km * 14 km). Les valeurs ont été centrées et réduites afin d'éviter les effets de taille entre les variables.

Tout d'abord, plusieurs tests ont été réalisés pour définir d'une part les centres initiaux des classes et d'autre part le nombre optimal de classes.

3.3.1 Tests des différentes méthodes définissant les centres initiaux des classes

Des tests ont été réalisés sur la matrice de données qui a été préalablement standardisée. Le nombre de classes a été fixé à 10.

Les trois premières méthodes (cf § 3.2.2) sélectionnent plus au moins au hasard des points pour définir les centres initiaux des classes, il est donc difficile de s'assurer qu'une méthode donne de bons résultats à la fin de chaque procédure lancée. Afin de choisir la méthode la plus robuste, 15 itérations ont été lancées pour chacun des choix. Les résultats ont été cartographiés. La classification a été jugée satisfaisante si au moins cinq classes étaient représentées, c'est-à-dire, la mer, la végétation, le centre-ville, l'habitat individuel dense (quartier St Barnabé par exemple), l'habitat individuel dispersé (carte 3-11). Si toutes ces classes n'étaient pas au moins identifiables, alors la classification a été jugée non satisfaisante (carte 3-12).

Pour le choix « sample », on obtient 11 cas satisfaisants sur 15, pour le choix « uniform », on obtient seulement 4 cas satisfaisants sur 15 et enfin pour le choix « cluster », 7 cas ont été jugés satisfaisants sur 15. C'est donc la première méthode qui semble fournir les meilleurs résultats. Cependant, malgré le faible pourcentage de réussite du choix « uniform », lorsqu'elle est jugée satisfaisante, la

classification obtenue est très détaillée, les dix classes représentant des quartiers distincts du tissu urbain (carte 3-13). Ces classifications peuvent être jugées de meilleure qualité d'un point de vue visuel que celles du choix « sample », mais le pourcentage de réussite est très faible.

Les trois dernières méthodes ont été testées d'après les valeurs moyennes des variables et l'homogénéité de chaque classe. Pour le choix 1, les anomalies positives des variables périmètre et volume des classes 2 et 6 sont importantes (figure 3-8). Elles représentent donc des bâtiments dont la taille est très supérieure à celles des autres bâtiments. Ces deux classes ont un faible effectif (respectivement 9 et 3 observations) ; un nombre trop important de classes peut expliquer la formation de classes aberrantes. Il reste à vérifier si ces classes ont une réalité spatiale ou non. Cependant, aucune classe ne représente l'hydrographie ; la classification n'est donc pas acceptable car tous les MOS ne sont pas reproduits.

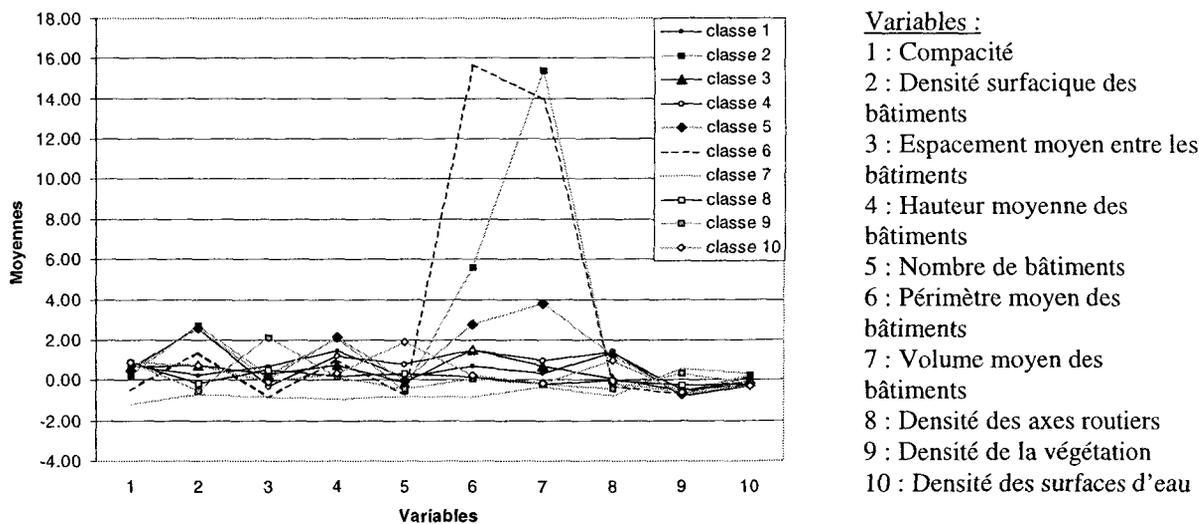


Figure 3-8: Moyennes des variables pour chaque classe calculée selon le choix 1.

Pour le choix 2, la classe 10 présente également une anomalie positive importante pour les variables périmètre et volume avec un effectif de 12 observations seulement (figure 3-9). Cette classe 10 correspond aux classes 2 et 6 de la classification précédente. Les MOS sont représentés par deux classes distinctes, respectivement la 5 et la 8 pour l'hydrographie et la végétation. Les classes 3 et 7 correspondent également à des zones de végétation mais avec une densité moins importante. Certaines classes définissant le tissu urbain ont des valeurs proches pour une même variable. Par exemple, les classes 9 et 10 ont des anomalies assez proches pour les variables densité bâtie et hauteur. De même, les classes 1 et 6

représentent des bâtiments dont la morphologie est similaire : les anomalies de la hauteur, du périmètre et du volume des bâtiments sont très proches.

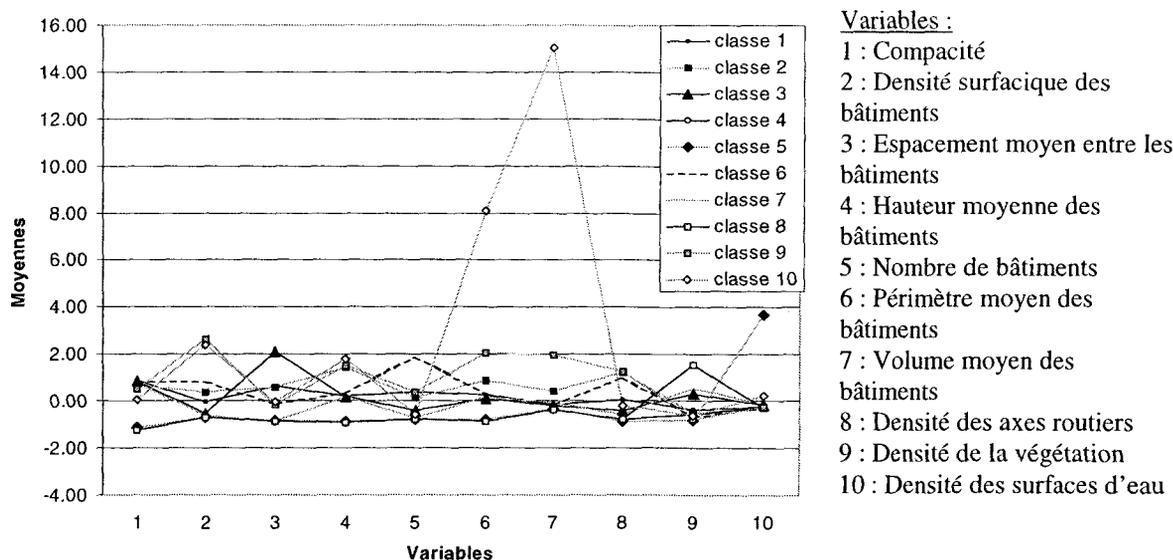


Figure 3-9: Moyennes des variables pour chaque classe calculée selon le choix 2.

Pour le choix 3, les classes 1 et 10 représentent respectivement les zones d'eau et les zones de végétation (figure 3-10). Les classes 4, 5 et 7 représentent également des bâtiments de même morphologie et se différencient par leurs anomalies de la densité, du nombre de bâtiment et de l'espacement moyen entre les bâtiments.

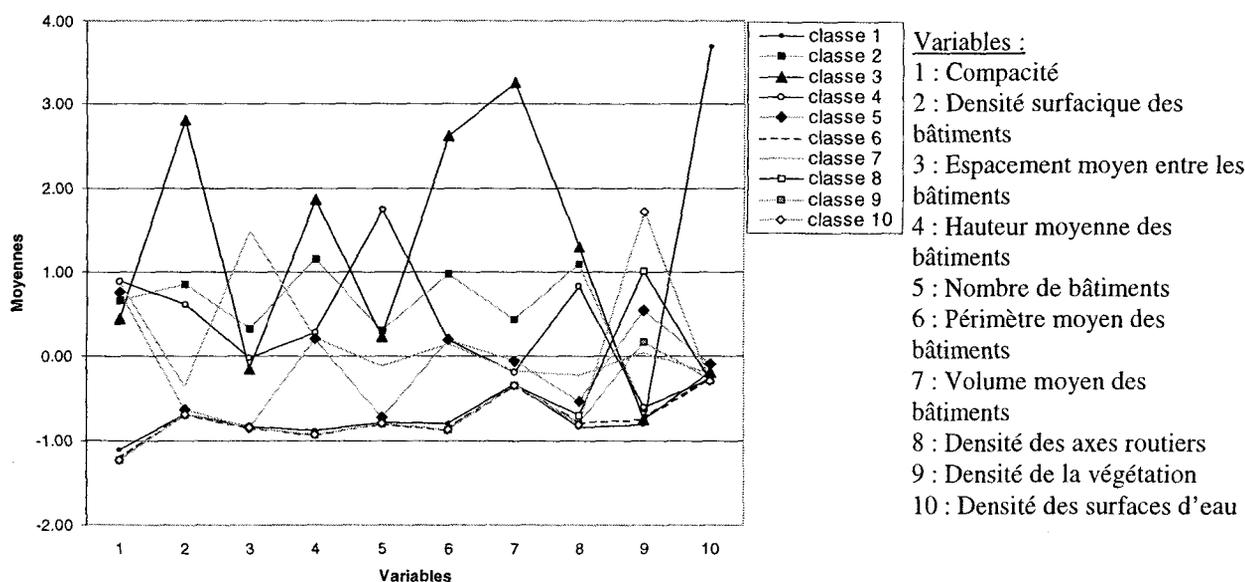


Figure 3-10: Moyennes des variables pour chaque classe calculée selon le choix 3.

Les écarts types de chaque variable dans chaque classe ont également été étudiés pour évaluer l'homogénéité des classes créées. Pour le choix 1, la majorité des écarts sont inférieurs à 2 mais la variable volume a un écart type de 4.95 pour la classe 6 et de 5.65 pour la classe 2 (figure 3-11). Cette dernière classe présente

des écarts types assez élevés également pour les autres variables. Ces valeurs mettent en évidence l'hétérogénéité de cette classe.

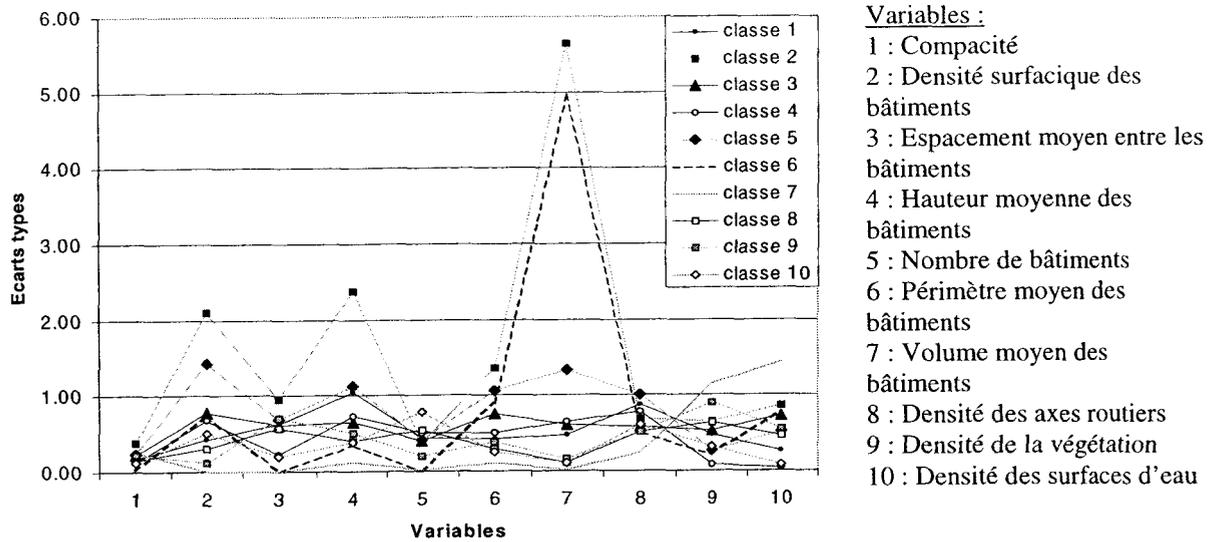


Figure 3-11: Écarts types des variables pour chaque classe calculée selon le choix 1.

Pour le choix 2, les écarts types sont inférieurs à 1 sauf pour la classe 10 qui est plus hétérogène que les autres classes (figure 3-12). Elle est composée de seulement 12 observations et présente une forte variabilité spatiale.

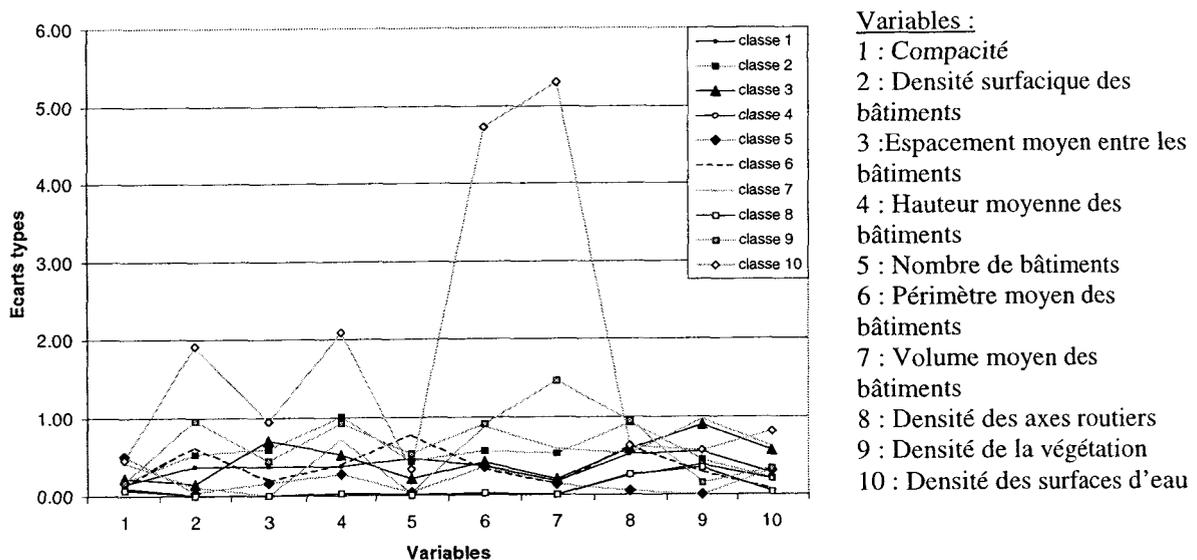


Figure 3-12: Écarts types des variables pour chaque classe calculée selon le choix 2

Enfin pour le choix 3, dans la majorité des classes, les écarts types sont inférieurs à 1 (figure 3-13). Cependant, pour la classe 3 la variable volume a un écart type de 3.13 et le périmètre de 1.79, ces valeurs sont toutefois inférieures aux écarts types calculés pour les deux classifications précédentes. Les classes semblent donc plus homogènes avec cette méthode.

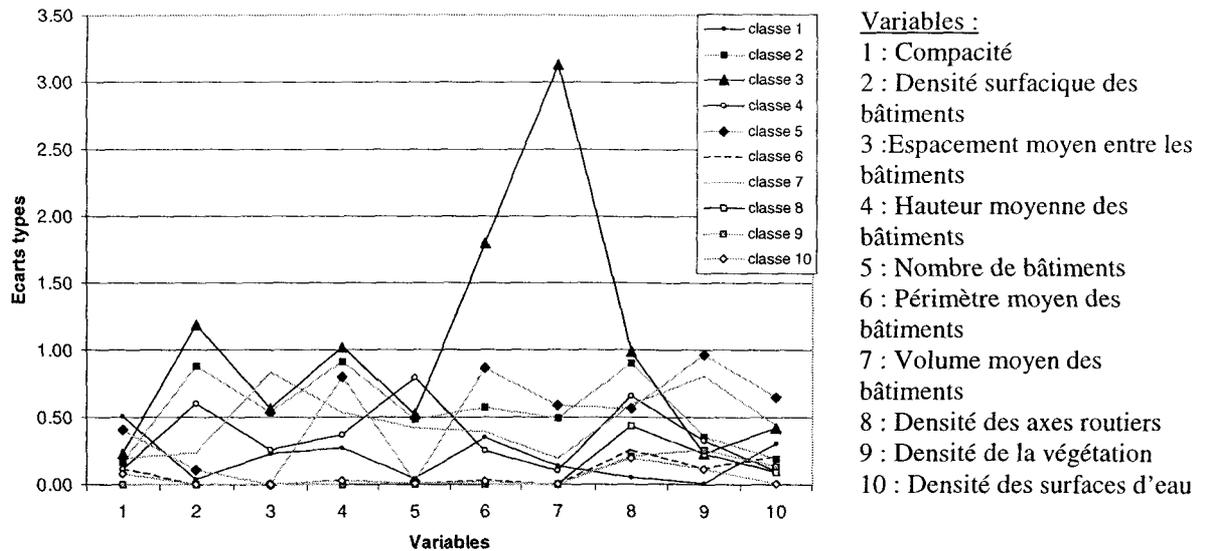


Figure 3-13: Écarts types des variables pour chaque classe calculée selon le choix 3

On peut donc conclure que la classification résultant du choix 1 est la moins satisfaisante car les écarts types sont les plus élevés ce qui signifie que les classes sont plus hétérogènes que celles des deux autres méthodes. En effet, si on somme les écarts types pour toutes les variables de toutes les classes on obtient 62.16 pour le choix 1, 50.00 pour le choix 2 et seulement 33.35 pour le choix 3. Le dernier choix donne les résultats les plus satisfaisants, mais avec le choix 2, une classe de seulement 12 observations se forme et présente une hétérogénéité importante ; ceci peut être dû à un nombre trop élevé de classes. Comme les écarts types restent inférieurs à 1 pour les autres classes, les classifications obtenues pour ces deux derniers choix ont été cartographiées afin d'identifier les réalités spatiales correspondant à ces classes. Les résultats sont présentés sur une grille dont les cellules sont de 200 m * 200 m. Les numéros des classes diffèrent selon les deux méthodes mais une même « réalité spatiale » est représentée de la même couleur (cartes 3-14 et 3-15). Le tableau 3-2 permet de mettre en correspondance les classes des deux méthodes et de préciser à quel type de structure urbaine ou de MOS elles correspondent.

Les résultats de ces deux méthodes sont assez proches ; toutefois, le tissu urbain est mieux décrit par la deuxième méthode. En effet, la structure de la ville est mieux révélée par les classes 1 et 3 de la méthode 2 qui correspondent à la classe 7 dans la méthode 3. En revanche, les MOS sont plus détaillés dans la méthode 3. En effet, les classes 4 et 8 de la deuxième méthode correspondent respectivement à deux classes de la troisième méthode (6 et 9, 10 et 8).

La classe de 12 observations de la méthode 2 est intégrée à la classe 3 de la troisième méthode ce qui explique la moyenne et l'écart type élevé de la variable volume pour cette méthode.

Classes de la méthode 2	Classes de la méthode 3	Identification de la classe
1	7	Habitat individuel peu dense
2	2	Habitat volumineux et haut (collectif et industriel)
3	7	Très faible densité bâtie
4	6	Sol sans information
5	1	Mer
6	4	Habitat individuel dense
7	5	Zone de végétation et quelques habitations
8	10	Zone de végétation de forte densité
9	3	Centre-ville
10	3	Gros Bâtiments
8	8	Zone de végétation (densité <1)
4	9	Zone de végétation et sol sans information

Tableau 3-2 : Correspondance et signification des classes entre les méthodes 2 et 3.

Enfin, un dernier test a été réalisé en déplaçant les 20 premières observations de la matrice à la fin de cette dernière pour tester si le fait de prendre les k premières observations influence ou non le résultat de la classification.

La figure 3-14 présente les écarts types de chaque variable pour chaque classe selon le choix 2. On obtient le même résultat que ceux obtenus avec la matrice initiale. Par contre, pour le choix 3, ce changement apporte de nouveaux résultats : en effet une classe apparaît avec un écart type élevé (figure 3-15), il s'agit de la classe 5 où l'écart type est de 4.72 pour le périmètre et de 5.3 pour le volume. Cette classe ne comporte que 12 observations. Les autres valeurs restent majoritairement inférieures à 1. Les deux classifications donnent alors des résultats quasi identiques.

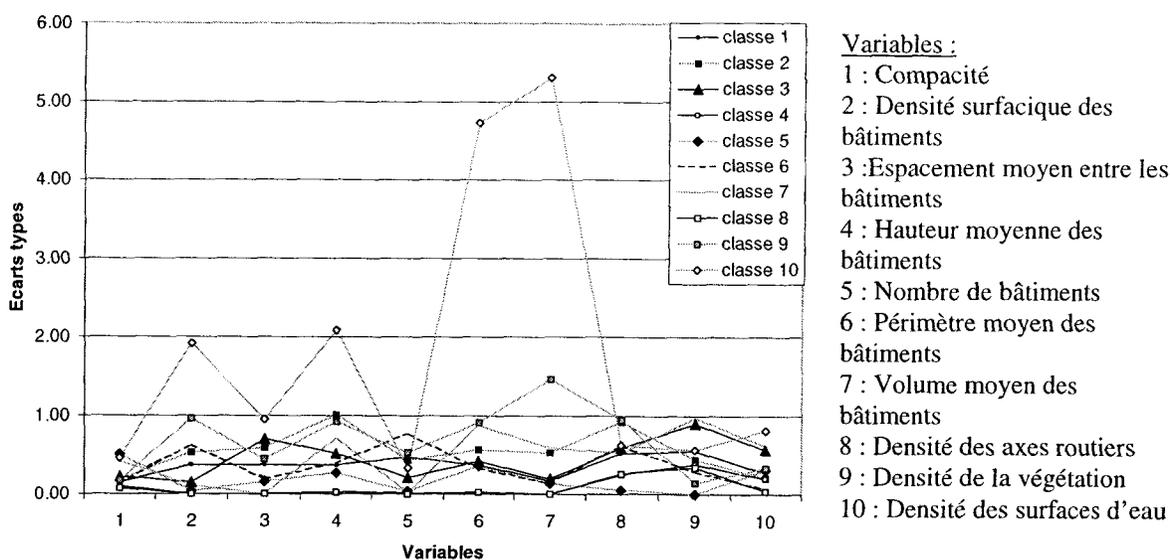


Figure 3-14: Écarts types des variables pour chaque classe calculée selon le choix 2 sur une matrice avec les 20 premières valeurs déplacées à la fin.

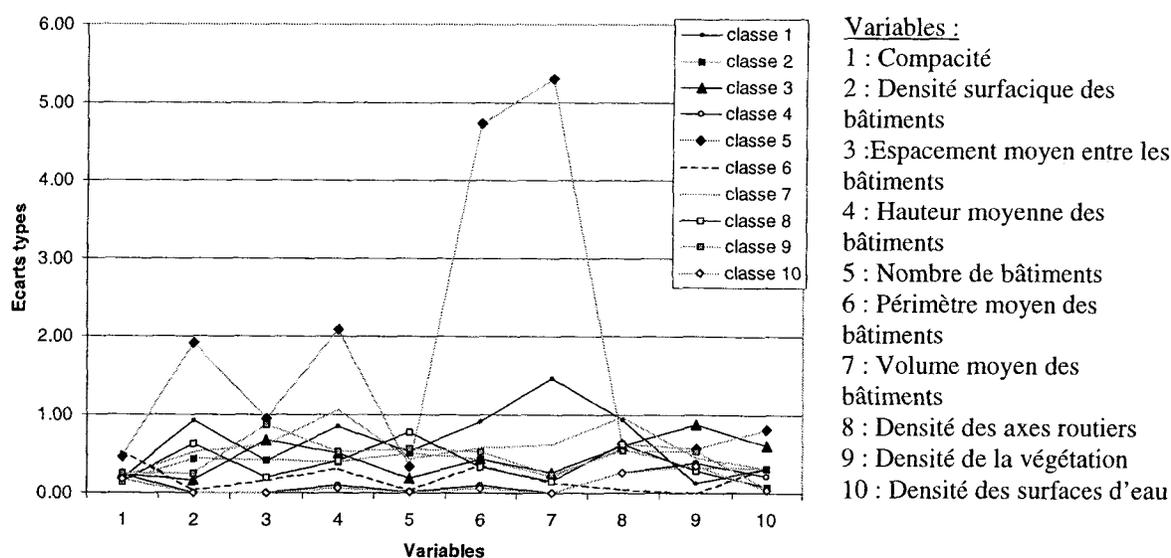


Figure 3-15: Écarts types des variables pour chaque classe calculée selon le choix 3 sur une matrice avec les 20 premières valeurs déplacées à la fin.

Cette nouvelle classification a été cartographiée (carte 3-16) afin de la comparer avec la carte 3-14. On remarque que la classe 5 est représentée par des cellules très dispersées, cette classe correspond à la classe 10 de la carte 3-14. On retrouve l'équivalent de chaque classe dans les deux classifications. Toutefois les effectifs des classes diffèrent légèrement entre les deux classifications. Avec cette nouvelle classification, le tissu urbain apparaît plus détaillé avec une classe supplémentaire par rapport à la carte 3-14 mais les autres MOS sont moins précis.

Ce dernier test ne permet pas de confirmer l'utilisation de la troisième méthode pour définir les centres initiaux des classes, car une classe de faible effectif se forme comme pour la deuxième méthode. Par contre, le choix 2 permet d'avoir une stabilité des résultats quelle que soit la disposition de la matrice, les résultats convergeant toujours vers la même classification.

En conclusion, les choix « sample », 2 et 3 donnent les meilleurs résultats. Les tests sont poursuivis pour ces trois méthodes.

3.3.2 Tests pour définir le nombre de classes

Les deux méthodes proposées pour définir le nombre de classes sont testées sur deux variables : la densité surfacique bâtie et la densité de la végétation. Ces deux variables sont jugées représentatives à la fois de la morphologie et des MOS. Elles sont testées pour les trois méthodes retenues pour définir les centres initiaux des classes. Les classifications sont lancées les unes après les autres en définissant au départ le nombre de classes. La procédure repart du début de chaque classification avec une classe supplémentaire.

D'une manière générale, la somme des écarts types augmente avec le nombre de classes. Cependant, pour la densité bâtie et le choix 3, on note une stabilisation à partir de sept classes (figure 3-16). Pour le choix 2 et « sample », on remarque un important décrochement après sept classes ce qui laisse supposer que les nouvelles classes créées ont un fort écart type, c'est-à-dire une hétérogénéité importante.

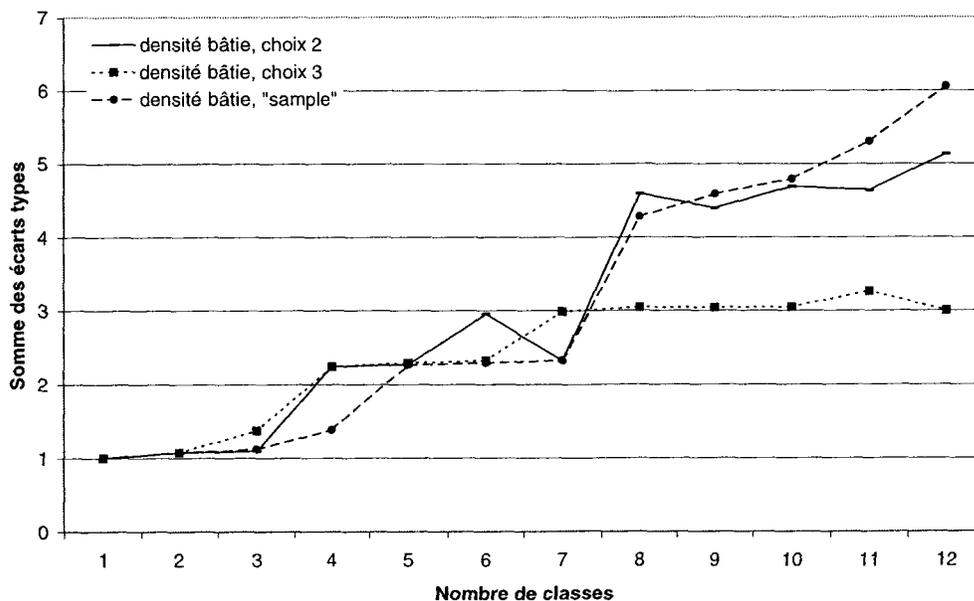


Figure 3-16: Somme des écarts types de la densité bâtie en fonction du nombre de classes selon les choix 2, 3 et « sample ».

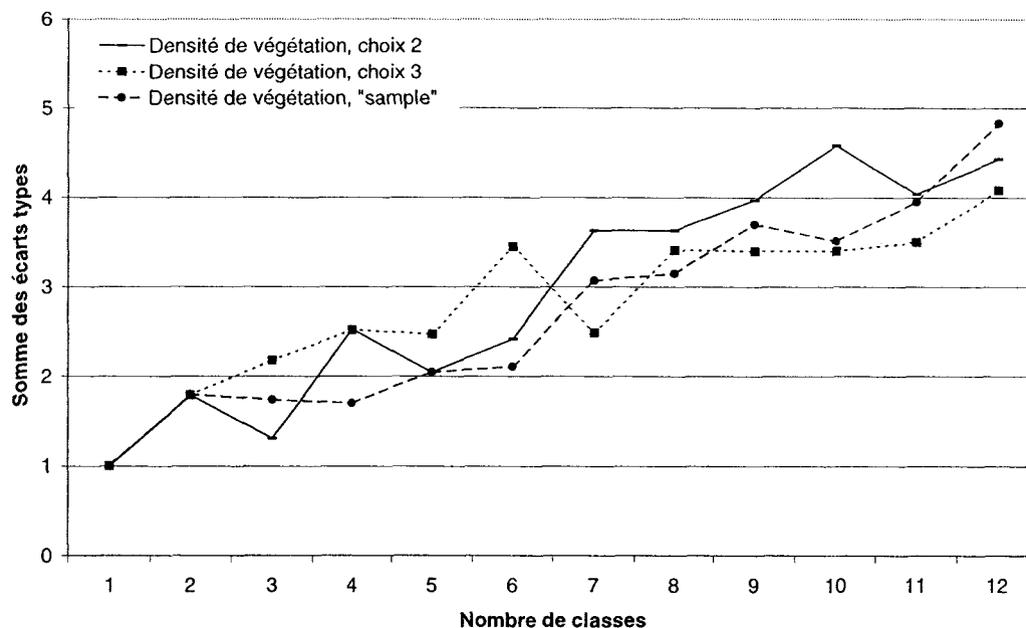


Figure 3-17: Somme des écarts types de la densité de végétation en fonction du nombre de classes selon les choix 2, 3 et « sample ».

Pour la variable densité de la végétation (figure 3-17) et pour le choix 3, l'augmentation est assez régulière malgré une somme des écarts types plus importante à six classes qu'à sept. Un décrochement est visible après cinq ou sept classes. A partir de huit classes, la somme des écarts types se stabilise. Le choix 2 ne fournit pas les mêmes résultats : la somme des écarts types augmente de manière assez chaotique sans marquer de rupture ou de stabilisation réelle ; seule une variation assez faible de la somme des écarts types peut être notée entre sept et neuf classes. Il en est de même avec la méthode « sample » qui marque un léger décrochement après six classes.

Le rapport entre la variance intra-classe et la variance totale est représenté en fonction du nombre de classes (figure 3-18). Pour la densité bâtie, ce rapport diminue de manière plus ou moins linéaire pour les trois méthodes jusqu'à quatre classes puis n'évolue presque plus. Pour les choix 2 et « sample », on note un léger décrochement après sept classes, puis le rapport se stabilise à nouveau. Il semblerait ainsi qu'au-delà de quatre classes la variance intra-classe n'évolue presque plus.

Pour la densité de la végétation, les trois courbes sont différentes (figure 3-19). Le rapport obtenu avec le choix 2 augmente fortement de trois à quatre classes puis diminue et se stabilise après cinq classes. Pour le choix 3, il diminue assez régulièrement jusqu'à six classes puis une rupture importante se produit entre six et sept classes. Le rapport est ensuite stable après sept classes. Enfin pour le choix « sample », le rapport diminue jusqu'à quatre classes puis se stabilise.

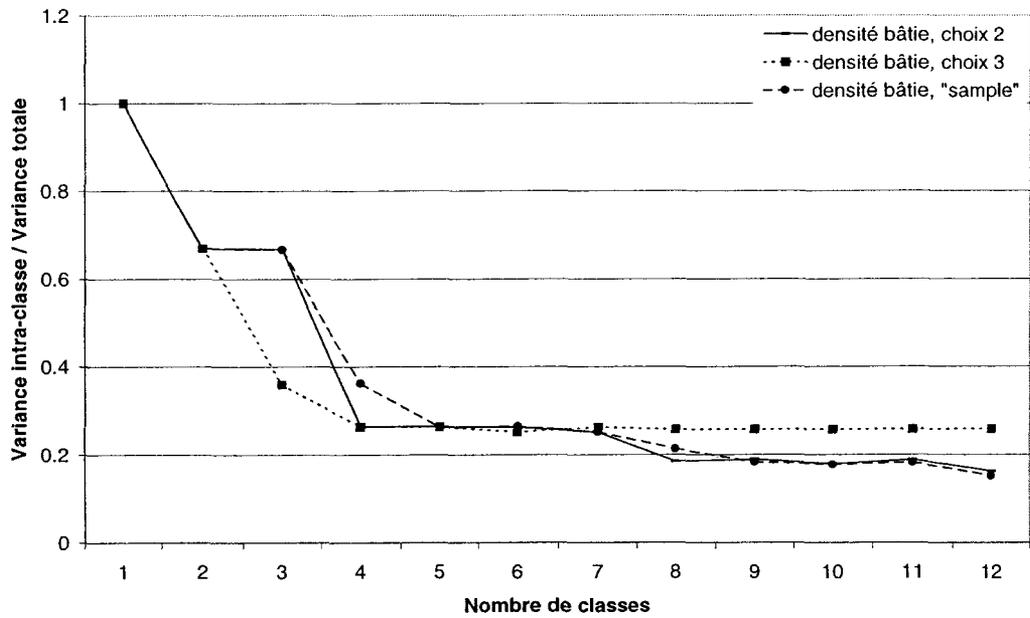


Figure 3-18: Rapport entre la variance intra-classe et la variance totale pour la variable densité bâtie en fonction du nombre de classes selon les choix 2, 3 et « sample ».

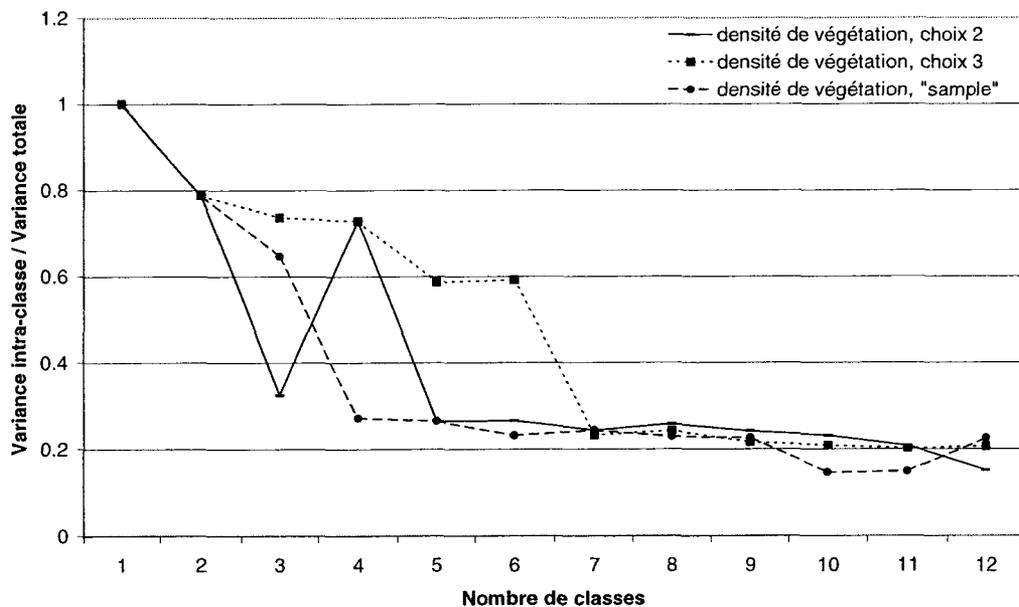


Figure 3-19: Rapport entre la variance intra-classe et la variance totale pour la variable densité de végétation en fonction du nombre de classes selon les choix 2, 3 et « sample ».

Sur ces quatre cas de figures, les résultats des deux méthodes permettant de définir le nombre de classes semblent plus cohérents lorsque la classification est réalisée à partir des choix 3 et « sample ».

Le nombre optimal de classes est difficile à déterminer car il ressort de ces tests une première rupture à partir de trois-quatre classes et une deuxième après sept-huit classes. Une classification en 3 classes revient à identifier les zones de végétation, les surfaces d'eau et les zones d'habitation sans distinction de densité bâtie, de hauteur.... On recherche une classification de l'espace marseillais plus détaillée, c'est pourquoi on choisira de réaliser une classification en sept ou huit classes, en utilisant pour déterminer le centre initial de chaque classe le choix 3 ou le choix « sample ». Enfin, la méthode de la somme des écarts types semble donner les résultats les plus cohérents entre les deux variables testées ; cette méthode sera utilisée pour définir le nombre de classes dans les classifications ultérieures.

Après une présentation des différentes méthodes de classification automatique et les résultats de plusieurs tests, divers choix ont été faits et vont être appliqués au cas de Marseille afin d'identifier des quartiers aérodynamiques.

Une première classification en 7 classes a donc été calculée en utilisant le choix « sample » disponible sous le logiciel Matlab pour définir les centres initiaux des classes.

3.3.3 La classification de la zone d'étude de Marseille (6300 cellules) :

Les résultats de cette classification ont été cartographiés afin d'identifier le quartier urbain correspondant à chaque classe (carte 3-17). Quatre classes définissent le tissu urbain ; il s'agit des classes 1, 4, 5 et 7. La classe 1 regroupe les cellules situées autour du Vieux Port, sur le centre-ville de Marseille. Une première auréole (classe 5), plus ou moins « décousue », se forme autour de cette première classe et englobe les zones industrielles du PAM et de la vallée de l'Huveaune, et les zones d'habitat collectif situées principalement au nord-est et au sud-est du centre-ville. Enfin, la banlieue est divisée en deux classes : la classe 4 représente les zones d'habitat individuel dense et la classe 7 les zones d'habitat individuel peu dense. Les MOS sont représentés par trois classes, la 6, la 3 et la 2 qui définissent respectivement les zones de végétation, les surfaces d'eau et les sols sans information fournie par la BDTopo.

3.3.3.1 Description des classes

La classe 1, correspondant au centre-ville de Marseille, se compose de bâtiments dont la taille moyenne est de 15 m en hauteur, 182 m de périmètre et 28570 m³ de volume. La forme des bâtiments est assez découpée avec une compacité moyenne de seulement 0.59. Les constructions sont denses avec une densité bâtie de

0.46 en moyenne et la végétation ne couvre que 2 % de la surface. Les axes routiers occupent une surface de 16%. Le centre-ville de Marseille se constitue autour du Vieux port, les surfaces d'eau représentent donc 2% de la surface en moyenne. En centre-ville, les bâtiments sont collés les uns aux autres pour former des îlots urbains et ne sont représentés que par une seule entité dans la BDTopo ; c'est pourquoi le nombre moyen de bâtiments sur 4 ha est seulement de 15 bâtiments alors que l'espacement moyen entre les bâtiments est faible, en moyenne 24 m.

Les bâtiments ont une taille légèrement inférieure dans la classe 5 avec en moyenne une hauteur de 11 m, un périmètre de 97 m et un volume de 6330 m³. Ils ont une forme un peu plus compacte avec une compacité moyenne de 0.67. La densité bâtie est beaucoup moins importante avec une moyenne de 0.20 mais la végétation couvre 8 % de la zone et la surface goudronnée est de 14%. En revanche, l'espacement moyen entre les bâtiments est beaucoup plus en accord avec le nombre de bâtiments avec des valeurs moyennes respectives de 40 m et 15.5 bâtiments sur 4 ha.

Enfin, les bâtiments des classes 4 et 7 ont des morphologies très similaires : la hauteur moyenne des bâtiments est respectivement de 6.5 et 6.2 m, le périmètre de 55.9 et 53.7 m, le volume de 1291 et 1350 m³ et la compacité de 0.75 et 0.74. Par contre, ces deux classes se différencient par leur MOS : la densité bâtie est respectivement de 0.18 et 0.04, la densité de végétation de 0.08 et 0.33 et la densité des surfaces des axes routiers de 0.12 et 0.05. De même, l'espacement moyen entre les bâtiments permet de distinguer les deux classes avec des valeurs moyennes de 28.7 m pour la classe 4 et de 78.2 m pour la classe 7. Le nombre de bâtiments évolue en sens inverse avec une concentration plus importante de bâtiments dans la classe 4 (37 bâtiments sur 4 ha) par rapport à la classe 7 (9.6 bâtiments sur 4 ha).

La classe 6, représentant les zones de végétation, a une densité moyenne de végétation de 0.91. Cette classe se compose donc de cellules occupées totalement par de la végétation et de cellules qui se situent à la limite avec un autre MOS.

La classe 3 représente les surfaces en eau et regroupe principalement les cellules qui correspondent à la mer Méditerranée (carte 3-17). Les densités des surfaces en eau s'étirent de 0.52 à 1 et sont en moyenne de 0.97. Les densités qui sont inférieures à 1 correspondent aux cellules qui sont à cheval sur le trait de côte et qui sont donc constituées à la fois de bâtiments (ou d'autres MOS) et d'eau de mer. On note qu'il y a en effet quelques bâtiments (9 bâtiments au maximum et densité surfacique bâtie maximale de 0.09), quelques zones de végétation (densité de végétation maximale de 0.03) et enfin quelques routes (densité maximale de 0.05).

Enfin, la classe 2 a été identifiée comme la classe représentant les sols sans information; elle est définie par aucune variable spécifique car elle n'est représentée

par aucun MOS figurant dans la BDTopo. Cette classe regroupe également quelques bâtiments (densité bâtie maximale de 0.03), quelques zones de végétation (densité maximale de 0.50) et quelques surfaces d'eau (densité maximale de 0.49). De même que pour la classe 3, on retrouve donc des cellules où les densités des MOS connus sont totalement nulles et des cellules qui sont à la limite entre ces sols sans informations et un autre MOS.

3.3.3.2 Validation des résultats de la classification

Les cartes 3-18a à 3-18f permettent de se rendre compte d'un point de vue visuel du type de tissu urbain et les MOS représentés dans chaque classe. En centre-ville, les bâtiments (les îlots urbains) sont de grande taille par rapport aux maisons individuelles et aux grands ensembles. Les différences de densité bâtie sont également mises en évidence avec une bonne partie de l'espace occupée par des bâtiments en centre-ville et au contraire un éparpillement des maisons dans les quartiers d'habitat individuel peu dense et collectif. La répartition spatiale des bâtiments dans l'espace évolue également d'un quartier à l'autre, avec un centre-ville et des zones d'habitat individuel dense où les bâtiments sont bien alignés le long des axes de circulation et disposés de manière régulière. Cette régularité ne se retrouve pas pour les deux autres quartiers.

Le tableau 3-3 permet d'analyser les différences entre les classes urbaines. La classe 6, représentant la végétation, figure également dans ce tableau car la végétation fait partir des MOS du tissu urbain. Afin de faciliter la lecture de ce tableau et des suivants, des noms sont donnés aux classes dans les tableaux en fonction du quartier urbain qu'elles représentent. Ces désignations résultent d'une interprétation des résultats cartographiés de la classification automatique. D'une manière générale, les valeurs moyennes diffèrent entre les classes, mais les valeurs sont assez similaires entre les classes 4 et 7, qui représentent l'habitat individuel plus ou moins dense (donc des bâtiments de même taille et de même forme). Ces deux classes se différencient par les variables de densités, le nombre de bâtiments par cellule, l'espacement entre les bâtiments; en revanche, les valeurs sont très similaires pour les autres variables (compacité, hauteur, périmètre, volume).

La variable compacité présente des différences assez peu marquées entre les classes ce qui signifie que la forme des bâtiments est à peu près régulière sur Marseille même si la forme est de plus en plus compacte du centre-ville vers la banlieue. Les densités surfaciques des routes et des bâtiments ont des valeurs moyennes assez peu différentes dans les classes 1, 4 et 5 mais celles-ci se différencient par les autres variables. L'espacement moyen entre les bâtiments

varie d'une classe à l'autre, il en est de même pour la variable hauteur (sauf dans les classes 4 et 7). La variable nombre de bâtiments présente des valeurs moyennes assez proches entre les classes 1 et 5 mais ces classes se différencient par les autres caractéristiques. Le périmètre et le volume sont deux variables qui évoluent différemment dans chaque classe (sauf les classes 4 et 7). Enfin, la densité de la végétation est assez proche dans les classes 1, 4 et 5 puis varie beaucoup plus pour les classes 6 et 7.

Moyennes	Classe 1 (Centre-ville)	Classe 4 (Individuel dense)	Classe 5 (Collectif / Industriel)	Classe 6 (Végétation)	Classe 7 (Individuel peu dense)
COMPACITE	0.59	0.75	0.67	0.03	0.74
DENS_BAT	0.46	0.18	0.20	0.00	0.04
ESPACE	24.28	28.77	40.34	0.00	78.24
HAUTEUR	15.05	6.53	11.25	0.17	6.25
NB_BATI	14.95	36.92	15.55	0.04	9.67
PERIMETRE	181.71	55.96	96.96	1.40	53.71
VOLUME	28570.87	1291.28	6330.09	18.56	1350.17
DENS_ROUTE	0.16	0.12	0.14	0.01	0.05
DENS_VEG	0.02	0.08	0.08	0.91	0.33
DENS_HYDRO	0.02	0.00	0.01	0.00	0.02
Effectif (%)	4.2	17.1	16.3	22	21.7
Coef. de variation (%)	Classe 1 (Centre-ville)	Classe 4 (Individuel dense)	Classe 5 (Collectif / Industriel)	Classe 6 (Végétation)	Classe 7 (Individuel peu dense)
COMPACITE	13.45	5.57	9.10	499.65	9.35
DENS_BAT	33.86	46.09	57.87	665.86	73.05
ESPACE	80.48	30.91	47.83	0.00	40.87
HAUTEUR	36.67	30.91	44.02	600.75	46.92
NB_BATI	50.63	31.12	46.45	487.21	64.88
PERIMETRE	51.49	23.83	31.62	590.04	39.64
VOLUME	86.84	63.34	64.87	840.42	117.90
DENS_ROUTE	45.54	38.84	47.49	367.06	94.34
DENS_VEG	448.75	163.95	188.76	14.31	95.56
DENS_HYDRO	429.53	702.58	598.03	1812.07	489.31

Tableau 3-3 : Statistiques descriptives des classes urbaines et de la classe végétation issues de la classification en 7 classes.

Le test t de Student a été utilisé pour vérifier que les moyennes des variables des classes sont significativement différentes. Les comparaisons sont réalisées entre les classes présentées dans le tableau 3-3. Ce test fournit en résultat la probabilité que l'hypothèse nulle soit vraie, c'est-à-dire l'hypothèse selon laquelle les moyennes d'une variable de deux classes ne sont pas différentes. Ce test est appliqué pour chaque variable entre deux classes. Ce test suppose que les variables de chaque groupe soient distribuées normalement et que la dispersion des résultats dans les

deux échantillons n'est pas significativement différente. La normalité de la distribution des variables est vérifiée dans la majorité des cas avec quelques fois des distributions légèrement asymétriques. La deuxième condition est moins évidente car les dispersions peuvent être assez différentes d'une classe à l'autre.

Les valeurs des probabilités obtenues sont présentées en annexe D, tableau D1. Avec un niveau de significativité inférieur à 0.001, il en résulte sur 120 cas testés que seulement 3 cas ne permettent pas de rejeter l'hypothèse nulle, c'est-à-dire 2 % des cas. En effet, entre la classe 1 (Centre-ville) et la classe 7 (Individuel faible), la densité de l'hydrographie est identique, en moyenne. De même, entre la classe 4 (Individuel dense) et la classe 5 (Collectif / Industriel), la densité de la végétation est en moyenne très proche. Enfin, entre la classe 4 (Individuel dense) et la classe 7 (Individuel peu dense), le volume des bâtiments est en moyenne similaire. On avait déjà observé que la morphologie des bâtiments était très proche dans les classes urbaines représentant l'habitat individuel plus ou moins dense.

Les classes urbaines apparaissent donc différentes les unes des autres et semblent représenter chacune un type de quartier urbain. Il reste toutefois à vérifier l'homogénéité des variables à l'intérieur de chaque classe.

Le coefficient de variation est le rapport entre l'écart type et la moyenne ; il permet de décrire les variations des valeurs autour de la moyenne (tableau 3-3).

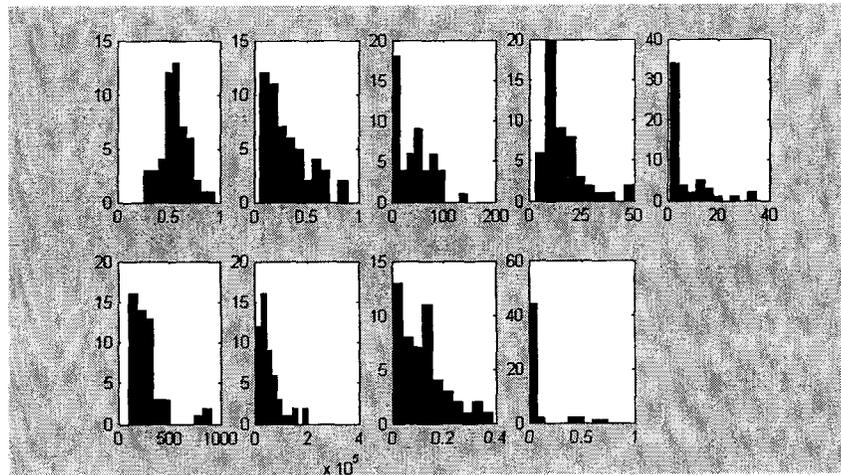
D'une manière générale le coefficient de variation reste élevé pour l'ensemble des variables des classes urbaines. Seule la compacité présente peu de variation avec un coefficient de variation évoluant de 0.05 à 0.13 pour les classes urbaines. A l'opposé le volume est la variable qui varie le plus dans chaque classe avec des coefficients de variation compris entre 0.63 et 1.17. La classe 4 apparaît comme la classe la plus homogène avec des coefficients de variation assez faibles dans l'ensemble par rapport aux autres classes. Enfin, la densité de la végétation enregistre un coefficient de variation élevé pour l'ensemble des classes urbaines ; la végétation n'est pas une des principales composantes du tissu urbain et elle apparaît sous une forme résiduelle qui peut expliquer sa forte variabilité dans l'espace urbain. Dans la classe Individuel peu dense, la végétation occupe une place plus importante, le coefficient est toujours élevé mais reste inférieur à 1. Il est évidemment faible pour la classe Végétation.

Les résultats de cette classification semblent satisfaisants, chaque classe représentant un type particulier de tissu urbain. Cependant certaines variables présentent une assez grande dispersion dans les classes, comme l'espacement

moyen entre les bâtiments ou le volume moyen des bâtiments dans les quatre classes urbaines. La distance euclidienne calculée entre chaque élément de la classe et son centre permet d'identifier les observations qui sont les plus éloignées du centre de la classe. D'après la distribution des distances euclidiennes pour chaque classe et pour chaque variable, les distances maximales ont été retenues et représentées sous la forme d'histogrammes et de cartes.

3.3.3.3 Analyses des extrêmes de chaque classe urbaine

Pour la classe 1, les observations dont la distance euclidienne au centre de la classe est supérieure à 10 ont été sélectionnées. D'après la figure 3-20 où la distribution de chaque variable est représentée par un histogramme, des bâtiments se démarquent par leur morphologie avec un périmètre et un volume supérieur à la moyenne de cette classe, tandis que la hauteur des bâtiments reste proche de la moyenne de la classe. Le nombre moyen de bâtiments est de 6.6 sur 4 ha tandis que l'espacement moyen entre les bâtiments augmente avec une moyenne de 39 m au lieu de 24 m. La densité bâtie est plus faible avec une moyenne de 0.32 au lieu de 0.46, de même que la densité des surfaces des axes routiers avec une moyenne de 0.11 au lieu de 0.16. Par contre, la densité de végétation est supérieure avec une moyenne de 0.07.



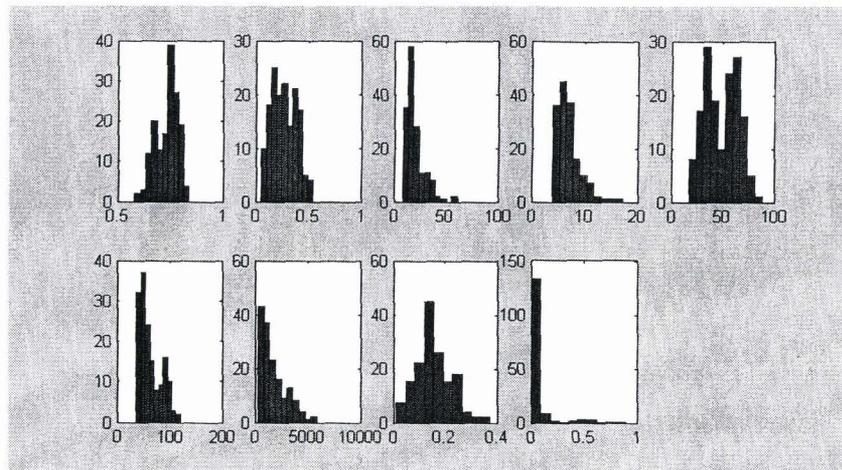
Variables (de gauche à droite) :

1 : Compacité, 2 : Densité surfacique des bâtiments, 3 : Espacement moyen entre les bâtiments (m), 4 : Hauteur moyenne des bâtiments (m), 5 : Nombre de bâtiments, 6 : Périmètre moyen des bâtiments (m), 7 : Volume moyen des bâtiments (m^3), 8 : Densité des axes routiers, 9 : Densité de la végétation

Figure 3-20: Distribution des variables de la classe 1 dont la distance euclidienne est supérieure à 10

La représentation spatiale des observations sélectionnées permet de mettre en évidence les cellules qui s'écartent le plus des valeurs moyennes de la classe (carte 3-19). Pratiquement tout le centre-ville de Marseille est couvert par des observations dont les caractéristiques sont proches des valeurs moyennes de la classe 1. En revanche, les cellules situées sur la côte, au nord du centre-ville, et quelques cellules assez dispersées sur des zones d'habitat collectif ou des bâtiments industriels présentent des écarts plus importants.

Les observations de la classe 4 dont la distance euclidienne est supérieure à 3 ont été sélectionnées. Les bâtiments de ces observations ont également un périmètre et un volume supérieur à la moyenne de la classe. Le périmètre moyen des bâtiments est de 63 m avec une classe modale autour de 55 m et une deuxième classe modale autour de 90 m. Le volume moyen est de 1748 m³. Le nombre de bâtiments est également en moyenne supérieur avec une valeur de 48.5 mais la distribution de cette variable est bi-modale avec une classe modale autour de 35 m et une deuxième autour de 65 m (figure 3-21). L'espacement moyen entre les bâtiments est en revanche plus faible avec une moyenne de 20 m au lieu de 28 m. Au total, la densité bâtie est plus élevée dans ces cellules avec une moyenne de 0.27 au lieu de 0.18. Enfin, la hauteur des bâtiments, leur compacité et les surfaces occupées par les axes routiers et par la végétation sont pratiquement similaires à celles de la classe 4 entière.



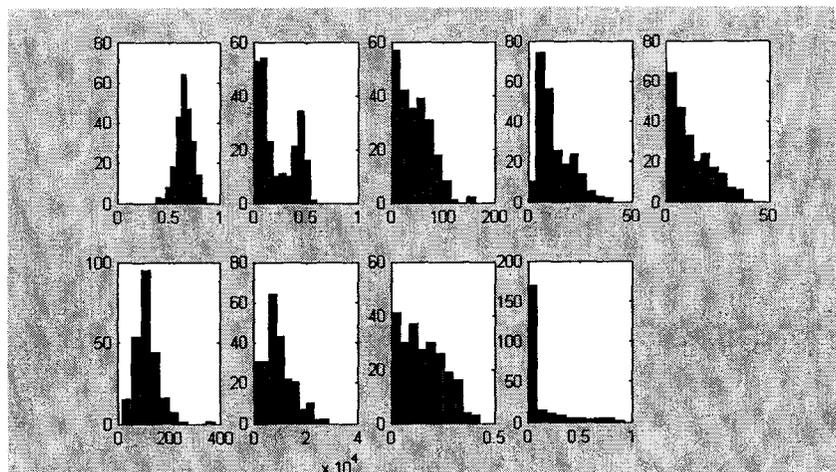
Variables (de gauche à droite) :

1 : Compacité, 2 : Densité surfacique des bâtiments, 3 : Espacement moyen entre les bâtiments (m), 4 : Hauteur moyenne des bâtiments (m), 5 : Nombre de bâtiments, 6 : Périmètre moyen des bâtiments (m), 7 : Volume moyen des bâtiments (m³), 8 : Densité des axes routiers, 9 : Densité de la végétation

Figure 3-21: Distribution des variables de la classe 4 dont la distance euclidienne est supérieure à 3.

La représentation par une carte des distances euclidiennes en deux niveaux (carte 3-20) identifie les cellules dont les distances sont supérieures à 3. Elles correspondent à des cellules qui englobent des immeubles collectifs ou des maisons individuelles collées entre elles et représentées par une seule entité dans la BDTopo ; ces bâtiments sont donc d'une taille supérieure à celles des maisons individuelles. Des bâtiments différents sont également englobés dans ces cellules comme dans le quartier à l'ouest de Notre Dame de la Garde, quartier d'immeubles bourgeois résidentiels de trois étages environs avec une densité bâtie assez élevée.

Pour la classe 5, la plupart des observations dont la distance euclidienne est supérieure à 5 ont des caractéristiques assez proches de celles de la classe entière avec encore une fois des bâtiments légèrement plus imposants : la hauteur moyenne est de 13 m au lieu de 11.2 m, le périmètre de 113 m au lieu de 96 m et le volume de 9223 m³ au lieu de 6330 m³. La densité bâtie est similaire en moyenne, mais d'après la distribution de la série, deux classes modales sont identifiables : la première varie autour de 0.06 et la deuxième autour de 0.48 (figure 3-22). Ces observations comportent donc des bâtiments de la taille d'un bâtiment collectif mais dont la densité est soit plus faible, soit plus importante.



Variabes (de gauche à droite) :

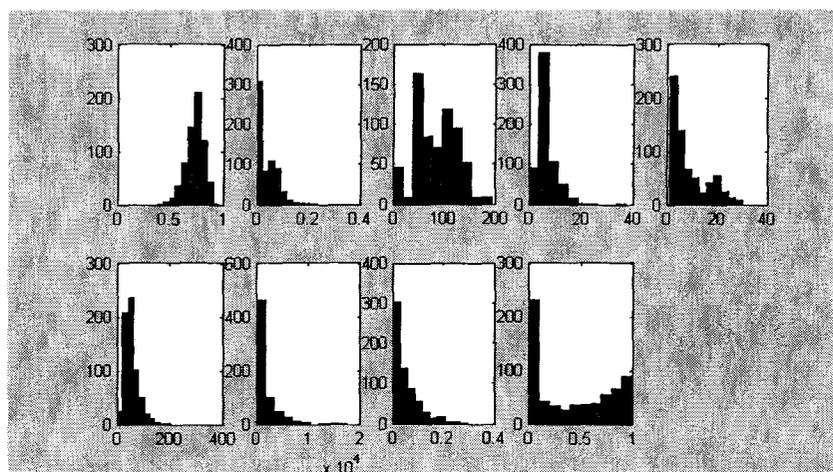
1 : Compacité, 2 : Densité surfacique des bâtiments, 3 : Espacement moyen entre les bâtiments (m), 4 : Hauteur moyenne des bâtiments (m), 5 : Nombre de bâtiments, 6 : Périmètre moyen des bâtiments (m), 7 : Volume moyen des bâtiments (m³), 8 : Densité des axes routiers, 9 : Densité de la végétation

Figure 3-22: Distribution des variables de la classe 5 dont la distance euclidienne est supérieure à 5

D'après la représentation spatiale de cette classe (carte 3-21), les observations ainsi sélectionnées représentent quelques bâtiments industriels du PAM et de la vallée de l'Huveaune mais pas la majorité. Elles regroupent également les cellules

en limite de zones d'habitat collectif où seulement une partie du bâtiment est contenue dans la maille. Il est difficile pour cette classe de repérer un type de bâtiment ou de structure bien particulier par rapport au reste de la classe.

Enfin pour la classe 7, les observations dont la distance euclidienne est supérieure à 2 ont été sélectionnées. Comme pour la classe précédente les caractéristiques des bâtiments varient peu : la hauteur moyenne est de 6.7 m au lieu de 6.2 m, le périmètre de 55.8 m au lieu de 53 m et le volume de 1688 m³ au lieu de 1350 m³. Les différences ne sont pas très importantes. L'espacement moyen entre les bâtiments est légèrement supérieur avec une moyenne de 84 m au lieu de 78 m et le nombre de bâtiments est de 8.3 au lieu de 9.6 bâtiments sur 4 ha. Pour cette dernière variable, la distribution est bi-modale avec une première classe modale autour de 1 bâtiment et une deuxième moins importante autour de 20 bâtiments (figure 3-23). De même la densité bâtie est en moyenne similaire (0.04) mais un pic secondaire apparaît autour de 0.07. En revanche, la densité de la végétation est supérieure avec une valeur moyenne de 0.42 au lieu de 0.33 et la densité des surfaces d'eau est également légèrement supérieure avec 4% de surface d'eau au lieu de 2%.



Variables (de gauche à droite) :

1 : Compacité, 2 : Densité surfacique des bâtiments, 3 : Espacement moyen entre les bâtiments (m), 4 : Hauteur moyenne des bâtiments (m), 5 : Nombre de bâtiments, 6 : Périmètre moyen des bâtiments (m), 7 : Volume moyen des bâtiments (m³), 8 : Densité des axes routiers, 9 : Densité de la végétation

Figure 3-23: Distribution des variables de la classe 7 dont la distance euclidienne est supérieure à 2

Représentées sur une carte (carte 3-22), les cellules qui présentent le plus d'écart avec les caractéristiques de la classe correspondent aux cellules qui sont à la

limite entre les zones bâties et les zones de végétation ou les surfaces d'eau. Quelques cellules avec une densité bâtie très faible sont également identifiables ; elles ne regroupent qu'un ou deux bâtiments.

D'après cette analyse des valeurs « extrêmes » de chaque classe, deux questions majeures se posent : la première concerne la taille de la maille choisie, pour réaliser cette étude. A plusieurs reprises, des observations étaient incluses dans une classe alors que les cellules incluaient des bâtiments d'une morphologie différente ou qu'elles ne prenaient en compte qu'un morceau de bâtiment découpé par le maillage. Il est toutefois difficile d'utiliser une taille de maille plus petite, qui soit à la fois adaptée à tous les types de quartiers urbains de Marseille et aux calculs des différentes variables comme l'espacement moyen entre les bâtiments. En centre-ville, les îlots urbains ont une taille supérieure à la centaine de mètres, utiliser une cellule de taille inférieure à 200 m ne représenterait alors qu'un fragment du tissu urbain. En revanche, elle pourrait être adaptée dans les zones d'habitat individuel. Cette conclusion vient renforcer le choix de la taille de la maille réalisé au paragraphe 2.4.

La deuxième question repose sur l'homogénéité des classes ; il semblerait que plusieurs structures puissent être englobées dans une seule classe. Afin de vérifier cette deuxième hypothèse une classification a été réalisée sur le tissu urbain de Marseille, seulement. Cette classification sur un effectif réduit permet d'une part de supprimer le poids des MOS naturels qui couvrent une surface importante de la zone d'étude et d'autre part de se focaliser sur le tissu urbain de la ville afin de définir des zones homogènes d'après leur caractéristiques morphologiques et les MOS.

3.3.4 La classification du tissu urbain marseillais (3846 cellules)

Une classification a été calculée pour le tissu urbain de Marseille à partir de 3846 observations et de neuf variables. La variable densité de l'hydrographie n'a pas été prise en compte car elle n'a pas été jugée représentative du tissu urbain marseillais.

D'après le graphe de la figure 3-24, une classification peut être réalisée en 6 classes ou en 9 classes, car la somme des écarts types représentée en fonction du nombre de classes marque deux paliers à ces niveaux-là. Une classification en 6 classes est tout d'abord réalisée à partir de données standardisées sur les 3846 observations. Le choix 3 a été utilisé pour définir les centres initiaux des classes.

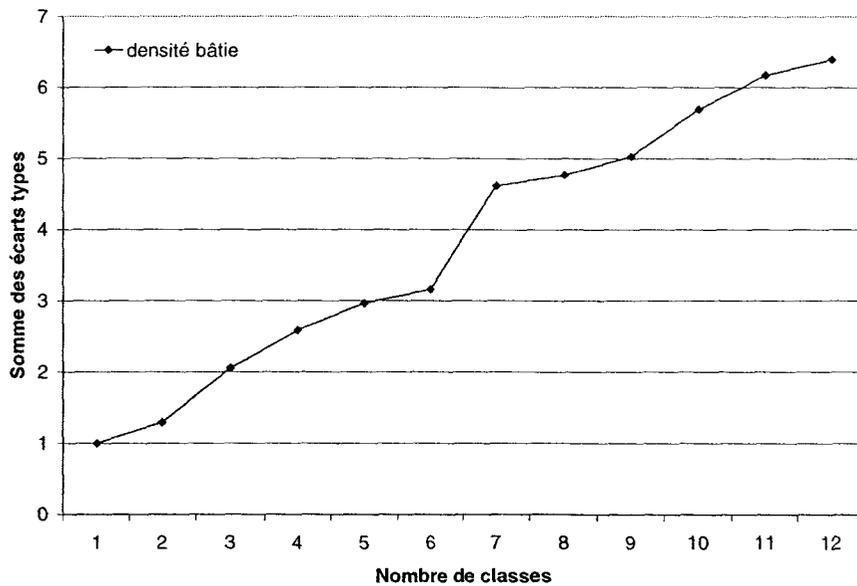


Figure 3-24: Somme des écarts types de la variable densité bâtie en fonction du nombre de classes calculées pour le tissu urbain marseillais

3.3.4.1 Classification en 6 classes du tissu urbain marseillais

La carte 3-23 permet d'analyser la répartition spatiale des six classes. La classe représentant le centre-ville est plus étendue que dans la classification précédente, au détriment de la classe 5. En revanche, les classes 2 et 4, correspondant à l'habitat individuel plus ou moins dense, représentent à peu près les mêmes zones que les classes 4 et 7 de la classification précédente ; la classe 4 représente toutefois une surface moins importante car les cellules situées à la limite entre la zone rurale et la zone urbaine appartiennent désormais à la classe 3 de cette classification.

Trois classes ont des caractéristiques assez similaires aux classes de la classification précédente.

La classe 1 représente le centre-ville de Marseille. Les caractéristiques de cette classe sont très proches de celles de la classe 1 de la classification précédente (tableau 3-3 et 3-4). La densité bâtie est légèrement inférieure avec une surface bâtie de 43,7 %. Les bâtiments ont une également une taille presque similaire avec une hauteur moyenne de 13 m, un périmètre moyen de 149 m et un volume de 17445 m³. La compacité des bâtiments est de 0,61, ce qui est très proche du résultat de la classification précédente. Les bâtiments sont un peu plus nombreux avec une moyenne de 18 bâtiments sur 4 ha et l'espacement moyen entre eux est de 23 m. La densité de la végétation est de 0,01 et les routes occupent une surface de 15 %.

Moyennes	Classe 1 (Centre-ville)	Classe 2 (Individuel dense)	Classe 5 (Collectif / Industriel)	Classe 4 (Individuel peu dense)	Classe 6 (Gros bâtiments)	Classe 3 (Individuel épars)
COMPACITE	0.61	0.75	0.67	0.75	0.44	0.75
DENS_BAT	0.43	0.18	0.14	0.05	0.36	0.03
ESPACE	23.27	27.80	49.36	65.60	29.23	77.07
HAUTEUR	12.98	6.76	12.08	5.67	15.06	5.95
NB_BATI	17.93	36.74	12.68	11.62	3.36	7.60
PERIMETRE	149.48	58.23	91.39	53.93	477.33	48.18
VOLUME	17444.92	1497.61	6023.78	1201.22	114616.24	1101.90
DENS_ROUTE	0.15	0.13	0.13	0.05	0.05	0.03
DENS_VEG	0.01	0.07	0.12	0.11	0.08	0.68
Effectif (%)	11.5	27.8	20.7	26	0.3	13.7

Tableau 3-4 : Moyennes des classes issues de la classification en 6 classes du tissu urbain

La classe 2 correspond aux zones d'habitat individuel dense. Les caractéristiques de cette classe sont identiques à celles de la classe 4 de la classification précédente ; seul le volume moyen est légèrement supérieur avec une moyenne de 1498 m³.

La classe 4 couvre les zones d'habitat individuel peu dense ; c'est l'équivalent de la classe 7 de la classification précédente. La densité bâtie est en moyenne de 0.05. Les bâtiments ont une taille légèrement différente avec une hauteur moyenne de 5.7 m, un périmètre de 53.9 m et un volume de 1201 m³. La compacité des bâtiments est similaire avec une valeur moyenne de 0.74. Par contre, la densité de végétation est inférieure avec une valeur moyenne de 0.11, celle des surfaces des routes ne varie pas.

Enfin, la classe 5 regroupe les bâtiments collectifs et industriels et se rapproche de la classe 5 de la classification précédente. La densité bâtie est toutefois inférieure avec une densité moyenne de 0.14, mais la morphologie des bâtiments varie peu : la hauteur est en moyenne de 12 m, le périmètre de 91 m, le volume de 6023 m³ et la compacité de 0.66. Les surfaces couvertes par la végétation et les routes sont également très proches avec respectivement des densités de 0.11 et 0.13.

Les deux classes restantes représentent des types de bâtiments et de structures qui n'ont pas encore été identifiés. Il s'agit de bâtiments d'une taille très imposante pour la classe 6 (Gros bâtiments) avec une hauteur moyenne de 15 m, un périmètre moyen de 477 m et un volume moyen de 114616 m³. Leur forme est assez découpée car la compacité moyenne n'est que de 0.44. La densité bâtie est élevée avec une moyenne de 0.36 et la densité de végétation est faible (0.08). Le nombre de

bâtiments est également très faible avec une moyenne de 3.3 bâtiments sur 4 ha et l'espacement moyen entre eux est de 29.2 m.

Enfin, la classe 3 (Individuel épars) représente la zone de transition entre l'espace bâti et l'espace rural où la végétation prédomine. La densité bâtie est donc très faible avec seulement 3 % de la surface qui est construite tandis que la végétation recouvre en moyenne 68 % de l'espace. Les caractéristiques morphologiques des bâtiments correspondent à celles des bâtiments individuels (classes 2 et 4).

Le test *t* de Student a également été utilisé pour vérifier que les moyennes des variables sont significativement différentes d'une classe à l'autre. La probabilité de se tromper en rejetant l'hypothèse nulle pour chaque variable entre deux classes est présentée en annexe D, tableau D2. Avec un niveau de significativité inférieur à 0.001, 12% des cas ne permettent pas de rejeter l'hypothèse nulle, ce qui signifie que les deux moyennes testées sont très proches. C'est le cas entre la classe 1 (Centre-ville) et la classe 6 (Gros bâtiments), les variables densité bâtie, espacement entre les bâtiments et hauteur sont en moyennes quasiment égales, leur différence n'est pas significative. On retrouve également des moyennes très proches pour la variable compacité entre les trois classes représentant l'habitat individuel plus ou moins dense (classes 2, 3 et 4) ; entre les classes 3 et 4, les variables hauteur et volume sont également très proches. Pour les autres cas, ce sont les variables densités de la végétation ou des surfaces goudronnées qui ont des moyennes quasiment égales entre deux classes.

Cependant, seulement une ou trois variables au maximum sur les 9 utilisées ont des moyennes égales entre deux classes : les résultats de ce test ne permettent donc pas de remettre en cause les résultats de la classification. Les six classes créées représentent chacune un type de quartier.

3.3.4.2 Homogénéité des 6 classes

Les coefficients de variation ont été calculés pour chaque variable de chaque classe (tableau 3-5). Les classes apparaissent plus homogènes avec des coefficients de variation plus faibles par comparaison aux classes de la classification précédente. Cependant, la variable volume enregistre encore une forte variabilité sauf pour la classe 6 où il est de 0.36. Par contre, cette classe est très hétérogène en ce qui concerne les autres variables, de même que la classe 3 où seule la densité de la végétation présente un coefficient de variation assez faible (0.32). Cette classe est plus caractérisée par la végétation que par les constructions, ce qui peut expliquer les forts coefficients de variation des autres variables. Tout comme pour la

classification précédente, les coefficients sont élevés pour la densité de la végétation car ce n'est pas la caractéristique principale des classes urbaines.

Enfin, la création de la classe 6 a permis d'améliorer l'homogénéité des valeurs de la classe 1 représentant le centre-ville car ces deux classes étaient groupées dans la classification précédente. Cette classe correspond, en partie, aux valeurs extrêmes de la distance euclidienne (cf. § 3.3.3.3). De même, la classe Individuel peu dense (4) apparaît plus homogène avec la nette diminution des coefficients de presque l'ensemble des variables ; la classe 3 était incluse dans la classe Individuel peu dense (7) dans la classification précédente.

Coef. de variation (%)	Classe 1 (Centre-ville)	Classe 2 (Individuel dense)	Classe 5 (Collectif / Industriel)	Classe 4 (Individuel peu dense)	Classe 6 (Gros bâtiments)	Classe 3 (Individuel épars)
COMPACITE	9.5	5.64	10.19	8.40	36.44	11.04
DENS_BAT	29.16	43.39	51.97	73.20	69.76	95.70
ESPACE	61.86	29.82	48.24	48.08	112.21	55.76
HAUTEUR	38.15	30.94	43.85	38.37	74.76	49.09
NB_BATI	45.33	31.93	50.90	61.79	140.78	90.45
PERIMETRE	31.16	25.70	31.65	36.71	51.51	45.28
VOLUME	66.44	69.41	72.05	112.08	36.62	137.118
DENS_ROUTE	42.97	38.42	52.13	84.04	84.77	119.50
DENS_VEG	461.48	167.62	143.53	115.39	261.29	32.81

Tableau 3-5 : Coefficients de variation des classes issues de la classification en 6 classes du tissu urbain (en gris, les coefficients de variation supérieurs à ceux de la classification précédente pour les classes 1, 2, 4 et 5, à 1 près).

La classification du tissu urbain a été améliorée car les classes apparaissent plus homogènes. Cependant, les nouvelles classes créées enregistrent une variabilité encore assez importante. De même, les classes 5 et 1 ont des coefficients de variation assez élevés pour certaines variables. C'est pourquoi une classification du tissu urbain en 9 classes a également été réalisée.

3.3.4.3 Classification en 9 classes du tissu urbain marseillais

Une classification a été calculée sur la même matrice que précédemment (9 variables et 3846 cellules) en 9 classes d'après le graphe de la figure 3-24.

La représentation spatiale de cette classification (carte 3-24) met en évidence la forte hétérogénéité du tissu urbain de Marseille. La classe représentant le centre-ville est réduite par rapport à la classification précédente et correspond à peu près à la classe 1 de la première classification. Elle est entourée de la classe 6, regroupant

les quartiers péricentraux et les zones industrielles du PAM et de la vallée de l'Huveaune. La classe 2 désigne les zones d'habitat individuel dense dont on retrouve les principaux quartiers comme dans les précédentes classifications ; il en est à peu près de même pour la classe 4. Par contre, les classes restantes mettent en évidence le mitage caractérisant le tissu urbain de Marseille avec une multitude de petites zones ne regroupant que quelques cellules d'une classe à la fois.

Moyennes	Classe 8 (Centre-ville)	Classe 2 (Individuel dense)	Classe 5 (Collectif)	Classe 4 (Individuel peu dense)	Classe 7 (Gros bâtiments)	Classe 3 (Individuel épars)
COMPACITE	0.59	0.76	0.65	0.74	0.38	0.75
DENS_BAT	0.46	0.18	0.11	0.05	0.46	0.03
ESPACE	24.96	26.92	61.32	72.85	9.80	91.13
HAUTEUR	15.64	6.36	17.25	5.70	11.40	5.94
NB_BATI	14.68	40.53	9.72	11.87	3.62	8.55
PERIMETRE	175.87	53.20	97.48	54.18	565.90	47.77
VOLUME	27444.48	1127.94	9061.75	1210.63	138191.47	1017.38
DENS_ROUTE	0.16	0.12	0.12	0.05	0.02	0.03
DENS_VEG	0.01	0.08	0.17	0.12	0.02	0.68
Effectif (%)	5.3	20.6	7.3	22.5	0.2	11.3

Tableau 3-6 : Moyennes des classes 2, 3, 4, 5, 7 et 8 de la classification en 9 classes du tissu urbain

Les six classes de la classification précédente restent ainsi identifiables et possèdent dans l'ensemble les mêmes caractéristiques (tableau 3-6). Quelques différences peuvent être notées :

- pour la classe Centre-ville, les bâtiments sont en moyenne plus hauts avec une hauteur moyenne de 15.6 m et donc un volume plus important avec une moyenne de 27444 m³ ;
- pour la classe Individuel dense, le nombre, le périmètre et le volume des bâtiments sont légèrement supérieurs avec en moyenne 40.5 bâtiments sur 4 ha, un périmètre de 53 m et un volume de 1128 m³ ;
- la classe Collectif / Industriel devient la classe Collectif : la densité bâtie est moins importante avec une moyenne de 0.11, de même que le nombre de bâtiments (9.7). Par contre, les bâtiments sont d'une taille plus importante avec une hauteur moyenne de 17.3 m, un périmètre moyen de 97 m et un volume moyen de 9062 m³ ; l'espacement moyen entre eux est plus élevé avec une moyenne de 61.3 m.
- pour les classes Individuel peu dense et Individuel épars, seul l'espacement moyen entre les bâtiments augmente avec des valeurs moyennes respectives de 73 m et 91 m ;

➤ enfin, la classe Gros bâtiments apparaît assez différente avec une compacité des bâtiments de 0.38 en moyenne, ce qui signifie que les bâtiments ont une forme très découpée. Leur hauteur est plus faible (11.4 m) mais le périmètre et le volume moyen sont plus élevés (respectivement, 566 m et 138191 m³). La densité bâtie est plus importante avec une densité moyenne de 0.46, c'est-à-dire égale à celle du centre-ville. L'espacement moyen entre les bâtiments n'est plus que de 9.8 m. Enfin, la densité de la végétation est également réduite avec seulement 2 % de la surface couverte par de la végétation ; la surface goudronnée diminue également (moyenne de 2.5 %).

L'homogénéité des classes est améliorée d'une manière générale (tableau 3-7), sauf pour la classe Centre-ville où quelques coefficients de variation sont supérieurs à ceux de la classification précédente ; ils restent toutefois inférieurs aux coefficients de variation de la première classification présentée dans ce chapitre (§ 3.3.1). Il en est de même pour la classe Collectif mais cette fois-ci les coefficients de variation sont supérieurs à ceux de la première classification. Enfin, la classe Gros bâtiments présente deux coefficients de variation très élevés pour les variables espacement et nombre de bâtiments, ce qui montre que la répartition des bâtiments n'est pas la même dans les huit cellules de cette classe. Ces bâtiments peuvent mesurer plus de 400 m dans leur dimension maximale, ils sont donc découpés par le maillage ; d'ailleurs certaines cellules ne comportent qu'un fragment du bâtiment et d'autres en contiennent deux. Ce sont pour la plupart, des bâtiments industriels et vu le faible nombre des observations, la variabilité est très rapidement importante quand à leur répartition dans l'espace.

Coef. de variation (%)	Classe 8 (Centre-ville)	Classe 2 (Individuel dense)	Classe 5 (Collectif)	Classe 4 (Individuel peu dense)	Classe 7 (Gros bâtiments)	Classe 3 (Individuel épars)
COMPACITE	11.44	4.64	11.90	7.93	29.60	8.78
DENS_BAT	32.79	37.66	53.62	65.80	60.47	83.58
ESPACE	70.92	26.88	44.55	36.61	212.92	34.19
HAUTEUR	29.58	29.69	34.84	34.91	17.18	42.15
NB_BATI	46.75	26.67	54.27	56.82	162.16	77.57
PERIMETRE	30.24	19.34	34.88	33.96	44.10	39.65
VOLUME	51.94	56.37	63.10	107.39	30.96	115.71
DENS_ROUTE	42.69	36.37	58.79	79.71	119.29	112.20
DENS_VEG	487.12	161.87	118.61	109.74	255.61	30.94

Tableau 3-7 : Coefficients de variation des classes 2, 3, 4, 5, 7 et 8 de la classification en 9 classes du tissu urbain (en gris, les coefficients de variation supérieurs à ceux de la classification précédente, à 1 près).

Trois nouvelles classes sont créées par cette classification (tableau 3-8). La classe 1 a été appelée « Petit collectif » car elle se compose de bâtiments dont la morphologie est comprise entre celles des bâtiments collectifs et celles des maisons individuelles. En effet, la hauteur moyenne des bâtiments est de 8.9 m, le périmètre de 75 m, le volume de 3207 m³ et la compacité de 0.7. La densité bâtie est de 0.14 et l'espacement moyen entre les bâtiments est de 43 m avec, en moyenne, 17.7 bâtiments sur 4 ha. La végétation couvre une surface de 8 % et les routes une surface de 15 %.

La classe 6 correspond aux quartiers qui se sont développés autour du centre-ville et qui regroupent à la fois des bâtiments résidentiels et des bâtiments industriels. Elle sera désignée par le terme de « Péricentre ». Le péricentre est une zone intermédiaire entre la banlieue et le centre-ville. Il se caractérise ici par une densité bâtie assez élevée (0.37) et des bâtiments d'une hauteur moyenne de 9.5 m, un périmètre de 118 m et un volume de 7949 m³. La forme des bâtiments est moins découpée qu'en centre-ville mais reste peu compacte (0.64). Le nombre de bâtiments sur 4 ha est plus élevé qu'en centre-ville (21.7) mais l'espacement moyen entre les bâtiments reste similaire. De même la végétation ne représente qu'une faible surface avec une densité moyenne de 0.01. Les routes occupent 13.7 % de la surface.

Enfin, la dernière classe (classe 9 : Individuel résiduel) désigne un espace où la densité bâtie est très faible (0.8 % de la surface), où la densité de la végétation est plus faible que dans la classe Individuel épars avec une moyenne de 0.42 et où les routes ne représentent qu'une surface de 1.8%. Cette classe a été nommée « Individuel résiduel » car l'habitat est vraiment très faible et les bâtiments possèdent la morphologie des maisons individuelles.

Moyennes	Classe 1 (Petit collectif)	Classe 6 (Péricentre)	Classe 9 (Individuel résiduel)
COMPACITE	0.71	0.64	0.70
DENS_BAT	0.14	0.38	0.00
ESPACE	43.07	23.28	0.21
HAUTEUR	8.87	9.51	5.55
NB_BATI	17.68	21.69	1.17
PERIMETRE	74.89	118.23	55.82
VOLUME	3207.44	7948.74	1850.30
DENS_ROUTE	0.15	0.14	0.02
DENS_VEG	0.08	0.01	0.42
Effectif (%)	18	10.2	4.3

Tableau 3-8 : Moyennes des classes 1, 6 et 9 de la classification en 9 classes du tissu urbain.

Les classes Petit collectif et Péricentre sont relativement homogènes, d'après les coefficients de variation calculés pour chacune des variables (tableau 3-9). En revanche, la dernière classe est très hétérogène. Cette forte variabilité s'explique par le fait que les bâtiments regroupés dans cette classe sont très peu nombreux. Leur morphologie varie beaucoup et les MOS également. Seule la compacité, la hauteur et le périmètre des bâtiments semblent donner une unicité à cette classe.

Coef. de variation (%)	Classe 1 (Petit collectif)	Classe 6 (Péricentre)	Classe 9 (Individuel résiduel)
COMPACITE	6.84	7.22	20.91
DENS_BAT	36.94	25.85	200.67
ESPACE	34.11	48.55	1288.41
HAUTEUR	32.44	32.08	69.21
NB_BATI	38.76	42.47	115.62
PERIMETRE	27.22	23.80	77.61
VOLUME	72.40	49.31	195.79
DENS_ROUTE	40.97	44.44	191.20
DENS_VEG	150.38	354.18	90.80

Tableau 3-9 : Coefficients de variation des classes 1, 6 et 9 de la classification en 9 classes du tissu urbain.

Le test t de Student est également appliqué aux résultats de la classification pour étudier si les classes, en moyenne, sont distinctes les une des autres. Avec un niveau de significativité inférieur à 0.001, 15% des cas ne rejettent pas l'hypothèse nulle. Une à trois variables maximum par classe peuvent avoir des moyennes égales entre deux classes. Les probabilités sont présentées dans le tableau en annexe D, tableau D3. On retrouve comme pour la classification précédente des probabilités supérieures à 0.001 pour les variables décrivant la morphologie des bâtiments (compacité, hauteur, périmètre, volume) entre les classes représentant l'habitat individuel plus ou moins dense (classes 2, 3, 4 et 9). On note également que 6 variables de la classe Gros bâtiments ont des moyennes égales à celles de différentes classes, comme par exemple la variable hauteur qui a une moyenne égale à celle de la classe Petit collectif, ou la variable densité bâti dont la moyenne est égale à celle de la classe Centre-ville. Lorsque les différences entre les moyennes ne sont pas significatives, se sont le plus souvent les variables densités de la végétation et des surfaces goudronnées qui sont concernées.

3.4 Conclusion

Les méthodes de classification automatique permettent de regrouper des cellules ayant des caractéristiques très proches afin de former des classes. Une classification en 7 classes a tout d'abord été réalisée sur l'ensemble de la zone d'étude. Cette classification met en évidence d'une part les MOS naturels (surface de végétation et d'eau) et les zones qui ne sont décrites par aucun MOS dans la BDTopo, et d'autre part, quatre types de quartiers urbains. Une deuxième classification (en 6 classes) a été calculée sur le tissu urbain seulement de la ville, afin de détailler ce dernier : les classes obtenues ont une réalité spatiale et sont différentes entre elles. Mais pour tenter d'améliorer encore l'homogénéité des classes une classification a été réalisée en 9 classes sur le tissu urbain marseillais. Les résultats sont également satisfaisants mais on peut se demander si une telle précision est nécessaire pour analyser l'influence de la structure de la ville sur la basse atmosphère. En effet, pour certaines classes des différentes classifications présentées ici, seuls les pourcentages des MOS varient, la morphologie des bâtiments restant identiques. On peut se demander si ces classes urbaines, résultats statistiques, peuvent être considérées comme des quartiers aérodynamiques, et si chaque quartier a une influence différente sur les conditions météorologiques de la basse atmosphère.

Le chapitre suivant propose une validation de la méthodologie et des résultats obtenus pour la ville de Marseille.

Chapitre 4: Validation de la méthodologie et des résultats

La zone d'étude de Marseille a été divisée en plusieurs zones correspondant aux différents MOS et mettant en évidence des structures urbaines caractérisées par la morphologie des bâtiments. Cette division de l'espace a été effectuée avec la méthode de classification automatique des nuées dynamiques appliquée sur des données du SIG construit à partir de la BDTopo.

Les résultats obtenus pour les diverses classifications sont satisfaisants ; il reste toutefois à vérifier d'une part que cette méthode peut être applicable à d'autres villes que Marseille, et d'autre part à valider les résultats obtenus pour Marseille par une analyse détaillée des zones délimitées et par une comparaison avec les résultats d'autres bases de données comme CLC ou d'autres classifications. Enfin, un dernier point sera abordé dans ce chapitre afin de définir les classes urbaines comme des quartiers aérodynamiques.

La ville qui sert à valider la méthodologie développée pour analyser le tissu urbain d'une ville est Nantes. Le choix de cette ville correspond seulement à des raisons pratiques : le laboratoire possédait déjà la BDTopo de la moitié ouest de l'agglomération nantaise. Il s'est cependant avéré fort intéressant de tester une méthodologie sur une ville qui n'a pas connu le même développement urbain.

4.1 Validation de la méthodologie sur la ville de Nantes

Nantes est une ville très différente de Marseille car elles n'ont pas connu la même histoire. Nantes est une antique cité gauloise qui passe sous l'emprise de l'Empire romain en 50 av. J.C. Elle est ensuite occupée tantôt par les Celtes, tantôt par les Bretons, tantôt par les Francs. Au IX^{ième} siècle, Nantes est rattachée à la Bretagne qui devient française en 1532. Malgré des épidémies de pestes, des inondations et des incendies, la ville se développe grâce au commerce triangulaire et devient au XVIII^{ième} siècle le premier port de France. Au XIX^{ième} siècle, le commerce triangulaire est remplacé par le commerce et l'industrie sucrière. On recense alors

plus d'une centaine de chantiers navals de toutes tailles, implantés essentiellement sur les rives de la Loire (en particulier Chantenay et la pointe de l'actuelle île Beaulieu). Au milieu du XIX^{ième} siècle, la surproduction, la concurrence britannique et la crise de l'industrie sucrière ébranlent le secteur momentanément. Plusieurs petits chantiers disparaissent avec l'utilisation du fer qui révolutionne le secteur naval. A la fin du XIX^{ième}, la politique d'aide de l'État relance le secteur. La concentration s'accélère et il ne reste que 3 gros chantiers à la fin de la première guerre mondiale. Pendant celle-ci, Nantes n'est pas touchée directement par la guerre si ce n'est par les quantités de soldats qui partent au front. En revanche, pendant la seconde guerre mondiale, la ville est assiégée par les Allemands et des quartiers sont détruits par les bombardements massifs des alliés. C'est ainsi sur une ville partiellement reconstruite que la méthodologie mise en place est testée.

4.1.1 Données utilisées pour la ville de Nantes

Seule la BDTopo de l'ouest de l'agglomération nantaise était disponible au laboratoire. Une carte IGN de Nantes montre cependant que tous les quartiers typiques des villes européennes (Laborde, 1995) sont identifiables dans cette partie de l'agglomération ; elle correspond à la partie la plus urbanisée et regroupe également des surfaces de végétation et d'eau. De plus, vu le développement concentrique de la ville, il n'a pas été jugé nécessaire d'acquérir la partie est de l'agglomération.

La zone d'étude est plus petite que celle de Marseille : elle s'étend sur 10 km dans le sens nord-sud et 7 km dans le sens est-ouest. La carte 4-1 présente l'ouest de Nantes, traversé d'est en ouest par la Loire et par son affluent l'Erdre, identifiable au nord du centre-ville. La taille de la maille a été conservée afin de réaliser des comparaisons avec les résultats obtenus pour Marseille : elle est de 200 m * 200 m. Des variables ont été calculées avec DFMap pour construire un deuxième SIG décrivant les MOS et la morphologie des bâtiments de la ville de Nantes : la compacité, la hauteur, le périmètre et le volume des bâtiments, l'espacement moyen entre les bâtiments et leur nombre sur 4 ha, et la densité des surfaces bâties, des axes routiers, de végétation et d'eau.

4.1.2 Description de Nantes d'après les variables du SIG

La matrice construite est constituée des 10 variables (citées ci-dessus) et de 1750 observations (c'est-à-dire, les cellules couvrant l'ensemble de la zone d'étude). Des statistiques descriptives ont été calculées afin d'analyser la ville de Nantes.

Pour l'analyse de la morphologie des bâtiments, seules les cellules où la densité bâtie est supérieure à 0 ont été prises en compte (1511 cellules). La hauteur

moyenne des bâtiments est légèrement inférieure à celle de Marseille avec une moyenne de 7.3 m (cf. § 3.1.2). Le périmètre des bâtiments est au contraire supérieur avec une moyenne de 81.4 m et le volume est sensiblement inférieur avec une moyenne de 4398 m³. La densité bâtie est supérieure à celle de Marseille (0.17) et l'espacement moyen entre les bâtiments est de 44.7 m, ce qui signifie que les bâtiments sont plus rapprochés en moyenne à Nantes qu'à Marseille. De même, le nombre de bâtiments sur 4 ha est supérieur à Nantes avec 21.1 bâtiments. Enfin, la végétation ne représente que 5 % de la surface du tissu urbain nantais, les routes 10 % et l'eau 4.1 %.

Sur l'ensemble de la zone d'étude, la surface bâtie représente en moyenne 15%, les routes 9 %, la végétation 5.5% et l'eau 3.4 %. Les surfaces de végétation sont nettement moins importantes qu'à Marseille (cf. § 3.1.1).

4.1.3 Application de la méthodologie de classification

La méthodologie développée pour la ville de Marseille est appliquée à la ville de Nantes pour définir des quartiers à partir de variables issues de la BDTopo. Les mêmes variables sont utilisées et ont été standardisées pour éviter les effets de taille.

4.1.3.1 Définition du nombre de classes

Deux méthodes ont été proposées pour définir le nombre de classes. La figure 4-1 présente les résultats de la somme des écarts types et la figure 4-2 le rapport entre la variance intra-classe et la variance totale. Ces calculs sont réalisés pour deux variables : la densité bâtie et la densité de la végétation pour des classifications de 1 à 12 classes.

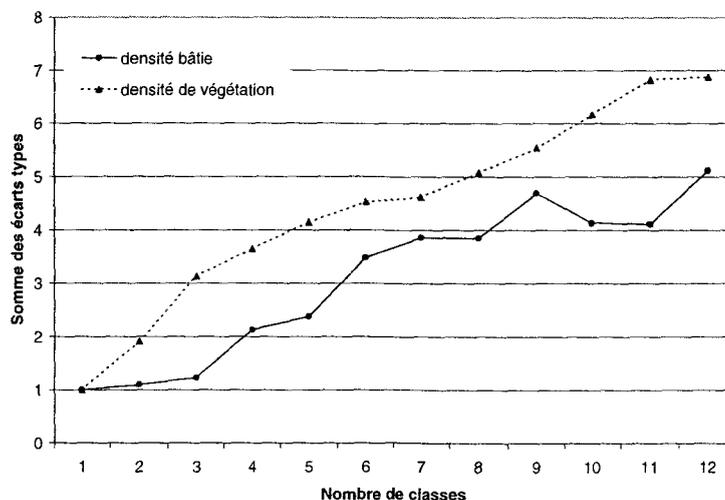


Figure 4-1: Somme des écarts types de la densité bâtie et de la densité de végétation en fonction du nombre de classes selon le choix « sample ».

Avec la première méthode et pour la densité de la végétation, la somme des écarts types augmente assez régulièrement, avec une légère rupture à 6-7 classes et une deuxième à 11-12 classes. Pour la densité bâtie, la somme des écarts types s'accroît également jusqu'à 7-8 classes et on retrouve un deuxième palier de cette somme à 10-11 classes. Deux paliers se distinguent donc : à 7 classes et à 11 classes.

Pour la deuxième méthode, le rapport entre les variances pour la densité de végétation évolue en escalier avec un premier décrochement entre 6 et 7 classes et un deuxième moins important entre 11 et 12 classes. Pour la densité bâtie, le rapport diminue fortement jusqu'à 3 classes puis se stabilise jusqu'à 9 classes où une nouvelle rupture est notée. Le choix du nombre de classes apparaît ici moins évident car les deux variables évoluent différemment. On retrouve peut être un premier palier à 7 classes et un deuxième à 10-11 classes...

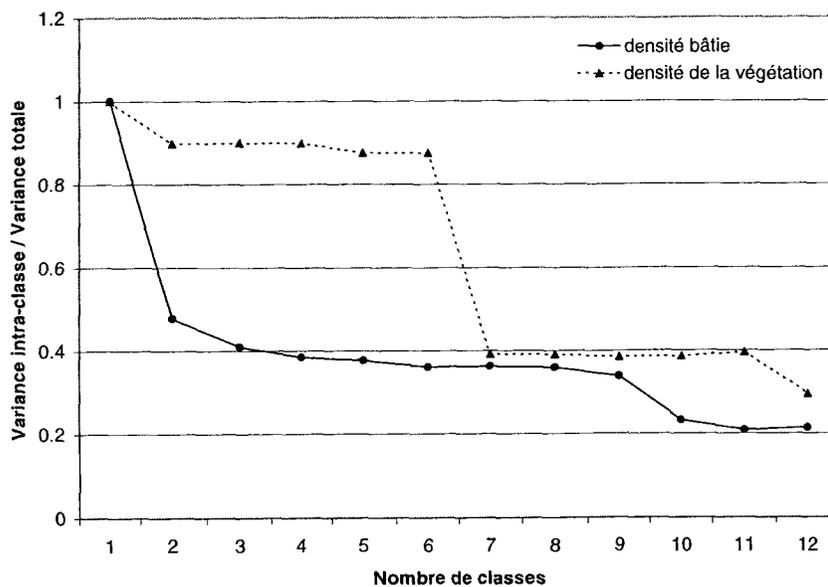


Figure 4-2: Rapport entre la variance intra-classe et la variance totale pour les variables densité bâtie et densité de végétation en fonction du nombre de classes selon le choix « sample ».

4.1.3.2 Classification en 8 classes de Nantes

Suite aux tests réalisés et présentés au chapitre 3.2.3, une classification est calculée avec la méthode k-means et le choix « sample » pour définir les centres initiaux des classes. Plusieurs itérations ont été lancées avec tout d'abord 7 classes, mais à chaque essai un quartier typique des villes européennes n'était pas représenté par une classe : soit le centre-ville appartenait à la même classe que les bâtiments collectifs, soit l'habitat collectif se confondait avec l'habitat individuel peu dense, soit un MOS (réseau hydrographique ou zone de végétation) n'était pas

représenté. La classification manquait au moins une classe, c'est pourquoi une classification en 8 classes a été lancée ; 8 classes correspondant au premier palier indiqué par la somme des écarts types de la densité bâtie. Les résultats sont plus satisfaisants d'un point de vue visuel (carte 4-2).

Moyennes	Classe 7 (Centre-ville)	Classe 6 (Individuel dense)	Classe 2 (Collectif)	Classe 3 (Individuel peu dense)	Classe 5 (Gros bâtiments)
COMPACITE	0.63	0.70	0.66	0.72	0.61
DENS_BAT	0.39	0.21	0.14	0.05	0.29
ESPACEMENT	23.06	24.21	47.54	73.66	51.22
HAUTEUR	9.88	5.93	10.54	5.31	13.63
NB_BATI	20.18	37.10	11.60	9.38	5.87
PERIMETRE	130.77	67.43	101.17	57.05	190.03
VOLUME	9940.86	1483.61	6277.15	1430.87	31942.95
DENS_ROUTE	0.13	0.13	0.12	0.06	0.10
DENS_VEG	0.02	0.02	0.05	0.05	0.00
DENS_HYDRO	0.01	0.00	0.04	0.01	0.07
Effectif (%)	8.4	33.4	13.8	20.6	3.5

Tableau 4-1 : Moyennes des classes urbaines issues de la classification en 8 classes de Nantes.

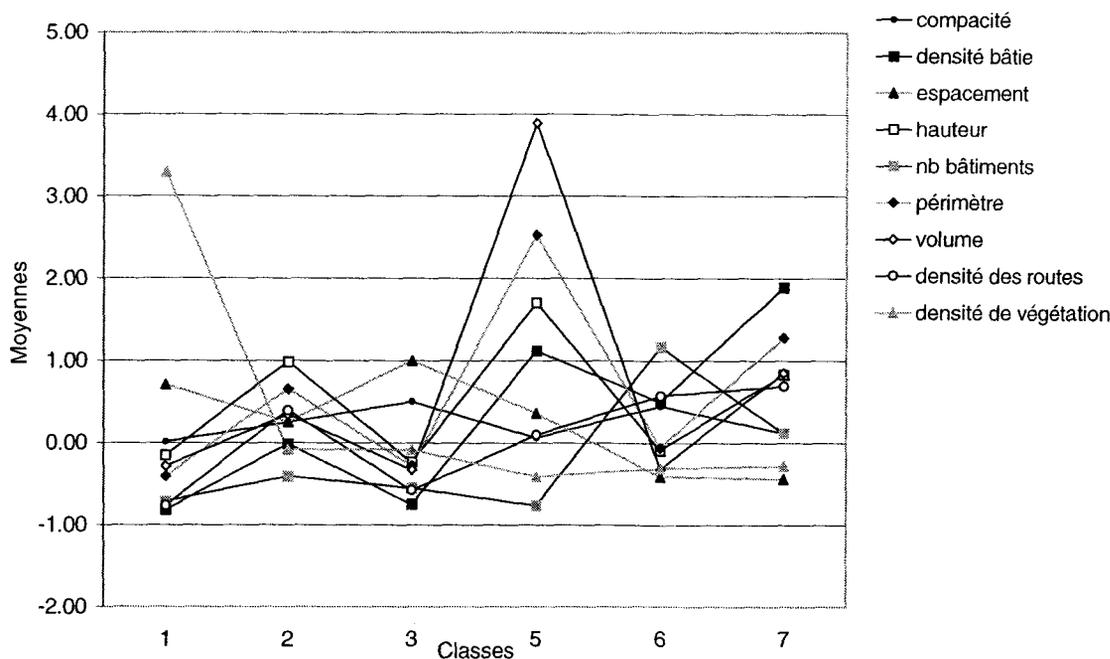
Cinq classes urbaines peuvent ainsi être définies (tableau 4-1) :

- la classe 7 regroupe les bâtiments du centre-ville ; ils mesurent une vingtaine de mètres en moyenne et la densité bâtie moyenne est de 0.4. Les bâtiments sont assez imposants avec un périmètre moyen de 130 m et un volume de 9940 m³. Leur forme est assez découpée avec une compacité moyenne de 0.63. L'espacement moyen entre les bâtiments est faible (23 m en moyenne) de même que le nombre de bâtiments sur 4 ha (20.2 bâtiments). Enfin, la végétation occupe 2% de la surface et les routes 13 %.
- la classe 5 représente les bâtiments de la zone industrielle qui se situent principalement au sud du centre-ville. La taille des bâtiments est beaucoup plus importante (en moyenne, hauteur de 13.6 m, périmètre de 190 m et volume de 31942 m³) mais la compacité est très proche de celle des bâtiments du centre-ville. La densité bâtie est plus faible avec seulement 29 % de la surface bâtie. L'espacement moyen entre les bâtiments (51.2 m) est plus élevé qu'en centre-ville, par contre le nombre de bâtiments est seulement de 5.9 sur 4 ha. Cette classe contient en partie les bâtiments industriels de l'île Beaulieu et ceux en bord de Loire (carte 4-1) ; la densité des surfaces d'eau est d'ailleurs de 0.07. Enfin, la végétation n'est pas présente dans ce type de structure et les routes représentent une surface légèrement moins importante que dans les autres classes (10 %).

➤ la classe 2 correspond à l'habitat collectif. Les quartiers Bellevue à l'ouest de la ville, Le Breil Malville et Les Dervallières plus au nord, et enfin au nord-est le quartier des facultés en bordure de l'Erdre (carte 4-1) sont facilement identifiables sur la carte 4-2. Le château de Rezé est également visible au sud de la Loire. Des bâtiments assez imposants en bordure de la Loire et dans les zones aérées du centre-ville sont également inclus dans cette classe. Les bâtiments mesurent en moyenne 10.5 m de haut, avec un périmètre de 101 m et un volume de 6277 m³. Leur forme est assez peu compacte car la compacité est de 0.66. L'espacement moyen entre les bâtiments est de 47.5 m et le nombre de bâtiments sur 4 ha est de 11.6 bâtiments. La surface bâtie ne représente en moyenne que 14 % de la surface, la végétation et les routes 5 % chacune et le réseau hydrographique 4 %.

➤ les classes 3 et 6 représentent l'habitat individuel plus ou moins dense. Les bâtiments ont à peu près la même morphologie dans les deux classes. Ce sont des bâtiments de plus petite taille par rapport aux classes précédentes. La hauteur moyenne varie de 5.3 m à 5.9 m, le périmètre de 57 m à 67.4 m et le volume de 1431 m³ à 1483 m³. La densité bâtie permet entre autre de distinguer les deux classes avec des valeurs respectives de 0.05 et 0.21. De même le nombre de bâtiments varie d'une classe à l'autre avec seulement 9.4 bâtiments sur 4 ha pour la classe 3 contre 37 bâtiments en moyenne dans la classe 6. L'espacement moyen entre les bâtiments est également plus important pour la classe 3 (73.6 m) que pour la classe 6 (24.2 m). Enfin, la différence de densité de végétation entre ces deux classes est assez faible avec des surfaces respectives de 5 % et 2 %. La surface occupée par les routes est de 6 % dans la classe 3 et de 13 % dans la classe 6. Les surfaces d'eau sont négligeables.

Les zones de végétation (classe 1) et de surfaces d'eau (classe 8) ne représentent qu'une faible partie des MOS de la zone d'étude, respectivement 5.4 % et 3.7 %. On peut noter par ailleurs que la densité de 1 est atteinte par ces deux MOS mais 50% des valeurs restent comprises entre 0.33 et 0.57 pour la végétation et 0.58 et 0.87 pour l'hydrographie, ce qui permet de se rendre compte de la petite taille des surfaces recouvertes par la végétation ou par l'eau.



Classes : 1 : Végétation, 2 : Collectif, 3 : Individuel peu dense, 5 : Gros bâtiments, 6 : Individuel dense, 7 : Centre-ville

Figure 4-3: Valeurs moyennes des variables standardisées pour les classes urbaines et la classe végétation, issues de la classification en 8 classes de Nantes

La figure 4-3 représente les valeurs moyennes des variables standardisées de chaque classe urbaine et de la végétation ; la végétation est représentée sur ce graphe car elle est considérée ici comme un élément du tissu urbain et sa densité moyenne est de 0.04, ce qui n'est pas négligeable. La compacité présente peu de différence entre les classes ; en effet, elle évolue, en moyenne et en valeur réelle, entre 0.6 et 0.7 pour les classes urbaines. La densité bâtie se distingue bien d'une classe à l'autre sauf entre la classe 1 (zone de végétation) et la classe 3 (habitat individuel peu dense) mais d'autres variables permettent de distinguer ces deux classes comme la densité de la végétation. L'espacement moyen entre les bâtiments a des valeurs moyennes proches pour les classes 1, 2 et 5 et pour les classes 6 et 7. De même, les valeurs de la hauteur moyenne des bâtiments sont très proches pour les classes 2 et 7, qui représentent respectivement les zones d'habitat collectif et le centre-ville et pour les classes 1, 3 et 6, qui représentent l'habitat individuel plus ou moins dense. Pour ces trois dernières classes, les variables périmètre et volume ont également des valeurs moyennes proches. Le nombre de bâtiments varie peu pour les classes 1, 2, 3 et 5. La différence est plus marquée pour les classes 6 et 7. La densité surfacique des routes varie peu pour les classes 2, 6 et 7, et pour les classes 1 et 3. Enfin la densité de la végétation a une valeur moyenne proche dans les

classes représentant l'habitat collectif (classe 2) et l'habitat individuel peu dense (classe 3), et dans les autres classes urbaines où la végétation est très peu présente.

Cette classification apparaît satisfaisante car chaque type de tissu urbain et MOS est représenté par une classe. Les coefficients de variation ont été calculés pour les variables de chaque classe urbaine (tableau 4-2). Les résultats sont assez proches de ceux obtenus pour la classification de Marseille. La variable volume est celle qui présente le plus de variabilité dans les classes avec des coefficients de variation supérieurs à 0.5. En dehors de cette variable, les classes Centre-ville, Individuel dense et Collectif sont relativement assez homogènes (seul le nombre de bâtiments varie de plus de 50% dans la classe Collectif). Les classes Individuel peu dense et Gros Bâtiments sont assez hétérogènes dans l'ensemble.

Coef. de variation (%)	Classe 7 (Centre-ville)	Classe 6 (Individuel dense)	Classe 2 (Collectif)	Classe 3 (Individuel peu dense)	Classe 5 (Gros bâtiments)
COMPACITE	9.66	7.71	11.00	10.95	15.02
DENS_BAT	23.80	31.83	44.47	77.21	54.93
ESPACEMENT	41.94	28.86	43.43	53.33	54.11
HAUTEUR	29.62	26.25	38.50	36.62	54.04
NB_BATI	41.52	26.66	58.00	76.30	75.45
PERIMETRE	20.85	24.97	29.54	41.86	30.51
VOLUME	52.27	53.87	56.48	110.03	52.65
DENS_ROUTE	37.56	30.01	44.78	82.77	63.82
DENS_VEG	226.82	248.14	169.20	151.80	476.74
DENS_HYDRO	449.29	914.40	277.13	357.25	196.11

Tableau 4-2 : Moyennes des classes urbaines issues de la classification en 8 classes de Nantes.

En résumé, la distinction entre les classes est moins bonne que pour la classification de Marseille car il semble que la différence entre les quartiers soit moins marquée à Nantes qu'à Marseille. D'autre part, les classes sont assez homogènes dans l'ensemble sauf deux classes et la variable volume. Comme pour Marseille, une seconde classification a été calculée avec un plus grand nombre de classes.

4.1.3.3 Classification en 11 classes de Nantes

D'après les figures 4-1 et 4-2 permettant de choisir le nombre de classes sur Nantes, un deuxième palier se dessinait autour de 10-11 classes, une classification a donc été réalisée avec 11 classes afin d'améliorer les résultats, surtout

l'homogénéité des classes 2 et 5. La carte 4-3 présente les résultats de cette classification. Le découpage du tissu urbain est plus détaillé ; il est représenté dans 7 classes. Les classes mises en évidence dans la classification précédente se retrouvent dans les résultats de cette classification ; les caractéristiques de chaque classe ont par ailleurs évolué entre les deux classifications ; elles sont résumées dans le tableau 4-3.

La taille des bâtiments inclus dans la classe représentant le centre-ville est plus importante : la hauteur moyenne des bâtiments est de 11 m, le périmètre de 156 m et le volume de 17531 m³. De même, l'espacement moyen entre les bâtiments augmente avec un espacement de 32 m et le nombre de bâtiments est plus faible avec seulement 13 bâtiments sur 4 ha. Les autres caractéristiques de cette classe n'ont pas changé.

Pour la classe représentant l'habitat individuel dense, seul le nombre de bâtiments sur 4 ha a légèrement augmenté avec une moyenne de 41.5 bâtiments. Par contre le périmètre et le volume moyen des bâtiments sont moins importants avec des valeurs moyennes respectives de 60 m et 1086 m³.

Moyennes	Classe 5 (Centre-ville)	Classe 9 (Individuel dense)	Classe 6 (Collectif)	Classe 10 (Individuel peu dense)	Classe 11 (Gros bâtiments)
COMPACITE	0.62	0.73	0.63	0.72	0.62
DENS_BAT	0.39	0.20	0.12	0.08	0.34
ESPACEMENT	32.07	23.71	57.86	41.73	53.69
HAUTEUR	11.00	5.49	15.59	5.26	11.06
NB_BATI	12.98	41.48	8.69	15.50	3.25
PERIMETRE	156.3	59.78	115.28	61.72	227.48
VOLUME	17531.21	1086.10	10387.30	1456.61	53229.93
DENS_ROUTE	0.12	0.13	0.12	0.06	0.05
DENS_VEG	0.01	0.01	0.05	0.06	0.00
DENS_HYDRO	0.02	0.00	0.06	0.01	0.15
Effectif (%)	6.4	20.5	5.4	14.5	0.9

Tableau 4-3 : Moyennes des variables des classes 5, 6, 9, 10 et 11, issues de la classification en 11 classes de Nantes

La classe Collectif de la classification précédente a été divisée en deux classes : 6-Collectif et 7-Petit collectif. Les bâtiments de la classe Collectif sont d'une plus grosse taille avec une hauteur moyenne de 15.6 m, un périmètre moyen de 115 m et un volume de 10387 m³. La densité bâtie est de 0.12, c'est-à-dire un peu moins élevée par rapport aux résultats de la classification précédente. Le nombre de bâtiments a diminué avec seulement 8.7 bâtiments sur 4 ha et l'espacement entre les bâtiments a augmenté avec en moyenne 58 m entre les bâtiments.

Pour la classe Petit collectif (tableau 4-4), les bâtiments ne mesurent que 7.6 m de haut avec un périmètre moyen de 84 m et un volume de 3767 m³. L'espacement entre les bâtiments est plus faible (50.7 m) et le nombre de bâtiments sur 4 ha plus important que pour la classe précédente (12.7 bâtiments). La densité des surfaces des routes est à peu près identique pour les classes Collectif et Petit collectif (respectivement 0.12 et 0.14) et la densité de la végétation est très faible (0.05 et 0.02).

De la même manière, la classe Individuel peu dense a été séparée en deux classes ; 10-Individuel peu dense et 3-Individuel épars. Ces deux classes regroupent des bâtiments dont la morphologie est assez proche ; respectivement la hauteur moyenne est de 5.3 m et 5.6 m, le périmètre de 62 m et 54 m et le volume de 1457 m³ et 1604 m³. La densité bâtie est plus importante dans la classe Individuel peu dense (0.08) que dans la classe Individuel épars (0.02) mais la densité de la végétation est similaire pour les deux classes (0.06) ; à Marseille, dans les quartiers d'habitat individuel, la densité bâtie diminuait généralement au profit de la densité de végétation, ce n'est pas le cas à Nantes. La densité des surfaces des routes est également assez faible pour ces deux classes avec une surface de 4 % pour la classe Individuel épars et 6 % pour la classe Individuel peu dense.

Enfin, la classe 2 a été créée par cette classification. Cette classe recouvre les quartiers péricentraux de Nantes (tableau 4-4). Elle se caractérise par des bâtiments d'une hauteur moyenne de 7.8 m, un périmètre moyen de 96 m et un volume moyen de 3597 m³. Les bâtiments ont une forme aussi compacte que ceux du centre-ville et sont en moyenne séparés les uns des autres de 21 m. Le nombre de bâtiments sur 4 ha est de 29.4 bâtiments. La densité de la végétation est très faible avec seulement 3 % de la surface couverte par de la végétation. La surface occupée par les routes est de 14 %, elle est légèrement supérieure à celle du centre-ville.

Moyennes	Classe 2 (Péricentre)	Classe 7 (Petit collectif)	Classe 3 (Individuel épars)
COMPACITE	0.65	0.68	0.71
DENS_BAT	0.30	0.13	0.02
ESPACEMENT	21.10	50.67	113.03
HAUTEUR	7.82	7.57	5.63
NB_BATI	29.39	12.66	4.46
PERIMETRE	96.50	84.42	53.83
VOLUME	3596.99	3767.19	1604.50
DENS_ROUTE	0.14	0.14	0.04
DENS_VEG	0.03	0.02	0.06
DENS_HYDRO	0.00	0.03	0.02
Effectif (%)	14.3	10	8.8

Tableau 4-4 : Moyennes des variables des classes 2, 3 et 7 de la classification en 11 classes de Nantes.

D'après le coefficient de variation calculé pour chaque variable (tableau 4-5), des améliorations sont apportées par la nouvelle classification pour les classes Individuel dense, peu dense, Collectif et Gros bâtiments. En revanche, pour la majorité des variables de la classe Centre-ville, les coefficients de variation ont augmenté. La variabilité de la variable volume a diminué pour chacune des classes.

Coef. de variation (%)	Classe 5 (Centre-ville)	Classe 9 (Individuel dense)	Classe 6 (Collectif)	Classe 10 (Individuel peu dense)	Classe 11 (Gros bâtiments)
COMPACITE	12.73	6.34	12.95	9.96	16.88
DENS_BAT	31.99	26.96	41.67	64.05	50.09
ESPACEMENT	55.63	23.34	40.51	50.55	61.68
HAUTEUR	32.38	23.65	33.78	32.80	66.35
NB_BATI	60.48	21.43	58.57	57.73	62.05
PERIMETRE	24.39	18.67	32.62	39.92	31.45
VOLUME	38.55	40.13	51.53	102.47	39.43
DENS_ROUTE	46.95	25.55	46.25	56.01	89.83
DENS_VEG	338.04	270.62	171.48	139.00	Na
DENS_HYDRO	311.53	888.48	221.58	388.93	138.09

Tableau 4-5 : Coefficients de variation des variables des classes 5, 6, 9, 10 et 11, issues de la classification en 11 classes de Nantes (en gris les coefficients de variation supérieurs à ceux de la classification en 8 classes)

Les trois nouvelles classes créées sont assez homogènes dans l'ensemble sauf la classe Individuel épars qui présente une variabilité importante pour les variables densité bâtie, nombre de bâtiments, périmètre et volume (tableau 4-6). Cette classe comporte des cellules qui ne contiennent qu'un fragment de bâtiment ou quelques bâtiments ce qui permet d'expliquer la forte variabilité des variables directement liées au nombre de bâtiments inclus dans la maille.

Coef. de variation (%)	Classe 2 (Péricentre)	Classe 7 (Petit collectif)	Classe 3 (Individuel épars)
COMPACITE	6.75	9.47	12.39
DENS_BAT	23.42	48.91	88.39
ESPACEMENT	27.24	42.86	22.06
HAUTEUR	25.37	32.14	42.60
NB_BATI	26.1	56.06	54.25
PERIMETRE	18.29	33.91	52.13
VOLUME	52.22	69.81	127.86
DENS_ROUTE	30.51	33.80	103.53
DENS_VEG	198.91	243.76	148.69
DENS_HYDRO	634.43	309.38	315.40

Tableau 4-6 : Coefficients de variation des variables des classes 2, 3 et 7 issues de la classification en 11 classes de Nantes

Cette classification apparaît donc pertinente car elle détaille le tissu urbain de la même manière que pour Marseille. Toutefois, après analyse des résultats, on peut se demander si la maille de 200 m est vraiment adaptée au cas de Nantes. Une taille plus fine pourrait permettre de mieux définir le tissu urbain, notamment en centre-ville qui est traversé par le Boulevard des 50 Otages, large d'une cinquantaine de mètres et qui rend le tissu inhomogène. De plus, certains quartiers reconstruits après la seconde guerre mondiale se combinent de nos jours avec les immeubles anciens dont la morphologie est différente. Enfin, les îlots urbains de Nantes ont une taille inférieure à ceux de Marseille, ce qui pourrait permettre de diminuer la taille de la maille. Cependant, comme la ville de Nantes a été utilisée dans cette étude seulement pour valider la méthodologie, ces hypothèses ne seront pas vérifiées par de nouveaux calculs.

4.1.4 Conclusion partielle

La méthodologie développée dans le chapitre 3 pour la ville de Marseille peut être appliquée à la ville de Nantes et fournit des résultats pertinents. Les méthodes proposées pour définir le nombre de classes sont toutefois à prendre avec précautions. Elles proposent un nombre de classes, à une classe près ; le bon sens permet ensuite de choisir le nombre de classes définitif autour de ce nombre proposé. Des classes d'une relative homogénéité sont créées à partir des variables morphologiques et des MOS. Elles possèdent chacune leurs propres caractéristiques ce qui laisse supposer qu'elles auront une influence différente sur la météorologie locale. Comme pour Marseille, les différences entre les classes peuvent être assez minimes dans les classifications avec un nombre élevé de classes.

Le nombre de classes urbaines est similaire, à une classe près entre les classifications de Nantes et de Marseille ; la classe Individuel épars dans la classification en 8 classes et la classe Individuel résiduel dans la classification en 11 classes n'apparaissent pas comme c'est le cas pour Marseille. Ce sont des structures urbaines qui ne sont pas identifiées sur la zone d'étude de Nantes, soit parce qu'elles n'existent pas, soit parce que le nombre de classes n'a pas permis la formation de classes supplémentaires. Les principaux quartiers typiques des villes européennes sont mis en évidence par cette méthode de classification et chaque classe semble correspondre à un type de quartier.

4.2 Validation des résultats de la classification de Marseille

La méthodologie mis en place sur la ville de Marseille a été validée sur la ville de Nantes. Il reste toutefois à valider les résultats obtenus pour Marseille. Tout

d'abord, on peut se demander si les dix variables utilisées sont vraiment nécessaires à la définition des classes urbaines. Dans un deuxième temps, les résultats obtenus pour les MOS doivent être corrigés car la somme des densités n'est pas égale à 1 ce qui signifie qu'une part importante des surfaces n'est pas identifiée. Ce défaut n'est pas une erreur de calcul, il est directement lié à la nature de la BDTopo qui ne représente qu'une partie des objets occupant la surface, cette base de données n'ayant pas pour vocation de fournir un pavage complet des surfaces. De ce fait, il sera difficile d'estimer correctement les transferts d'énergie entre le sol et l'atmosphère urbaine, de définir les propriétés thermiques des surfaces, etc.

4.2.1 Validation du nombre de variables utilisées dans les classifications

Dix variables du SIG de Marseille ont été sélectionnées pour décrire la morphologie des bâtiments et les MOS. Il est possible que ces variables n'aient pas eu le même poids pour définir les classes. L'analyse discriminante est une méthode statistique multivariée qui permet, entre autre, de mesurer le poids discriminant de chaque variable, on parle de son « pouvoir discriminant ».

Le but général de l'analyse discriminante est de séparer au mieux les classes à partir d'un certain nombre de variables. Cette méthode s'applique à une matrice d'individus caractérisés par des variables quantitatives et par une variable identifiant la classe à laquelle l'individu appartient. Cette méthode part de la connaissance de la partition des individus d'une population et cherche les combinaisons des variables décrivant les individus qui conduisent à la meilleure discrimination entre les classes. Cette méthode peut être utilisée pour vérifier le classement des individus dans les classes, en fournissant comme résultat le pourcentage d'observations classées correctement par rapport au modèle construit. Elle permet également de connaître le pouvoir discriminant de chaque variable. Plusieurs critères sont couramment utilisés pour mesurer le pouvoir discriminant d'une variable, on en retiendra seulement un dans cette étude : le pourcentage d'observations classées correctement en fonction du nombre de variables (Celeux *et al.*, 1989 ; Tomassone *et al.*, 1988).

L'analyse discriminante a été appliquée aux trois classifications réalisées sur Marseille avec pour objectif de tester le pouvoir discriminant de chacune des variables.

Tout d'abord, pour la classification en 7 classes de Marseille (figure 4-4), on note l'influence des variables densité de la végétation et des surfaces d'eau qui permettent de classer correctement 60 % des observations. 100% des observations

sont ainsi classées correctement dans la classe 3 (Surface d'eau) et 99 % dans la classe 6 (Végétation). D'après la figure 4.4a, le pourcentage d'observations classées correctement est de 96 % lorsque toutes les variables sont utilisées ; on obtient un pourcentage de 94 % avec seulement sept variables. Le volume, le périmètre et la compacité sont les variables qui ont le pouvoir discriminant le plus faible.

Pour la classification en 6 classes du tissu urbain, l'ensemble des variables permet de classer correctement 94 % des observations ; avec 7 variables, 91.6 % des observations sont bien classées (figure 4-4b). La compacité des bâtiments et l'espacement moyen entre les bâtiments sont les deux variables qui sont le moins discriminatives.

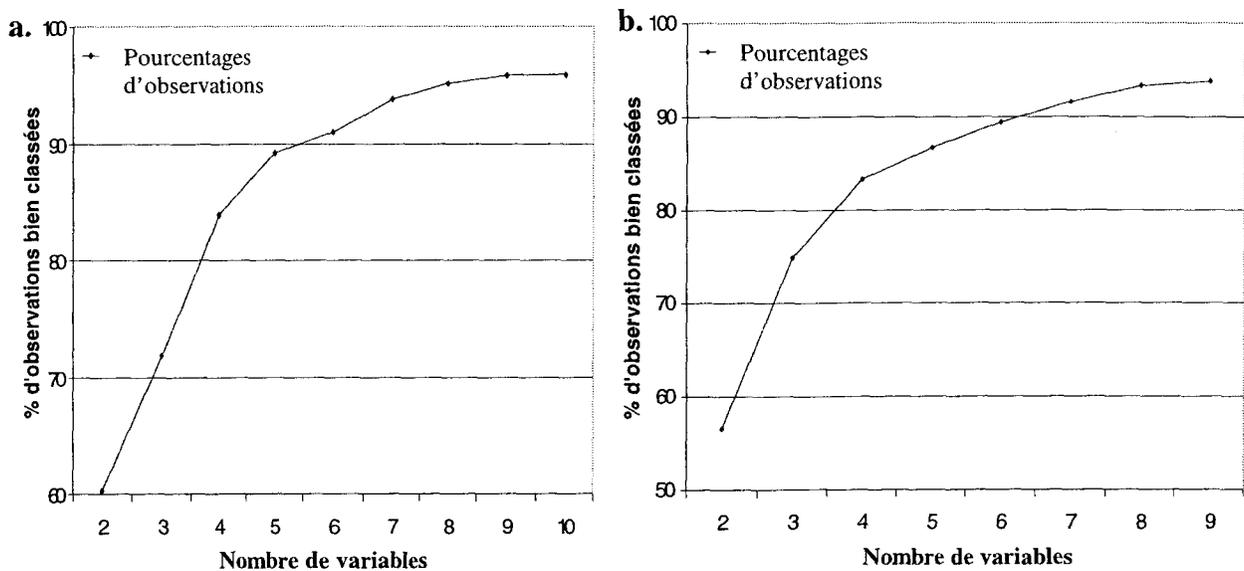


Figure 4-4: Pourcentages d'observations bien classées en fonction du nombre de variables pour la classification en 7 classes de Marseille (a), en 6 classes du tissu urbain (b).

Pour la classification en 9 classes, les résultats sont différents : seulement 90 % des observations sont classées correctement à partir des 9 variables (figure 4-5). On note également que 7 variables suffisent à placer correctement 89 % des observations. Cette fois-ci, ce sont les variables volume et périmètre moyen des bâtiments qui sont les moins discriminantes.

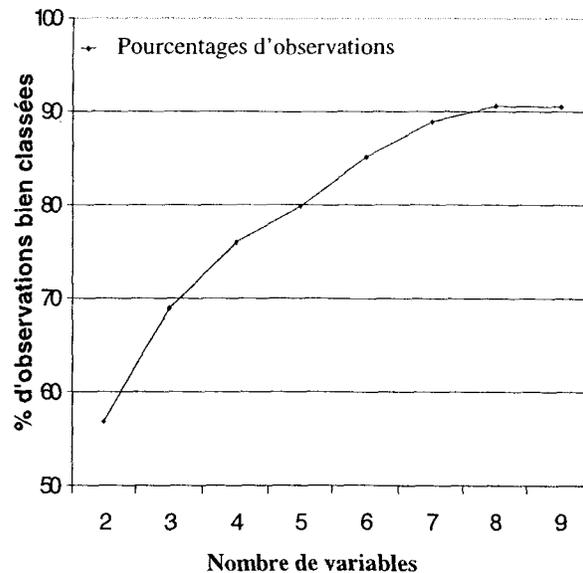


Figure 4-5: Pourcentages d'observations bien classées en fonction du nombre de variables pour la classification en 9 classes du tissu urbain

Les variables n'ont pas le même pouvoir discriminant pour les trois classifications. La variable compacité des bâtiments varie faiblement d'une classe à l'autre ce qui peut expliquer son faible pouvoir discriminatif. Par contre, les variables périmètre et peut-être le volume peuvent être des variables qui sont redondantes des autres variables mais elles contribuent tout de même à la classification d'observations dans certaines classes. Comme les résultats sont différents pour les trois classifications, il est difficile de conclure de manière plus précise sur le choix des variables utilisées dans les classifications, chacune apparaissant nécessaire à la formation d'une classe.

4.2.2 Corrections et améliorations des caractéristiques de chaque classe urbaine

Des photos aériennes noir et blanc de la zone d'étude ont été géoréférencées dans le SIG afin de les superposer aux informations de la BDTopo. Chaque MOS a ainsi pu être identifié. D'autres photos aériennes, en couleur, prises d'avion lors de mesures effectuées pendant ESCOMPTE, ont aussi été utilisées pour ce travail.

Pour les classes urbaines Centre-ville, Péricentre, Collectif, Petit collectif, Individuel dense, Individuel peu dense et Individuel épars de la classifications en 9 classes réalisées sur le tissu urbain de Marseille, des zones-tests ont été définies (carte 4-4). Chaque MOS a été identifié et sa surface calculée puis rapportée à la surface de la zone-test.

Des MOS ne figurant pas dans la BDTopo ont ainsi pu être répertoriés et leur surface estimée pour chaque classe. Il s'agit tout d'abord de zones goudronnées

ombragées par des arbres, appelées « Asphalte + végétation », abrégé en *Asph + vég* dans le tableau 4-7. Ce MOS se retrouve principalement dans les zones d'habitat collectif mais il représente également les haies d'arbres le long des rues ou les espaces publics ombragés. Un deuxième MOS correspond aux zones recouvertes d'herbe, c'est-à-dire aux surfaces qui entourent les immeubles collectifs, aux espaces verts publics ou à des terrains vagues ou naturels. Dans les zones d'habitat individuel peu dense et épars, des terres agricoles (Terre agri) ont pu être identifiées ; les cultures sont pour la plupart des cultures saisonnières car à l'époque où ont été prises les photos (en mars) les champs étaient labourés. La Végétation a également été divisée en deux classes afin de distinguer les zones de végétation formée par des arbres ou des broussailles (Bois brou.) recouvrant le sol de manière uniforme et assez dense des zones de végétation formées d'arbustes où le sol est visible car la densité est faible. Ce dernier MOS est appelé « Végétation éparse » (Vég épar) et se retrouve principalement dans les zones d'habitat peu dense et épars. Enfin, le dernier MOS identifié est le sol nu, il correspond à des zones de gravier tassé ou de sable, non recouvertes d'herbe, correspondant à des chemins dans les parcs, à des espaces laissés à l'abandon ou à des zones naturellement érodées. Ces MOS supplémentaires permettent de mieux définir l'occupation des sols en milieu urbain et surtout d'avoir une information pour l'intégralité des surfaces.

	Centre-ville		Péri-centre		Collectif		Petit collectif		Ind. dense		Ind. peu dense		Ind. épars	
	Surf. (%)	Coef corr	Surf. (%)	Coef corr	Surf. (%)	Coef corr	Surf. (%)	Coef corr	Surf. (%)	Coef corr	Surf. (%)	Coef corr	Surf. (%)	Coef corr
Surf bâtie	46	+11	38	+13	11	+9	14	+7	18	+7	5	-1	3	0
Surf imper.	16	+12	14	+15	12	+14	15	+15	12	+8	5	-3	3	-1
Asph + vég	-	+3	-	+4	-	+26	-	0	-	2	-	0	-	
Bois brou.	1	+9	1	+7	17	-3	8	+8	8	+42	12	0	68	-28
Vég épar	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	+69	-	+40
Herbe	-	+2.5	-	+7.5	-	+11	-	+23	-	+2.5	-	+9	-	+7
Terre agri	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	+1	-	+1
Sol nu	-	+0.5	-	0.5	-	+3	-	+10	-	+0.5	-	+3	-	+7

Tableau 4-7 : MOS de 7 classes urbaines de la classification en 9 classes du tissu urbain de Marseille et coefficients correcteurs additionnels proposés.

Quelques corrections ont été proposées afin de corriger le pourcentage des surfaces des MOS estimés à partir de la BDTopo. Les coefficients correcteurs additionnels proposés pour la surface bâtie sont relativement faibles car ce type de surface est bien estimée par la BDTopo (cf. § 2.2). En revanche, la surface couverte par la végétation est très sous-estimée car seules les zones dont la taille est supérieure à 3 ha sont recensées dans la BDTopo (cf. § 2.1.3). Or l'habitat individuel dense se compose de maisons et de jardins, formés le plus souvent par une pelouse et des arbres ; les pelouses sont cachées par les arbres sur les photos aériennes mais leur surface a été estimée à 2.5 % (tableau 4-7). Les jardins identifiés ici correspondent principalement à des arbres. De même, en centre-ville les îlots urbains forment des cours intérieures où des arbres et de l'herbe peuvent être répertoriés. Cependant, il est difficile d'estimer leur surface à partir des photos noir et blanc car ces zones sont souvent en partie à l'ombre des bâtiments. L'utilisation de photos couleur a permis d'identifier des zones de végétation et d'estimer leur surface. Enfin, un troisième type de surface identifié grâce à la BDTopo doit être fortement corrigé : il s'agit des surfaces imperméables qui ne sont représentées que par la surface des routes. Or il existe d'autres surfaces imperméables goudronnées ou bétonnées correspondant à des parkings, des chemins privés, des trottoirs, des allées, des terrasses, ... ce qui explique les corrections importantes apportées à ce MOS.

Enfin, les classes Individuel résiduel et Gros bâtiments ont été traitées à part des autres classes urbaines, l'estimation des différents MOS étant assez simple à corriger. Pour la classe Gros bâtiment, les surfaces bâtie et de végétation estimées à partir de la BDTopo sont acceptables, seule les surfaces imperméables doivent être réévaluée afin d'atteindre une couverture de la surface de 100%. De même, pour la classe Individuel résiduel seules les surfaces de végétation doivent être augmentées pour obtenir une information pour la surface totale (cf. tableau 4-11).

L'estimation de ces coefficients correcteurs reste dépendante d'une part de la zone-test qui a été choisie pour les calculer et d'autre part de l'interprétation qui a pu être faite de la photo aérienne. Afin de valider ces coefficients correcteurs, une application a été réalisée sur le quartier St Jérôme où une nouvelle interprétation des MOS a été réalisée à partir de photos aériennes. Ce quartier se situe au nord de Marseille, à la limite de la zone rurale. Il est formé principalement de trois types de quartiers : Collectif, Individuel dense et Individuel peu Dense.

4.2.3 Validation des corrections sur le quartier St Jérôme

Le quartier St Jérôme a abrité une station de mesures météorologiques pendant la campagne CLU-ESCOMPTE ; elle était située sur le toit de l'IUT. Afin d'analyser l'influence des caractéristiques physiques et aérodynamiques de la zone sur les mesures, une étude de *footprints* (ou empreintes) a été réalisée par Thibault Pénélon dans le cadre de son post-doctorat au Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'École Centrale de Nantes. Cette étude a pour objectif de valider, voire de corriger les mesures effectuées par la station météorologique de l'IUT, dans le cadre de la validation du modèle de sol SM2-U (Dupont *et al.*, 2000). Une zone de travail de 4 km * 4 km, centrée sur l'IUT a été définie (carte 4-5). Les classifications de Marseille ont été utilisées dans cette étude afin de définir les différentes caractéristiques morphologiques et les MOS des différentes zones d'influence sur les mesures, définies selon la direction principale du vent pendant la campagne.

Trois zones-tests ont alors été définies pour chacun des trois quartiers mis en évidence par les trois classifications de Marseille (cartes 4-5 à 4-7).

4.2.3.1 Validation visuelle de la classification

Une première validation de la classification est faite de manière visuelle. La carte 4-5 représente à la fois les classes de la classification en 7 classes réalisée sur Marseille et l'information initiale contenue dans la BDTopo : chaque bâtiment est représenté ainsi que chaque zone de végétation, en distinguant les bois des broussailles. Cette carte permet de vérifier la réalité représentée par chaque classe.

La classe Végétation (classe 6) apparaît au nord de la zone d'étude et on peut vérifier qu'aucun bâtiment n'est inclus dans les cellules et qu'elles correspondent bien à des zones de végétation. De même, la classe Sol sans information (classe 2) ne contient aucun élément issu de la BDTopo, sauf une cellule qui inclut une partie d'une zone de végétation et un morceau de bâtiment.

Pour les classes représentant les zones urbaines, le découpage est assez représentatif de la réalité ; même si on peut noter quelques exceptions, les résultats sont satisfaisants. En effet, la classe Collectif (classe 5) est formée de cellules qui contiennent parfois des bâtiments de petite taille mais vu l'organisation dans l'espace des bâtiments, seule une résolution plus fine aurait pu séparer ces bâtiments. De la même manière, des bâtiments d'une taille plus importante se situent dans des cellules appartenant à la classe Individuel dense (classe 4). Ces bâtiments constituent des zones assez denses et leur hauteur varie entre 5-6 m, seul leur périmètre est effectivement supérieur à celui de l'habitat individuel. On peut supposer que ces structures correspondent à des maisons individuelles collées les unes aux autres et représentées par une seule entité dans la BDTopo. Cette

hypothèse a été vérifiée à partir de photos aériennes de la zone et est confirmée dans la plupart des cas ; pour les autres cas se sont des bâtiments dont la surface est plus importante et qui correspondent à des entrepôts ou des gares de quartiers.

Avec la classification en 9 classes, la classe Petit collectif (classe 1) permet de regrouper les petits bâtiments de la classes Collectif (classe 5 de la classification en 7 classes) et les plus gros bâtiments de la classe Individuel dense (classe 2 de la classification en 7 classes). On peut observer l'amélioration apportée par cette nouvelle classification dans la zone-test 2 qui est alors composée de cellules de la classe Individuel dense et de la classe Petit collectif (carte 4-6).

Enfin, les informations initiales de la BDTopo sont superposées à la classification en 6 classes du tissu urbain (carte 4-7). Les résultats sont très proches de la classification en 7 classes.

D'un point de vue visuel, les résultats des trois classifications sont pertinents et l'identification des quartiers semble de plus en plus précise avec l'augmentation du nombre de classes.

4.2.3.2 Estimation des caractéristiques des quartiers

Les caractéristiques morphologiques et aérodynamiques de la zone d'étude, initialement calculées par DFMap, ont été utilisées en entrée du modèle de sol SM2-U. De nouveaux coefficients correcteurs des MOS ont été calculées pour les trois zones-tests afin d'obtenir une somme des densités égale à 1. La zone-test 2 a été réduite aux deux cellules qui appartiennent à la classe Individuel dense pour les trois classifications, pour évaluer la surface des différents MOS.

Comparées aux coefficients correcteurs du tableau 4-7, les propositions de corrections sont assez proches pour la classe Individuel peu dense (tableau 4-8). Par contre, pour la classe Individuel dense, la correction proposée pour la densité bâtie est nulle dans le cas présent alors qu'elle est de + 7 dans le tableau 4-7, ce qui donne une différence de densité entre les deux de 0.07. De même, pour la classe Collectif, les coefficients correcteurs sont différents pour les surfaces imperméables, les surfaces d'asphalte + végétation et les surfaces de Bois - broussaille, ce qui donne des différences de densité plus ou moins élevées entre les deux propositions de corrections ; la différence maximale entre les densités corrigées sur une même zone-test est de +/- 0.14.

	Collectif		Individuel dense		Individuel peu dense	
	Surface (%)	Correction	Surface (%)	Correction	Surface (%)	Correction
Surface construite	11	+ 9	18	0	5	-1
Surface imperméable.	12	+ 20	12	+ 10	5	0
Asphalte + végétation	-	+ 12	-	0	-	0
Bois - broussaille	17	+ 7	8	+ 40	12	- 4
Végétation éparse	-	0	-		-	+ 71
Herbe	-	+ 5	-	+ 7	-	+ 4
Terre agricole	-	0	-	0	-	+ 4
Sol nu	-	+ 6	-	+ 5	-	+ 4

Tableau 4-8 : MOS calculés à partir de la BDTopo et propositions de correction calculées à partir de photos aériennes pour le quartier St Jérôme.

Ces résultats montrent l'influence du choix de la zone d'étude pour estimer la surface de chaque MOS, ce qui laisse supposer qu'on ne peut pas donner une valeur exacte de la surface de chaque MOS. Il apparaît alors peut-être plus judicieux de donner une valeur comprise dans un intervalle. Dans ce sens, une typologie des quartiers urbains est proposée au paragraphe 4.4.

4.2.4 Vérification des modes d'occupation du sol du centre-ville de Marseille

Une étude menée par Lemonsu *et al.* (2003), a été réalisée sur le centre-ville de Marseille dans le quartier de la Cour d'Appel Administrative (CAA). Sur le toit de ce bâtiment se trouvait également une station de mesure pendant la campagne CLU-ESCOMPTE. Afin de valider le modèle TEB, les différents MOS ont été estimés par les auteurs sur une zone d'un kilomètre de diamètre autour de la CAA. A partir de photos aériennes, ils estiment la densité bâtie à 0.59, la densité des surfaces imperméables à 0.27 et la densité de la végétation à 0.13. Les résultats de Lemonsu *et al.* sont assez proches de ceux obtenus et présentés dans le tableau 4-4. La densité bâtie est ici supérieure de 0.02 par rapport aux résultats de Lemonsu *et al.* et la densité des surfaces imperméables de 0.01. Pour la végétation, si on somme les surfaces de Bois-broussaille et d'Herbe, on retrouve une densité égale à 0.005 près.

L'interprétation des photos aériennes par Lemonsu *et al.* est donc très proche de celle proposée précédemment ce qui conforte les corrections proposées précédemment pour ce quartier.

4.2.5 Comparaisons avec les résultats d'analyse d'images satellitales SPOT

Des images satellitales de SPOT ont été analysées au laboratoire Espace Géographique et Sociétés de l'Université du Maine dans le cadre de la campagne CLU-ESCOMPTE afin d'identifier de manière très précise et à fine résolution les MOS sur la région de Marseille.

Deux images SPOT du 17 juin 2000 et du 18 avril 1995 ont été utilisées. Après traitement des images, une classification en neuf classes a été réalisée dont deux classes urbaines : les zones d'habitat continu et discontinu. Des analyses plus précises ont été réalisées sur trois quartiers spécifiques afin de les comparer avec les résultats obtenus à partir de la BDTopo (Long *et al.*, 2003a ; Long *et al.*, 2003b). Il s'agit du quartier du centre-ville, du quartier St Barnabé (habitat individuel dense) et du quartier La Rose (habitat collectif) identifiés sur la carte 4-8. Pour ces trois quartiers la surface minérale et la surface végétale ont été estimées à partir de l'analyse des deux images SPOT et de l'analyse de la BDTopo (tableau 4-9).

Pour le centre-ville, la surface de végétation est estimée à 2.3 % d'après l'image de juin 2000 et à 1.9% d'après l'image d'avril 1995. Pour les zones d'habitat individuel dense, une analyse a été faite sur le quartier St Barnabé : le pourcentage de végétation est respectivement pour les deux images de 21.7 % et 42.4 %. Enfin, pour le quartier La Rose, la végétation couvre soit une surface de 8 %, soit une surface de 22.8 % d'après les deux images utilisées.

	Centre-ville			St Barnabé			La Rose		
	BDTopo	SPOT		BDTopo	SPOT		BDTopo	SPOT	
		1995	2000		1995	2000		1995	2000
Surface minérale (%)	85.5	98.1	97.7	45.5	57.6	78.3	49	77.2	92
Surface végétale (%)	12.5	1.9	2.3	52.5	42.4	21.7	25	22.8	8

Tableau 4-9 : Surfaces minérales et végétales estimées à partir de l'analyse d'images SPOT et de celle de la BDTopo.

La végétation est mieux estimée à partir de l'image du mois d'avril, période où la végétation est en pleine activité chlorophyllienne. En juin, à Marseille, les zones d'herbe et les jardins non-entretenus sont desséchés par la chaleur, les surfaces sont donc moins bien identifiables à partir d'images satellitales et se confondent avec les surfaces minérales. Les différences sont plus faibles en centre-ville à cause de la part peu importante occupée par la végétation dans ce quartier.

Les écarts sont notables entre les résultats obtenus à partir de l'image SPOT d'avril 1995 et les résultats de la classification après rectification des MOS (tableau 4-7). En centre-ville, la surface de végétation est plus importante d'après l'analyse de la BDTopo que celle des images SPOT car les surfaces d'ombre, comme dans les cours intérieures, peuvent être mal interprétées sur les images satellitales. Pour le quartier St Barnabé, on peut noter la même différence. Enfin, pour le quartier La Rose, les surfaces de végétation sont très proches d'après l'analyse de la BDTopo et celle de l'image de 1995.

Pour ces trois quartiers, la surface minérale estimée d'après la BDTopo est inférieure à celle estimée d'après les images SPOT. Pour la BDTopo, la somme de ces deux types de surfaces n'est pas égale à 100 % car une classe représentant les zones goudronnées ombragées (Asph. + vég.) n'a été incluse dans aucun des deux types de surfaces. Ces différences peuvent également s'expliquer par un problème de radiométrie (activité chlorophyllienne qui évolue durant les saisons, prise en compte des effets d'ombre) ou dans la définition des classes de Végétation (seuil fixé dans l'indice de végétation). La surface de végétation apparaît finalement sous-estimée par le traitement des images SPOT. Seul le quartier d'habitat collectif a une surface de végétation proche de celle obtenue dans le tableau 4-7 en sommant les surfaces de Bois-broussaille et Herbe.

4.2.6 Comparaison de la classification avec la base de données CORINE LAND COVER (CLC)

CLC est une base de données des MOS, réalisée au niveau européen à partir de l'interprétation des images satellites SPOT. Cette base de données est présentée au paragraphe 1.4.2. Elle a une résolution plus faible que la BDTopo mais ces deux classifications sont comparées afin de voir si les caractéristiques morphologiques des différents quartiers de Marseille ne pourraient pas être transposées aux classes CLC. Le niveau 3 de la nomenclature (CEC, 1995) permet de distinguer le tissu urbain continu du tissu urbain discontinu. Comme seulement deux classes représentent les zones bâties dans CLC, il n'a pas été jugé pertinent de comparer les classes CLC avec une classification à partir de la BDTopo très détaillée ; seule la classification en 6 classes du tissu urbain est comparée à la classification CLC.

En superposant sur une carte la CLC et les 6 classes du tissu urbain de Marseille, on peut identifier une assez bonne adéquation entre le centre-ville et le tissu urbain continu de CLC (carte 4-9). En effet, la surface couverte par la classe centre-ville est de 17.6 km² et celle couverte par le tissu urbain continu CLC est de 13.5 km². On note une légère différence entre les deux car des cellules de la classe Centre-ville sont incluses dans la classe Zone Industrielle de CLC ou éparpillées dans le tissu urbain.

Le tissu urbain discontinu de CLC recouvre les classes Individuel dense et Collectif / Industriel (carte 4-10). La surface de tissu urbain discontinu est de 107.7 km², elle est de 74.6 km² pour les deux classes correspondant. La classe Individuel dense est en très bonne adéquation avec le tissu urbain discontinu, ce qui n'est pas le cas pour la classe Collectif / Industriel où des cellules se retrouvent dans le tissu urbain continu. De même, à l'est de la zone d'étude, on note qu'une partie du tissu urbain discontinu correspond à des cellules appartenant à la classe Individuel peu dense.

Pour les autres classes urbaines issues de la classification de Marseille, la densité bâtie est très faible, elles n'ont donc pas d'équivalent dans la nomenclature CLC. Cependant, on remarque que les classes Terres arables et Systèmes cultureux et parcellaires de CLC correspondent à la classe Individuel peu dense ; or cette classe contient 1 % de surface agricole d'après les corrections calculées à partir des photos aériennes. La classe Individuel peu dense correspond également en partie aux classes Zones portuaires (les docks du PAM et Pointe Rouge et Montredon au sud de Marseille, cf. carte 1-3), Zones industrielles, Équipements sportifs et de loisirs et Espace vert urbain de CLC. La classe Espace vert urbain désigne l'hippodrome, près de la plage du Prado.

Enfin, la classe Individuel Épars est incluse en partie dans les classes Forêts mélangées, Végétation sclérophylle et dans les classes Landes broussailles, Forêt et végétation arbustive en mutation, maquis boisé (carte 4-11). Or la classe Individuel épars est constituée de 40 % d'arbres, 48 % de végétation éparse et 7 % d'herbe.

Les classes Tissu urbain continu et discontinu de CLC ne représentent que 66 % de la surface bâtie de Marseille. L'utilisation de la base de données CLC ne permet donc pas d'avoir une information précise sur les MOS et ne donne aucune information sur la volumétrie des bâtiments. Un croisement avec les résultats obtenus à partir de la BDTopo aurait pu permettre d'estimer les caractéristiques morphologiques et des MOS des différents quartiers CLC et donc d'utiliser la base de données CLC, qui est gratuite, sur d'autres villes de France et d'Europe mais les différences de résolution entre les deux bases de données sont trop importantes.

4.2.7 Comparaisons avec d'autres classifications de villes

Dans la littérature, plusieurs classifications de villes ont été proposées. Elles ont été réalisées avec des méthodes plus ou moins manuelles. Theurer (1999) a proposé une classification du tissu urbain sur 3 villes du sud-ouest de l'Allemagne : la première compte 50 000 habitants, la deuxième 160 000 habitants et la troisième 300 000 habitants. Seules les caractéristiques (densité bâtie et hauteur des bâtiments) de la plus grande ville ont été retenues pour les comparer à celles de Marseille. Cianco & Ellefsen (1998) proposent également une classification du tissu urbain adapté aux cas de Sacramento (USA), St Louis (USA) et Uppsala (Suède). La hauteur des bâtiments, la densité bâtie et celles des surfaces imperméables, des bois et de l'herbe sont données pour la ville de Sacramento. Des comparaisons sont donc possibles pour 4 quartiers urbains. Afin de distinguer les trois sources d'information, une abréviation est utilisée : 'Bd' pour les données issues de la classification à partir de la BDTopo, 'Th' pour la classification de Theurer et 'Ci' pour la classification de Cianco & Ellefsen. Tout d'abord les caractéristiques du centre-ville de Marseille sont comparées à celles de la classe UTZ A1 (*Urban Terrain Zone : Attached, high-rise, commercial and office buildings, old city core*) de Sacramento de Ci et à celles de la classe *City Centres* de la ville allemande de Th. La hauteur moyenne des bâtiments est comprise entre 15 m (Bd) et 20 m (Th). La densité bâtie Bd et la densité bâtie Th sont proches avec des valeurs respectives de 0.46 et 0.4-0.65 ; la densité bâtie Ci est très élevée avec une valeur de 0.8. Les surfaces imperméables sont presque équivalentes et varient de 28 % à 30 % pour Bd et Ci. Enfin, la densité des bois est nulle pour Ci et de 10 % pour Bd.

La classe Individuel dense est comparée à la classe UTZ Do2 (*detached, open-set, planned apartment units with associated parking*) de Ci et SFH (*Single Family Houses*) de Th. La hauteur des bâtiments varie de 6.7 m (Bd) à 10 m (Th). La densité bâtie et des surfaces imperméables est similaire pour les trois cas à 0.05 près. En revanche, la densité de la végétation diffère avec 0.5 de bois (Bd) contre 0 (Ci) et 0.5 d'herbe (Ci) contre 0 (Bd).

La classe Collectif correspond à la classe UTZ Dc1 (*detached, close-set, high-rise office buildings, hotels*) de Ci et R&B (*building Rows and building Blocks*) de Th. La hauteur des bâtiments varie de seulement 2 m entre les trois classifications, entre 15 m (Th-Ci) et 17.2 m (Bd). La densité bâtie Bd et la densité bâtie Th sont proches avec des valeurs respectives de 0.2 et 0.14-0.16. Par contre la densité bâtie Ci est plus élevée avec une valeur de 0.4. La différence entre les surfaces imperméables est encore plus grande entre Bd et Ci avec des valeurs de 0.26 et 0.6. Des surfaces de végétation sont identifiées seulement dans Bd.

Enfin le dernier quartier commun à ces trois classifications est le péricentre, UTZ Dc2 (*detached, close-set, apartment building*) de Ci et DUD (*Dense Urban Development*) de Th. Les bâtiments mesurent entre 9 m (Ci) et 13.5 m (Th) de haut. La densité bâtie varie peu entre Bd et Th (0.51 et 0.55) ; la densité bâtie Ci est plus faible (0.3). Les surfaces imperméables sont égales pour Bd et Ci (0.3 à 0.01 près). Enfin, une densité d'herbe de 0.3 est proposée par Ci, elle est de 0.07 pour Bd, par contre pour les bois, elle est de 0.08 pour Bd et nulle pour Ci.

Les différences sont assez peu marquées entre les classifications Bd et Th car elles portent toutes les deux sur des villes européennes dont la structure générale est globalement assez proche ; les écarts sont beaucoup plus marqués entre une ville européenne et une ville américaine. En effet, pour la densité bâtie les écarts sont assez importants entre Bd et Ci notamment pour le quartier Centre-ville où la densité bâtie atteint 0.8 d'après Ci. On ne retrouve pas de telles densités dans les villes européennes même dans les quartiers densément construits. Les surfaces imperméables estimées par Bd et Ci sont assez proches à 10 % près. Par contre, les surfaces de végétation varient beaucoup d'une classification à l'autre.

4.2.8 Conclusion partielle

La BDTopo est une base de données qui ne permet pas d'estimer à 100 % les différents MOS. Des coefficients correcteurs adaptés à chaque type de quartier permettent alors d'estimer la surface des MOS non-identifiés dans la BDTopo et de ré-évaluer ceux qui le sont. Ces coefficients correcteurs ont été validés sur le quartier St Jérôme et sur le centre-ville. Les résultats de la classification apparaissent alors pertinents et utilisables pour réaliser des simulations de la canopée urbaine. Ce sont cependant des résultats statistiques qui d'après leur cartographie semblent équivalents aux quartiers de la ville européenne. Ces classes statistiques sont donc assimilables à des quartiers urbains mais sont-ils pour autant des quartiers ayant une influence aérodynamique ? Cette hypothèse est vérifiée dans le paragraphe suivant.

4.3 Des quartiers urbains aux quartiers aérodynamiques

Les quartiers urbains ont été définis d'après les caractéristiques morphologiques des bâtiments et les MOS car d'après la description du climat urbain et de ses processus (§ 1.4), ce sont les deux caractéristiques qui semblent avoir une influence sur l'écoulement horizontal et vertical des flux et sur la structuration de la couche limite. D'un point de vue aérodynamique, la longueur de rugosité est l'échelle de longueur qui permet de quantifier la résistance offerte par les obstacles

à l'écoulement d'un flux. C'est ce paramètre qui est ici étudié pour définir les quartiers aérodynamiques.

La longueur de rugosité est calculée selon trois modèles : les modèles de Bottema, de Raupach et de Macdonald (Annexe B). Ils calculent dans le cas présent une longueur de rugosité pour une direction de vent donnée, en tenant compte seulement des bâtiments comme éléments de rugosité. La végétation ou d'autres éléments de rugosité ne sont pas pris en compte car DFMap ne peut pas gérer simultanément deux couches d'informations.

4.3.1 La longueur de rugosité estimée pour le tissu urbain marseillais

La longueur de rugosité a été calculée sur le tissu urbain de Marseille pour les trois modèles et deux directions de vents : un vent de nord et un vent d'ouest.

En moyenne, les résultats sont similaires pour les deux directions de vent. En revanche, des écarts, toutefois assez faibles, apparaissent entre les trois modèles : la moyenne est de 0.57 m selon Bottema, 0.53 m selon Raupach et 0.50 m selon Macdonald.

D'après les histogrammes (figure 4-6), la distribution des séries est très dissymétrique avec un fort étirement vers les valeurs maximales. D'après les valeurs des premier et troisième quartiles, l'étalement des valeurs pour un vent de Nord est le plus important pour le modèle de Bottema, avec 50 % des valeurs comprises entre 0.056 et 0.81, et le moins important pour le modèle de Macdonald avec 50 % des valeurs comprises entre 0.084 et 0.64. Les valeurs maximales sont inférieures à 7 m pour le modèle de Raupach, pour les deux autres modèles elles sont comprises entre 9 m et 14 m. Les maxima sont plus élevés pour un vent d'ouest que pour un vent de nord, ce qui signifie qu'en moyenne les bâtiments présentent une surface face au vent plus importante pour un vent d'ouest que pour un vent de nord.

Les cartes 4-12 à 4-17 rendent compte de la variabilité spatiale de la longueur de rugosité pour les trois modèles et deux directions de vent. On observe, d'une manière générale, une diminution de la longueur de rugosité du centre-ville vers le périurbain et une différence très faible entre les résultats pour les deux directions de vent. Les modèles de Bottema et de Raupach présentent des résultats assez proches : les valeurs sont supérieures à 1.2 m sur le centre-ville de Marseille et sur des petites zones clairsemées dans le tissu urbain, correspondant aux quartiers d'habitat collectif et aux zones industrielles. Cette dispersion est plus accentuée pour le modèle de Bottema où les valeurs sont plus variées dans la première couronne de la banlieue. Pour le modèle de Macdonald, la variabilité spatiale de la longueur de rugosité est différente : on retrouve de fortes valeurs de rugosité

seulement sur les zones d'habitat collectif et les zones industrielles (supérieures à 1.2 m). Le centre-ville est représenté par des valeurs plus faibles et très variables par rapport aux quartiers précédents : la longueur de rugosité oscille entre 0.02 et 0.75 pour ce quartier. Les valeurs restent similaires pour les trois modèles dans la périphérie éloignée de Marseille où la densité bâtie est faible : la longueur de rugosité est inférieure à 0.15 m.

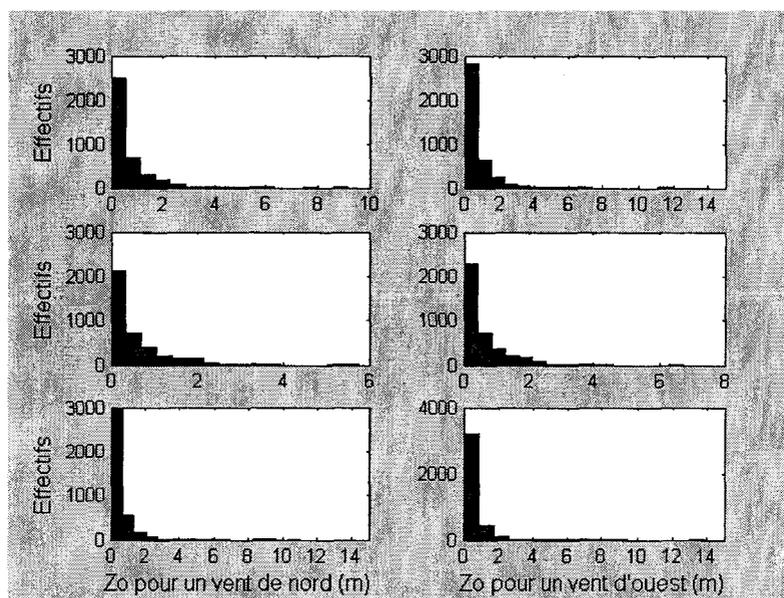


Figure 4-6: Longueurs de rugosité selon les modèles de Bottema (en haut), de Raupach (au milieu) et de Macdonald (en bas) pour deux directions de vent : nord (à gauche) et ouest (à droite)

4.3.2 La longueur de rugosité selon les quartiers urbains

Des quartiers urbains ont été définis précédemment selon les caractéristiques morphologiques des bâtiments et les MOS. Une première classification en six classes du tissu urbain a été proposée puis une seconde en neuf classes. Les longueurs de rugosité ont été moyennées pour chaque quartier pour les trois modèles et les deux directions de vent.

Tout d'abord, pour le découpage en six quartiers du tissu de Marseille, les longueurs de rugosité moyennées sont égales à 0.01 près pour un vent de nord et un vent d'ouest, sauf pour la classe Gros bâtiments où les valeurs sont plus élevées pour un vent d'ouest que pour un vent de nord et ce, pour les trois modèles (tableau 4-10).

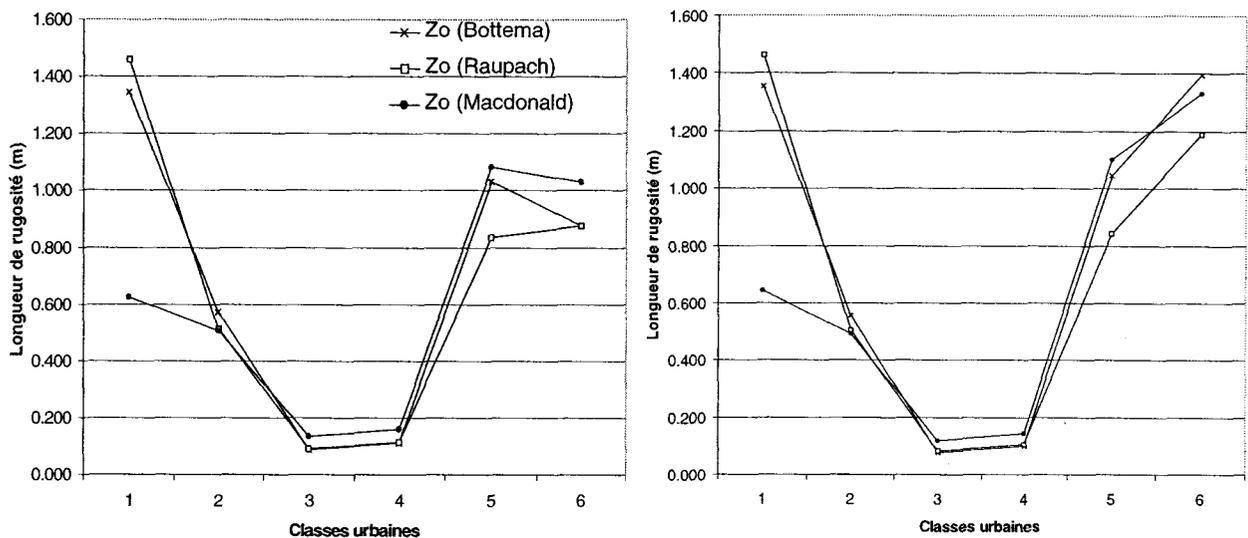
Quartiers	Statistiques	Zo Bot. nord	Zo Bot. ouest	Zo Rau. nord	Zo Rau. ouest	Zo Mac. nord	Zo Mac. ouest
Centre-ville	Moyenne	1.35	1.35	1.46	1.46	0.62	0.64
	Écart type	0.92	1.02	0.73	0.76	0.77	0.96
	Coef de var (%)	68.31	75.16	50.37	51.60	123.95	148.98
Individuel dense	Moyenne	0.57	0.56	0.51	0.50	0.51	0.49
	Écart type	0.39	0.38	0.32	0.31	0.34	0.33
	Coef de var (%)	67.52	68.80	61.47	62.48	67.09	68.31
Individuel épars	Moyenne	0.09	0.08	0.09	0.08	0.13	0.12
	Écart type	0.19	0.17	0.15	0.14	0.25	0.24
	Coef de var (%)	215.66	219.43	167.74	167.12	190.43	196.56
Individuel peu dense	Moyenne	0.11	0.10	0.11	0.11	0.16	0.15
	Écart type	0.15	0.14	0.13	0.12	0.19	0.18
	Coef de var (%)	138.88	143.86	109.45	111.91	121.09	126.63
Collectif / industriel	Moyenne	1.03	1.04	0.84	0.84	1.08	1.10
	Écart type	0.92	0.96	0.64	0.66	1.02	1.08
	Coef de var (%)	89.09	92.23	76.68	78.30	94.16	97.87
Gros bâtiments	Moyenne	0.88	1.39	0.88	1.19	1.03	1.33
	Écart type	2.21	3.32	1.39	1.77	3.16	3.94
	Coef de var (%)	252.21	237.87	158.91	148.53	306.85	295.77

Tableau 4-10 : Statistiques descriptives des longueurs de rugosité pour les six quartiers urbains, calculées par les modèles de Bottema (Bot), Raupach (Rau) et Macdonald (Mac) pour un vent de nord et un vent d'ouest.

La figure 4-7 représente les longueurs de rugosité moyennes pour chaque quartier urbain pour un vent de nord et un vent d'ouest. Les valeurs moyennes des trois modèles sont assez proches pour les classes 2, 3 et 4 c'est-à-dire pour les classes représentant l'habitat individuel plus ou moins dense. Pour un vent d'ouest, la différence entre les deux dernières classes (classes 5 et 6) est plus marquée avec le modèle de Raupach qui donne des valeurs inférieures par rapport aux deux autres modèles. Pour un vent de nord, le modèle de Raupach se détache des deux autres pour la classe 5 mais pour la classe 6 c'est le modèle de Macdonald qui donne une valeur supérieure à celles des deux autres modèles. Enfin, pour la classe représentant le centre-ville, la moyenne des modèles de Bottema et de Raupach est le double de la moyenne de Macdonald et ce pour les deux directions de vent.

Chaque quartier est caractérisé par une longueur de rugosité particulière ; seuls les quartiers d'habitat individuel épars et peu dense ont une longueur de rugosité très proche. La densité bâtie est en moyenne de 0.03 – 0.05 et les bâtiments ont une morphologie très proche ce qui permet d'expliquer que ces quartiers ont une longueur de rugosité très semblable. Les longueurs de rugosité moyennes sont différentes entre les autres quartiers urbains mais la variabilité à l'intérieur de

chaque classe est très importante avec des coefficients de variation tous supérieurs à 0.5 (tableau 4-10). Le modèle de Raupach est celui qui présente le moins de variabilité par rapport aux deux autres modèles. Les classes représentant le centre-ville (sauf pour le modèle de Macdonald), l'habitat individuel dense et les bâtiments collectifs et industriels ont un coefficient de variation inférieur à 1, pour les autres classes il dépasse 1. Enfin, la classe Gros bâtiments est celle qui présente le plus de variabilité avec des coefficients de variation supérieurs à 2 pour le modèle de Bottema, à 3 pour le modèle de Macdonald.



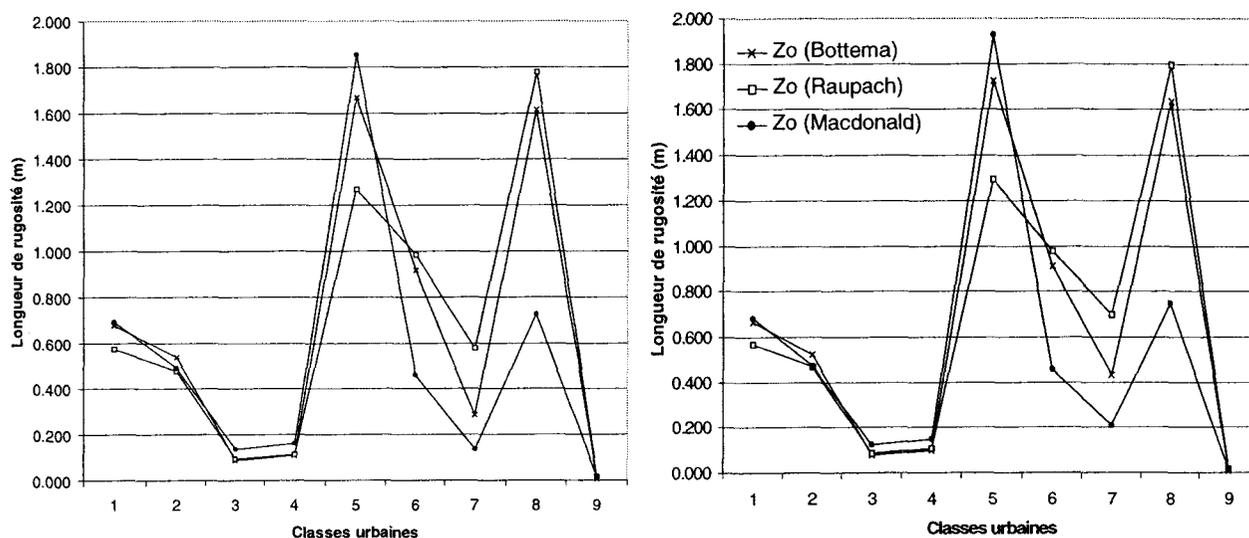
1 : Centre-ville, 2 : Individuel dense, 3 : Individuel épars, 4 : Individuel peu dense, 5 : Collectif / Industriel, 6 : Gros bâtiments

Figure 4-7: Longueurs de rugosité selon les modèles de Bottema, Raupach et Macdonald pour un vent de nord (gauche) et un vent d'ouest (droite), moyennées pour chacun des 6 quartiers.

Pour une classification en 9 quartiers du tissu urbain, les longueurs de rugosité moyennes de chaque modèle sont égales pour les deux directions de vent à 0.01 près (tableau 4-11) ; seule la classe Gros bâtiments présente un écart notable entre les deux directions avec une longueur de rugosité plus importante par vent d'ouest que par vent de nord, ce qui laisse supposer que les gros bâtiments ont des façades plus importantes face à l'ouest. On verra au paragraphe 4.3.3 que les valeurs de Z_0 de cette classe varient beaucoup d'une classification à l'autre.

La figure 4-8 présente les valeurs moyennes de la longueur de rugosité calculée par les trois modèles. Elles sont assez proches entre les trois modèles pour les

classes représentant les quartiers d'habitat individuel (classes 2, 3, 4, 9), la longueur de rugosité diminuant avec la densité bâtie, et pour la classe Petit collectif. Pour les autres classes, la différence entre les modèles est plus marquée : le modèle de Macdonald donne des longueurs de rugosité plus faible pour le péricentre (6), les gros bâtiments (7) et le centre-ville (8) ; pour ce dernier quartier, la longueur de rugosité est divisée par plus de deux par rapport aux deux autres modèles. Les modèles de Raupach et de Bottema donnent des résultats proches pour les quartiers urbains sauf pour les classes Collectif (5) et Gros bâtiments (7).



1 : Petit collectif, 2 : Individuel dense, 3 : Individuel épars, 4 : Individuel peu dense, 5 : Collectif, 6 : Péricentre, 7 : Gros bâtiments, 8 : centre-ville, 9 : Individuel résiduel.

Figure 4-8: Longueurs de rugosité selon les modèles de Bottema, Raupach et Macdonald pour un vent de nord (gauche) et pour un vent d'ouest (droite), moyennées pour chacun des 9 quartiers.

La variabilité à l'intérieur de chaque classe est encore importante avec cette classification mais les coefficients de variation sont plus faibles pour les classes présentes dans les deux classifications (tableau 4-11). La classe Centre-ville avec le modèle de Macdonald est toutefois une exception car le coefficient de variation est plus élevé. Comme précédemment, le modèle de Raupach est celui qui donne des longueurs de rugosité les plus homogènes pour chaque quartier.

Quartiers	Statistiques	Zo Bot. nord	Zo Bot. ouest	Zo Rau. nord	Zo Rau. ouest	Zo Mac. nord	Zo Mac. ouest
Petit collectif	Moyenne	0.68	0.67	0.57	0.57	0.69	0.68
	Écart type	0.54	0.53	0.40	0.40	0.54	0.53
	Coef de var (%)	80.24	80.33	70.51	70.79	77.38	77.20
Individuel dense	Moyenne	0.54	0.52	0.48	0.47	0.49	0.47
	Écart type	0.37	0.37	0.30	0.30	0.31	0.31
	Coef de var (%)	67.96	69.80	62.59	64.03	63.72	65.64
Individuel épars	Moyenne	0.09	0.08	0.09	0.08	0.14	0.12
	Écart type	0.17	0.15	0.14	0.12	0.23	0.21
	Coef de var (%)	192.48	193.74	148.18	145.71	164.58	170.06
Individuel peu dense	Moyenne	0.11	0.10	0.11	0.11	0.16	0.15
	Écart type	0.14	0.14	0.12	0.11	0.18	0.18
	Coef de var (%)	127.71	138.10	101.34	106.69	112.56	122.14
Collectif	Moyenne	1.67	1.73	1.27	1.30	1.85	1.93
	Écart type	1.26	1.40	0.83	0.89	1.40	1.58
	Coef de var (%)	75.73	81.22	65.79	68.60	75.40	82.23
Péricentre	Moyenne	0.92	0.91	0.98	0.98	0.46	0.46
	Écart type	0.61	0.61	0.52	0.52	0.40	0.40
	Coef de var (%)	66.33	66.55	53.03	52.77	87.64	86.53
Gros bâtiments	Moyenne	0.29	0.43	0.58	0.70	0.14	0.21
	Écart type	0.20	0.31	0.28	0.32	0.17	0.21
	Coef de var (%)	70.18	71.23	48.46	45.77	123.48	100.63
Centre-ville	Moyenne	1.62	1.64	1.78	1.79	0.73	0.75
	Écart type	0.94	1.16	0.74	0.79	0.94	1.19
	Coef de var (%)	57.87	71.02	41.67	43.90	129.99	159.40
Individuel résiduel	Moyenne	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
	Écart type	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05
	Coef de var (%)	726.44	715.92	271.42	265.35	423.13	456.52

Tableau 4-11 : Statistiques descriptives des longueurs de rugosité selon les neuf quartiers urbains, calculées par les modèles de Bottema (Bot), Raupach (Rau) et Macdonald (Mac) pour un vent de nord et un vent d'ouest.

Afin de vérifier la validité des résultats obtenus pour chacun de ces quartiers urbains, le rapport longueur de rugosité sur hauteur des bâtiments a tout d'abord été calculé puis représenté en fonction de la densité bâtie (figures 4-9 et 4-10).

Par rapport aux limites « raisonnables » des valeurs de longueurs de rugosité en fonction de la densité bâtie donnée par Grimmond & Oke (1999), les longueurs de rugosité calculées par les trois modèles sont dans ces limites pour les six quartiers (figure 4-9). En revanche pour la classification en 9 quartiers, la longueur de rugosité obtenue pour une densité bâtie de 0.113 est trop élevée pour les trois modèles et devrait plutôt être inférieure à 0.05 m (figure 4-10). Cette densité bâtie correspond à la classe Collectif, la densité frontale est importante pour ce type de bâtiment. Or le modèle de Raupach prévoit la valeur la plus faible pour cette classe. A l'inverse, la densité bâtie est égale entre les classes Centre-ville et Gros bâtiments

mais les longueurs de rugosité différent, elles sont acceptables pour la classe Centre-ville mais elles sont trop faibles pour la classe Gros Bâtiment selon les modèles de Bottema et Macdonald ; Raupach prévoit une valeur acceptable pour cette classe. La densité frontale des bâtiments pour la classe Centre-ville est en moyenne de 0.26 ; elle est seulement de 0.06 pour la classe Gros bâtiments.

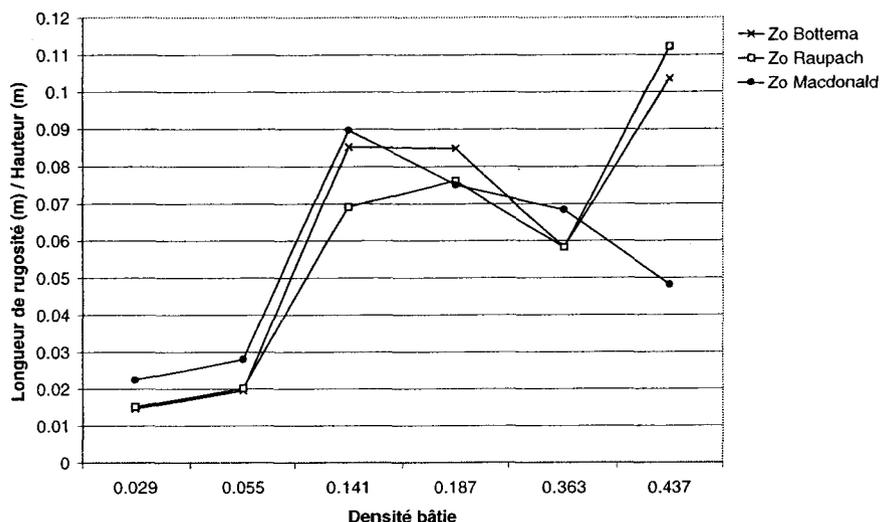


Figure 4-9: Rapport longueur de rugosité sur hauteur des bâtiments en fonction de la densité bâtie pour les modèles de Bottema, Raupach et Macdonald et un vent de nord (classification en 6 classes du tissu urbain).

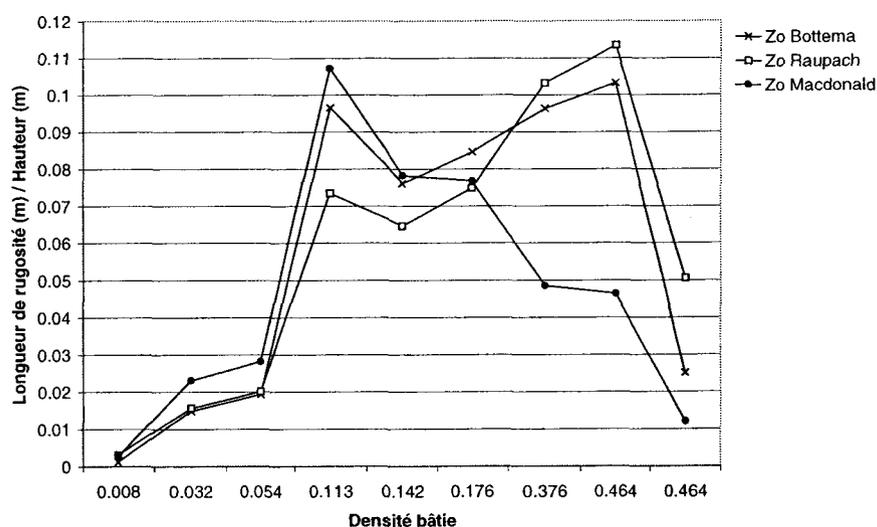


Figure 4-10: Rapport longueur de rugosité sur hauteur des bâtiments en fonction de la densité bâtie pour les modèles de Bottema, Raupach et Macdonald et un vent de nord (classification en 9 classes du tissu urbain).

La densité frontale intervient seulement dans le calcul de la hauteur de déplacement selon Raupach, elle est en revanche utilisée plus directement pour

calculer la longueur de rugosité pour les deux autres modèles. Pour une même densité bâtie, la hauteur de déplacement dépend seulement de la hauteur des bâtiments pour les modèles de Bottema et Macdonald. Si la densité frontale entre deux quartiers est proche mais la densité bâtie différente, la hauteur de déplacement sera plus élevée lorsque la densité bâtie est élevée comme le calculent les modèles de Bottema et Macdonald. Faire intervenir la densité frontale dans le calcul de la hauteur de déplacement permet de tenir plus compte de la hauteur des bâtiments, car la densité bâtie peut être faible mais la hauteur et donc la densité frontale élevées, comme dans le cas de bâtiments collectif ce qui pourrait expliquer les valeurs de longueur de rugosité importantes pour la classe Collectif et au contraire très faibles pour la classe Gros bâtiment. Pour le modèle de Raupach, les valeurs sont beaucoup plus homogènes entre ces deux classes par rapport aux deux autres modèles.

4.3.3 Conclusion partielle sur les longueurs de rugosité

Le modèle de Raupach donne les résultats les plus acceptables pour Marseille, vu l'homogénéité des classes. De plus les valeurs fournies par ce modèle sont en moyennes dans les limites « raisonnables » selon Grimmond & Oke (1999) et ce pour les 9 quartiers mis en évidence sur Marseille (seule une valeur est en dehors de ces limites mais elle reste la plus acceptable par rapport aux deux autres modèles). Le modèle de Bottema donne également des résultats satisfaisants pour un découpage en 6 quartiers de la ville. Par contre, le modèle de Macdonald fournit des longueurs de rugosité assez différentes pour certains quartiers. Il est peut être nécessaire pour ce modèle d'ajuster les valeurs des coefficients utilisés pour calculer la longueur de rugosité (Grimmond & Oke, 1999).

Les quartiers urbains mis en évidence par les différentes classifications peuvent ainsi être assimilés à des quartiers aérodynamiques avec une longueur de rugosité moyenne propre à chaque quartier. On note cependant que la longueur de rugosité calculée pour un même quartier varie d'une classification à l'autre. La figure 4-11 présente les longueurs de rugosité calculées par les modèles de Bottema et de Raupach pour les 5 quartiers qui sont communs aux deux classifications. Pour le centre-ville, la longueur de rugosité moyenne est plus élevée d'après la classification en neuf classes ; on a noté également que l'homogénéité de cette classe était améliorée lorsqu'on augmentait le nombre de classes. Cette dernière remarque laisse supposer que la longueur de rugosité correspondant le plus à cette structure urbaine est celle proposée par la classification en neuf classes.

Pour les classes Individuel dense, épars et peu dense, on note peu de différences entre les deux classifications. Par contre, pour la classe Gros bâtiments, la

différence entre les deux classifications est très marquée. La longueur de rugosité d'après Bottema est très inférieure pour la classification en neuf classes que pour la classification en six classes. Les deux classes n'ont pas le même nombre d'observations, quatre cellules supplémentaires forment la classe Gros bâtiments dans la classification en neuf classes. Ces cellules sont composées de bâtiments d'une taille légèrement inférieure à celle des autres bâtiments communs aux deux classes Gros bâtiments.

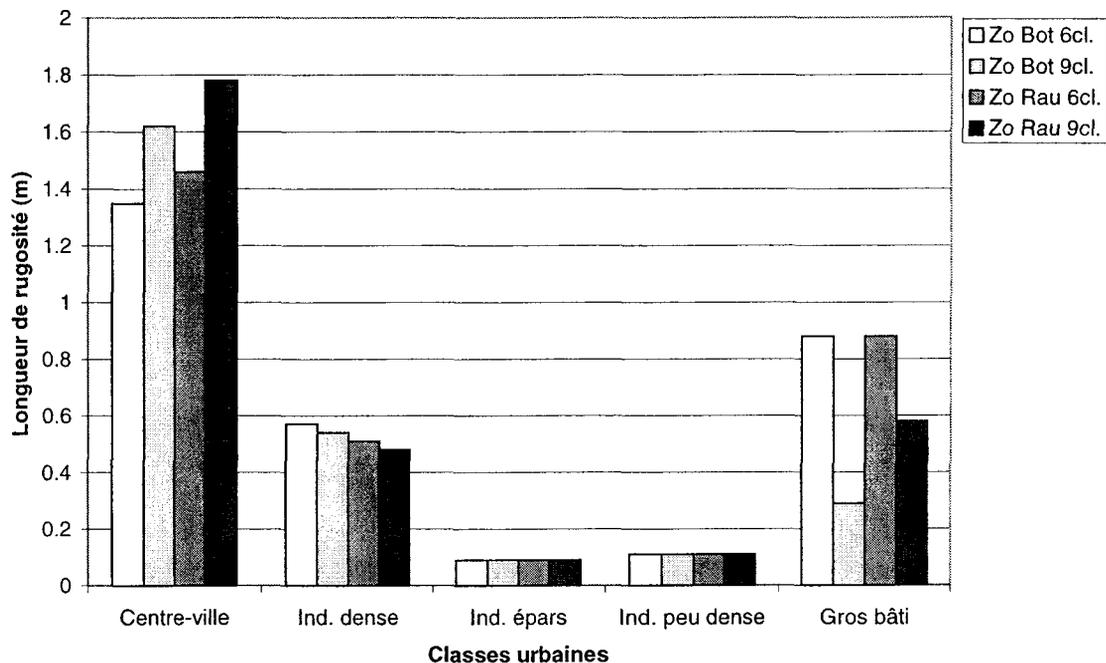


Figure 4-11: Comparaison des longueurs de rugosité calculées à partir des modèles de Bottema (Bot) et de Raupach (Rau) pour les quartiers communs aux classifications en 6 (6cl.) et 9 classes (9cl.).

4.4 Discussion

Trois classifications ont été présentées dans le chapitre 3 et validées dans le chapitre 4. La première a été réalisée sur la zone de Marseille dans sa globalité (6300 cellules) ; elle permet de mettre en évidence les trois MOS naturels qui bordent la ville, c'est-à-dire les surfaces d'eau, les surfaces de végétation et les sols dont aucune information n'est disponible dans la BDTopo. Le tissu de la ville est découpé en quatre classes. L'homogénéité des classes n'étant pas très bonne, la méthode a été appliquée seulement au tissu urbain (3846 cellules) afin de supprimer le poids ou l'influence des zones naturelles entourant la ville dans la définition des classes. Le tissu urbain est alors découpé en six classes puis en neuf classes, l'homogénéité des classes étant améliorée avec l'augmentation du nombre de classes. Mais par

rapport à la problématique de recherche de ce travail, on peut se demander quelle classification répond le mieux à cet objectif ?

D'un point de vue statistique et géographique, il semble que chaque classe corresponde à un type de quartier et ce, quel que soit le nombre de classes. Ces quartiers sont définis par la morphologie des bâtiments et les MOS. Des classes peuvent avoir certaines caractéristiques en commun ; par exemple, les classes représentant l'habitat individuel regroupent des bâtiments qui ont des morphologies très proches, ces classes se différencient principalement par leur MOS. Par conséquent, pour répondre à l'objectif « découper Marseille en zones homogènes », la classification en neuf classes est celle qui est la plus pertinente car elle est la plus détaillée. Elle délimite, dans l'ensemble, les zones les plus homogènes qui correspondent chacune à un type de quartier.

En revanche, d'un point de vue échanges thermodynamiques, la différence entre les classes n'est peut-être pas significative. Est-ce qu'une différence de 12 % de surface d'herbe aura un impact sur le flux de chaleur latente, est-ce que 26 % de surface bâtie supplémentaire pourra provoquer une augmentation de la température de l'air ? Il est difficile de répondre à ces questions. Civerolo *et al.* (2000) ont réalisé des simulations numériques des conditions atmosphériques sur la côte nord-est des États-Unis avec les MOS correspondant à la réalité, puis en remplaçant 40 % des surfaces urbaines par de la végétation (forêt). Ce changement a une légère influence sur les températures de surface et la vitesse du vent. De même, Dupont (2001) a réalisé des simulations numériques des conditions atmosphériques à partir de cinq quartiers dont les caractéristiques morphologiques et les MOS sont différents. Il observe des influences différentes sur certains paramètres météorologiques selon les quartiers. Si on compare les surfaces proposées par Dupont (2001) à celles de la classification en neuf classes, les différences entre les MOS ne sont peut-être pas significatives entre toutes les classes ; les classes Centre-ville et Péricentre pourraient être regroupées, de même pour les classes Collectif et Petit collectif et enfin, de même pour les classes Individuel épars et résiduel. On retrouve alors les résultats de la classification en six classes du tissu urbain.

Enfin, d'un point de vue aérodynamique, les longueurs de rugosité calculées par le modèle de Raupach ont été jugées les plus satisfaisantes pour définir l'aérodynamique de chaque quartier. Les classes Petit collectif et Gros bâtiments ont une longueur de rugosité presque identique pour un vent de nord mais différente pour un vent d'ouest. De même, les classes Individuel épars et Individuel peu dense sont caractérisées par la même longueur de rugosité, à 0.002 près. Pour les autres classes, les différences peuvent être jugées significatives.

	CV	Péri centre	Gros bâti	Coll.	Petit coll	Ind. dense	Ind. peu dense	Ind. épars	Ind. résid.
	Surf. (%)	Surf. (%)	Surf. (%)	Surf. (%)	Surf. (%)	Surf. (%)	Surf. (%)	Surf. (%)	Surf. (%)
Surf bâtie	57 +/- 13	51 +/- 9	46 +/- 26	20 +/- 6	21 +/- 5	25 +/- 7	4 +/- 3	3 +/- 3	0.8 +/- 1
Surf imper.	28 +/- 7	29 +/- 6	48 +/- 3	26 +/- 7	30 +/- 6	20 +/- 5	2 +/- 4	2 +/- 4	2 +/- 3
Asph + vég	3	4	5	26	0	1	0	0	0
Bois brou.	10 +/- 7	8 +/- 5	0 +5	14 +/- 20	16 +/- 12	50 +/- 13	12 +/- 13	48 +/- 21	55.2 +/- 38
Vég épar	0	0	0	0	0	0	69	40	28
Herbe	2.5	7.5	0.5	11	23	2.5	9	7	6
Terre agri	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Sol nu	0.5	0.5	0.5	3	10	0.5	3	7	7
Compacité	0.60 +/- 0.06	0.64 +/- 0.04	0.41 +/- 0.13	0.65 +/- 0.07	0.70 +/- 0.04	0.75 +/- 0.04	0.74 +/- 0.06	0.75 +/- 0.07	0.70 +/- 0.15
Espace ment	24.2 +/- 16	23.3 +/- 11.3	19.5 +/- 26.8	61.3 +/- 27.3	43 +/- 14.7	27.8 +/- 7.8	72.2 +/- 29.1	84.09 +/- 37	Na
Hauteur	14.5 +/- 4.8	9.5 +/- 3	13.2 +/- 6.6	17.2 +/- 6	8.9 +/- 2.9	6.5 +/- 1.9	5.9 +/- 2.1	5.9 +/- 2.7	5.5 +/- 3.8
Nb bâti	15.8 +/- 7.5	21.7 +/- 9.2	6.5 +/- 5.3	9.7 +/- 5.3	17.7 +/- 6.8	38 +/- 11.3	11 +/- 6.9	8 +/- 6.7	1.2 +/- 1.3
Péri-mètre	169 +/- 49.8	118.2 +/- 28.1	521.6 +/- 248	97.5 +/- 34	74.9 +/- 20.4	55.8 +/- 12.6	54 +/- 19	48 +/- 20.4	55.8 +/- 43.3
Volume	24486 +/- 12923	7949 +/- 3919	126687 +/- 42379	9062 +/- 5718	3207 +/- 2322	1306 +/- 837.7	1254 +/- 1323	1059 +/- 1344	1850 +/- 3622
Zo Rau	1.78 +/- 0.7	0.98 +/- 0.5	0.58 +/- 0.28	1.27 +/- 0.8	0.57 +/- 0.4	0.48 +/- 0.3	0.11 +/- 0.12	0.09 +/- 0.14	0.02 +/- 0.05

Tableau 4-12 : Caractéristiques des neufs quartiers identifiés sur le tissu urbain de Marseille (en noir, la valeur moyenne, en gris l'écart type, Na : la valeur n'a pas été jugée significative car cette classe est composée de très peu de bâtiments).

Pour résumer ces différentes remarques, le tableau 4-12 contient les caractéristiques morphologiques des bâtiments, les MOS et la longueur de rugosité correspondant à chaque quartier. Deux valeurs sont proposées pour chaque variable : une moyenne et un écart type. Si la classe est définie seulement par la classification en 9 classes, la moyenne proposée correspond à la moyenne de cette classification, si la classe est définie par deux ou trois classifications, la valeur

proposée est la moyenne des deux ou trois moyennes des classes des classifications. La valeur de l'écart type est calculée de la même manière que la moyenne.

En tenant compte de toutes les caractéristiques de chaque quartier décrit dans le tableau 4-12, à mon sens, chaque quartier peut être unique et significatif d'un point de vue météorologique, seuls les quartiers Individuel épars et résiduel doivent être regroupés en un seul type. Le découpage du tissu urbain de Marseille peut être réalisé en huit quartiers mais seules des simulations numériques des échanges sol - canopée - atmosphère, réalisées à partir des caractéristiques de ces différents quartiers pourront confirmer ou non ce choix.

4.5 Conclusion

L'analyse du tissu urbain de Marseille est conclue par ce chapitre. La méthodologie a été validée d'une part, car appliquée à une autre ville les résultats obtenus sont satisfaisants. Nantes est une ville différente de Marseille car elles n'ont pas connu la même histoire, ni le même développement. Cette méthodologie permet d'identifier des quartiers aux caractéristiques morphologiques différentes et composés de divers MOS. Toutefois, les MOS estimés à partir de la BDTopo ne couvrent pas 100 % de la surface. Des pourcentages additionnels ont alors été déterminés, de manière empirique, afin d'évaluer entièrement les MOS. Ces pourcentages correcteurs varient d'un quartier à l'autre.

Des quartiers à peu près similaires ont été définis entre Nantes et Marseille ; on retrouve notamment les principaux quartiers des villes européennes. Cependant, ces quartiers n'ont pas les même caractéristiques d'une ville à l'autre. Par exemple, le centre-ville de Nantes se compose de bâtiments dont la taille est inférieure à celle des bâtiments du centre-ville marseillais. Il est donc impossible de donner des caractéristiques générales et précises de chaque quartier qui puissent être pertinentes pour toutes les villes européennes.

Des quartiers ont été définis selon certains critères afin d'étudier leur influence sur la météorologie de la ville. Les relations ville - climat sont analysées dans le chapitre 5 à partir de mesures de températures et d'humidité dans un premier temps puis de température de brillance dans un second temps.

Chapitre 5: Relations entre les quartiers urbains et les paramètres climatiques

Plusieurs types de quartiers ont été définis sur la ville de Marseille avec des caractéristiques morphologiques et des MOS propres à chaque quartier. Une longueur de rugosité a été calculée pour chacun de ces quartiers et permet ainsi de donner à ces espaces urbains un sens aérodynamique.

La structure morphologique de la ville et ses MOS ont également une influence sur des paramètres météorologiques. Pendant la campagne CLU-ESCOMPTE, des mesures de température de l'air, de température de surface et d'humidité relative ont été réalisées sur Marseille. Ce chapitre propose donc une analyse de la relation entre la variabilité spatiale de ces paramètres météorologiques et les différents quartiers préalablement définis.

5.1 La température potentielle et l'humidité spécifique

La température et l'humidité sont analysées dans un premier temps à partir de plusieurs types de données. Une variabilité spatiale moyenne de ces paramètres permet tout d'abord d'avoir une situation de référence et d'établir une première relation entre les quartiers et les mesures météorologiques. Puis une analyse de la variabilité est effectuée par type de temps pour étudier si l'influence des différentes conditions météorologiques est similaire ou non entre les différents quartiers.

5.1.1 Données utilisées

Afin d'établir une relation entre les différents quartiers aérodynamiques et des paramètres météorologiques, plusieurs types de données ont été utilisés ; ces différentes mesures ont été enregistrées pendant la campagne CLU-ESCOMPTE (Mestayer & Durand, 2002).

5.1.1.1 Les mesures de la station Vallon Dol

La station Vallon Dol est une station de mesure fixe de la campagne ESCOMPTE. Vallon Dol se situe au nord de Marseille, à 250 m d'altitude, en dehors de la ville. Les paramètres météorologiques de cette station ont été retenus afin d'analyser les types de temps successifs pendant la campagne de mesure. Vu sa situation géographique, on a supposé que cette station n'était pas influencée par la présence de la ville, elle est d'ailleurs considérée comme la station de référence pour la campagne CLU-ESCOMPTE (Mestayer & Durand, 2002). Les mesures de température, de vitesse du vent et de sa direction ont été utilisées pour cette étude ; elles sont mesurées à 10 m du sol. Des moyennes horaires ont été calculées pour la vitesse du vent et la température. La direction du vent était mesurée au degré près. Ces données ont tout d'abord été transposées sur une rose des vents à 8 quartiers de 45° chacun, avec le quartier 1 compris entre 337.5° et 22.5°, et ainsi de suite en tournant dans le sens des aiguilles d'une montre. La direction dominante pour chaque heure a ensuite été calculée pour avoir des données horaires.

5.1.1.2 Le réseau « Pigeon »

La température de l'air et l'humidité relative ont été mesurées en plusieurs points de l'agglomération pendant toute la durée de la campagne de mesure. Une vingtaine de capteurs a été disposée à travers la ville pour former un réseau, appelé ici « réseau Pigeon », du nom de Grégoire Pigeon du CNRM qui en a établi la distribution (carte 5-1). Ces capteurs étaient accrochés à 6 m du sol environ sur les pylônes EDF, le plus loin possible des bâtiments afin d'éviter leur influence trop directe. Le choix de l'emplacement de ces capteurs a été fait grâce à des simulations préliminaires du champ de température sur la ville avec le modèle Més0-NH. Ces capteurs ont ainsi enregistré des mesures de température et d'humidité relative pendant toute la campagne avec un pas de temps de dix minutes.

Les capteurs ont été testés avant et après la campagne de mesure afin de vérifier la qualité et la précision des mesures. Les capteurs ont été disposés sous abri pendant 72h. Pour chaque pas de temps enregistré, un écart type a été calculé entre les 20 capteurs puis moyenné ; un écart type maximal a été calculé de la même manière. Avant la campagne de mesure, l'écart type moyen était de 0.08° C et l'écart type maximal de 0.2° C pour la température ; pour l'humidité ils étaient respectivement de 0.75 % HR et 3.23 % HR. Après la campagne, pour la température, l'écart type moyen était de 0.13° C et l'écart type maximal de 0.49° C, pour l'humidité, ils étaient respectivement de 0.71 % HR et 2.77 % HR. Vu les résultats de cette comparaison, il n'a pas été jugé nécessaire de corriger les données. Par contre, afin d'enlever les effets d'altitude et donc de variation de la pression atmosphérique

d'une part, l'influence croisée humidité - température d'autre part, les mesures de température ont été transformées en température potentielle et les mesures d'humidité relative en humidité spécifique.

5.1.1.3 Les mesures de la Clio

Des mesures de température de l'air et d'humidité relative ont également été effectuées par une sonde fixée sur un petit mât, lui-même fixé sur le toit d'une voiture. Le capteur était à une hauteur de 3 m environ au-dessus du sol. Avec ce dispositif, plusieurs trajets ont été réalisés à travers Marseille à différents moments de la journée. Deux circuits principaux ont ainsi été documentés (carte 5-2) : le premier circuit a été réalisé à cinq reprises et le deuxième circuit a été parcouru quatre fois (tableau 5-1). Les mesures ont été faites avec un pas de 15 secondes. Afin de se repérer géographiquement et de suivre la progression de la voiture, des repères ont été enregistrés sur un magnétophone en précisant l'heure de passage. La précision des mesures par la sonde est de $\pm 0.2^\circ \text{C}$ pour la température et de $\pm 1.5\%$ HR pour les mesures d'humidité. Sur ces données, un important travail de validation et de correction des mesures a été réalisé par Champy (2003), stagiaire au Laboratoire de Mécanique des Fluides dans le cadre de sa deuxième année d'IUT Mesures Physiques. Les données ont également été transformées en température potentielle et humidité spécifique. Les parcours duraient environs 1h30 à 2h ; pendant ce laps de temps la température évoluant naturellement, cette tendance a été corrigée dans ces données. L'évolution diurne des températures des capteurs du réseau Pigeon situés à proximité des circuits a été modélisée par une régression polynomiale. Les températures mesurées sur les circuits sont donc corrigées à partir des valeurs calculées par la régression.

Circuit 1		Circuit 2	
20/06	11h55 – 14h22	23/06	18h28 – 20h35
22/06	8h33 – 10h39	25/06	17h05 – 19h09
26/06	10h17 – 12h00	26/06	15h16 – 16h54
02/07	17h36 – 19h15	05/07	9h34 – 11h46
09/07	17h39 – 19h12	/	/

Tableau 5-1 : Dates et heures des deux circuits

Des valeurs sont manquantes pour la station Vallon Dol ; afin d'harmoniser la période d'étude entre ces différents jeux de données, la période étudiée va du 14 juin, minuit au 12 juillet, 23h45, sachant que pour la Clio les mesures se font sur quelques heures de certaines journées seulement.

5.1.2 Les différentes situations météorologiques

Différents types de temps ont été mis en évidence grâce une classification automatique, par la méthode des nuées dynamiques. Cette méthode a été appliquée aux paramètres météorologiques, moyennés sur un pas de temps horaire, de la station Vallon Dol sur la période d'étude.

D'après le graphe de la figure 5-1, une classification peut être réalisée en 3 classes ou 6 classes d'après la somme des écarts types de la variable Vitesse du vent. Ces paliers sont moins significatifs pour la variable Température.

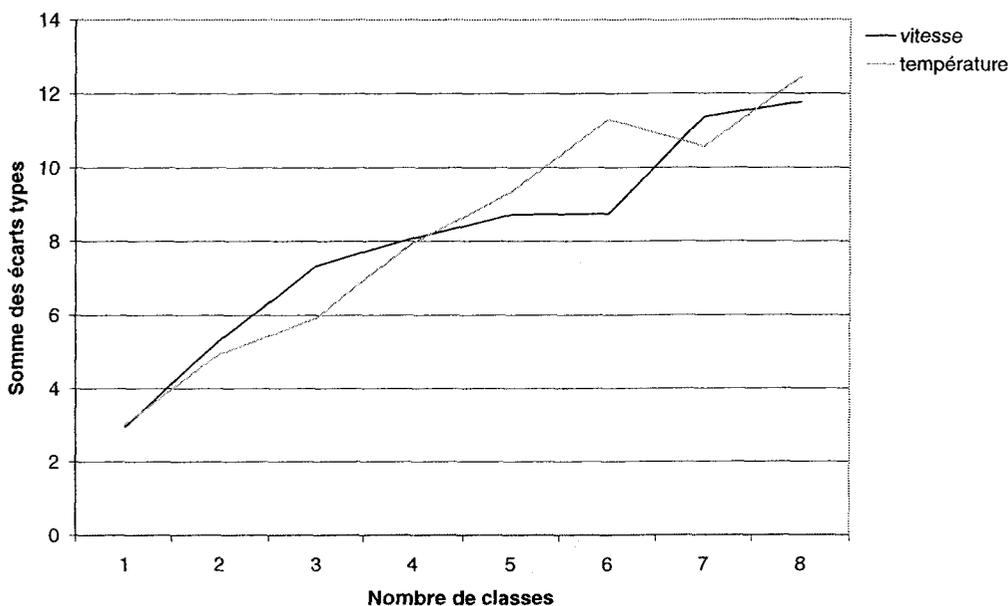


Figure 5-1: Somme des écarts types des variables vitesse du vent et température mesurées à Vallon Dol en fonction du nombre de classes

Les résultats obtenus avec une classification en trois classes ont été jugés satisfaisants ; avec six classes la classification était également pertinente mais il n'a pas semblé nécessaire de détailler autant les différentes situations météorologiques pour cette étude.

La majorité des données est répartie dans deux classes : la classe 1 et la classe 3. La classe 1 se caractérise par une direction de vent qui évolue entre les secteurs 6 et 8, c'est-à-dire entre le nord-nord-ouest et le sud-sud-ouest (figure 5-2). La vitesse moyenne du vent est de 5 m/s et la température de l'air est supérieure à 22°C. La majorité des heures comprises entre 7h et 23h de presque tous les jours se retrouvent dans cette classe ce qui correspond à 51% du temps de la période d'étude. Deux épisodes font exception dans cette classe, avec une direction de vent de sud-est (direction 4) et une vitesse du vent supérieure à 6 m/s pour le deuxième épisode.

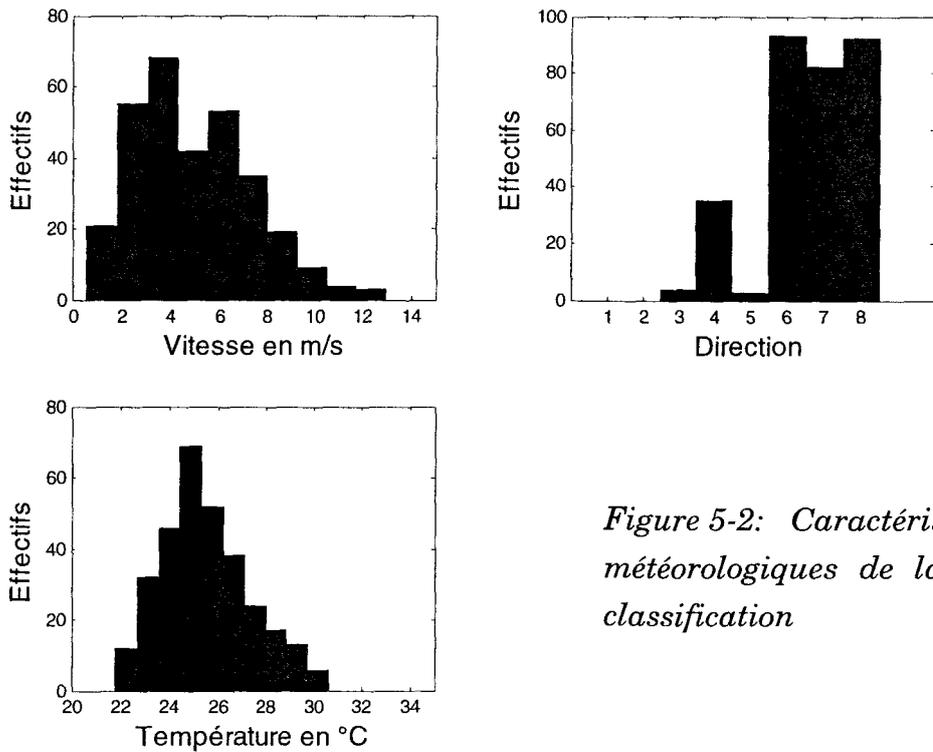


Figure 5-2: Caractéristiques météorologiques de la classe 1 de la classification

La classe 3 regroupe des heures où la direction dominante du vent évolue de nord-nord-est à est-sud-est (figure 5-3). La vitesse du vent est plus faible que celle de la classe 1 avec une moyenne de 2.65 m/s. La température reste inférieure à 26°C mais ne descend pas en dessous de 20° C. Pour cette classe la direction du vent est moins homogène et peut prendre des tendances nord-ouest, est ou sud-ouest. Les heures comprises dans cette classe correspondent à des heures de nuit de la classe 1 et représentent 32 % des heures de la période étudiée.

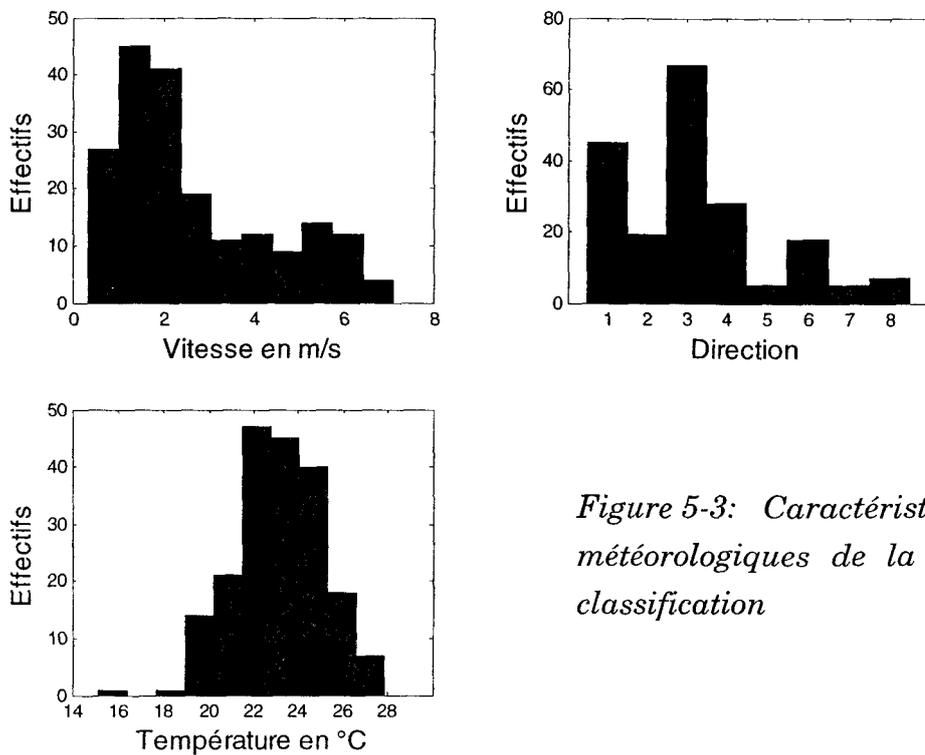


Figure 5-3: Caractéristiques météorologiques de la classe 3 de la classification

Enfin, la classe 2 est constituée d'épisodes marqués par une direction de vent de nord-ouest (figure 5-4). La vitesse du vent est supérieure à celle des autres classes avec une moyenne de 7.7 m/s et peut atteindre 15 m/s. Mais des vitesses plus faibles sont également enregistrées. La température est basse avec un cycle journalier qui évolue entre 15°C et 22°C. Cette classe correspond à 17 % des heures de la période d'étude.

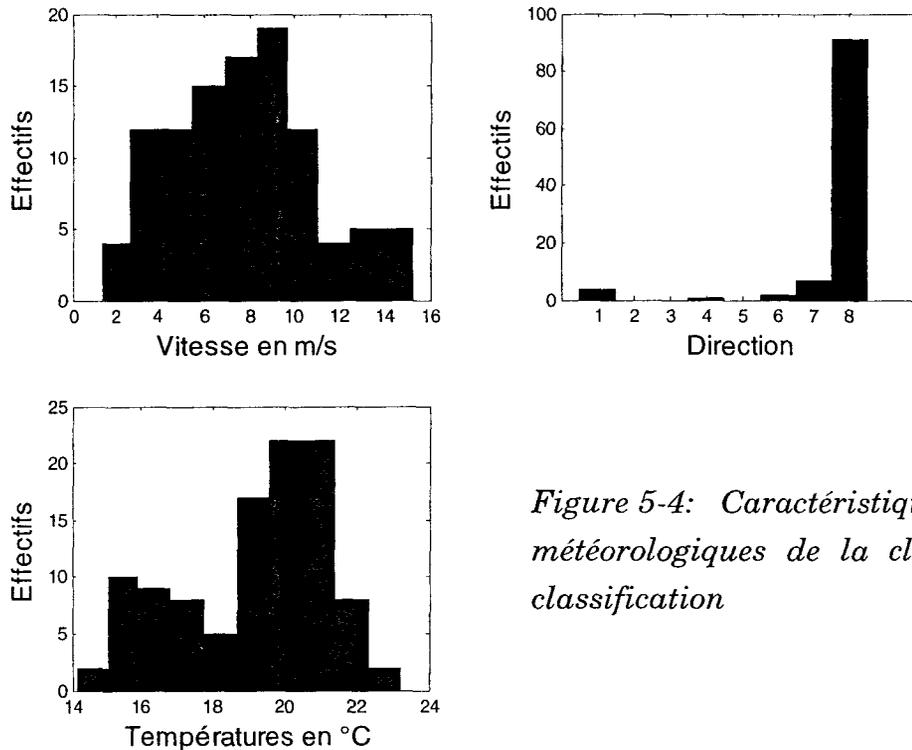


Figure 5-4: Caractéristiques météorologiques de la classe 2 de la classification

Cette classification permet de mettre en évidence trois types de temps représentés pendant la campagne ESCOMPTE :

- le premier est un système de brise qui oscille entre la nuit et le jour (classes 1 et 3). Au lever du soleil, la terre se réchauffe plus vite que la mer, un gradient de température se crée de la mer vers la terre et provoque la formation d'une brise de mer. Au contraire à la tombée de la nuit, la terre se refroidit plus vite que la mer, le gradient de température s'inverse et l'air s'écoule alors de la terre vers la mer, c'est une brise de terre. Cette brise peut également être accentuée par l'air plus froid qui s'écoule dans les vallées des massifs montagneux qui entourent la ville. Ces brises se caractérisent par une vitesse assez faible de jour comme de nuit.
- le deuxième type de temps est caractérisé par un vent de sud-est ; cet épisode est associé à la classe 1. Une étude synoptique permettrait d'analyser la situation météorologique et d'identifier l'origine de ce vent.

➤ enfin le troisième est le type Mistral qui se caractérise par un vent fort de secteur nord-ouest sur Marseille et une chute des températures (classe 2). D'après Viaut (1956), le mistral est un vent qui se définit par un secteur nord entre Valence et Avignon et un secteur nord-ouest entre Avignon et la côte méditerranéenne. Boyer *et al.* (1970) précisent un seuil minimal de vitesse, fixé à 5 m/s pour des mesures effectuées à 10 m du sol, ce qui est le cas de la station de Vallon Dol.

5.1.3 Variabilité spatiale de la température potentielle et de l'humidité spécifique

La variabilité spatiale des paramètres météorologiques est étudiée dans un premier temps selon une situation moyenne du champ de température et d'humidité pendant la période étudiée. Dans un second temps, cette variabilité sera étudiée en fonction des types de temps : pour cela trois journées types ont été sélectionnées.

Afin de ne pas surcharger les graphes représentant les régimes et de résumer l'information fournie par les 20 capteurs, une classification automatique a été réalisée sur le régime moyen thermique de chacun des capteurs. Une classification en six classes a permis de choisir un capteur représentatif de chaque zone de la ville de Marseille. Ainsi, seuls les capteurs 1, 5, 8, 11, 17 et 20 ont été retenus dans un premier temps. D'après la superposition des 20 capteurs sur la classification en 6 classes du tissu urbain (carte 5-3), le capteur 15 a été ajouté à cette liste, bien qu'il appartienne à la même classe que le capteur 5, pour analyser l'évolution des températures au nord du centre-ville près de la côte. La même démarche a été utilisée pour l'humidité : une classification a été appliquée sur le régime moyen de l'humidité. Les capteurs 1, 8, 11, 15, 17 et 20 sont retenus pour cette étude.

5.1.3.1 Situation moyenne de la température et de l'humidité

La situation moyenne de ces deux paramètres météorologiques est étudiée d'une part à travers leur variabilité spatiale et d'autre part à travers leur régime moyen.

Une moyenne a été calculée sur l'ensemble de la période d'étude pour les 20 capteurs (cartes 5-4 et 5-5).

Les écarts entre les moyennes des températures des capteurs est faible : la température moyenne la plus faible est enregistrée par le capteur 1 avec une moyenne de 21.82°C, la plus élevée est mesurée par le capteur 16 avec une valeur de 23.29°C. Les capteurs du centre-ville, un peu éloignés de la côte et ceux en périphérie, proches du milieu rural, enregistrent les températures les plus hautes,

supérieures à 23°C. Au contraire, les capteurs situés près de la côte ont des températures plus basses, inférieures à 22.5°C.

Pour l'humidité, l'amplitude est également faible (carte 5-5). Les capteurs 10, 11 et 13 ont enregistré les valeurs d'humidité les plus faibles avec des valeurs inférieures à 9.6 g/kg. Au contraire, les plus fortes valeurs ont été mesurées par les capteurs près de la côte, c'est-à-dire les capteurs 19, 20, 1 et 2 avec des valeurs supérieures à 10.2 g/kg. Un gradient se forme de la côte humide, vers l'intérieur des terres plus sec.

Le régime thermique moyen des capteurs est représenté par les sept capteurs sélectionnés (figure 5-5). Pendant la nuit, la température est plus élevée dans le centre-ville (capteurs 17 et 20) et à proximité (capteurs 5 et 15). La température est plus basse en périphérie (capteurs 8, 11) et près de la côte (capteur 1). Pendant le jour, ce sont au contraire les capteurs en périphérie et proches du centre-ville (capteurs 11, 8, 17) qui enregistrent les températures les plus élevées tandis que près de la côte les températures restent plus faibles (capteurs 15, 5, 1, 20). Le maximum de température est atteint entre 12h et 13h pour la plupart des capteurs, seuls les capteurs 15 et 20 enregistrent leur maximum à 15h indiquant une augmentation des températures plus tardive près de la côte.

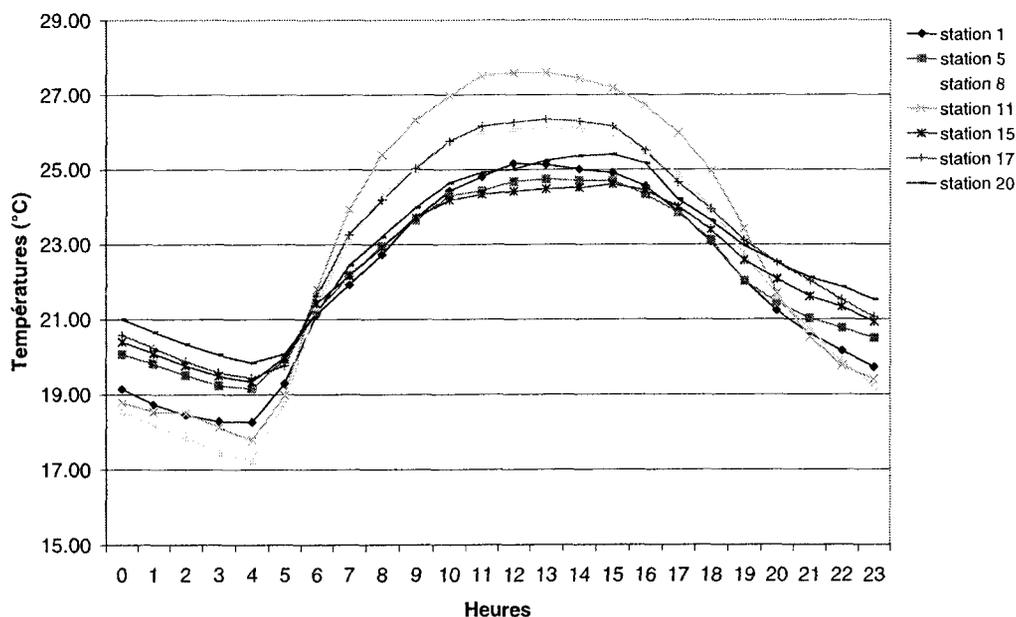


Figure 5-5: Régimes thermiques moyens sur la période d'étude

Le régime moyen de l'humidité spécifique est présenté par la figure 5-6 pour les six capteurs sélectionnés. D'une manière générale, l'humidité connaît une évolution similaire pour les différents capteurs. L'humidité augmente pendant la journée puis

diminue après un maximum en fin d'après-midi, vers 17-18h pour les capteurs en bord de mer et en périphérie, et vers 20-21h pour les autres capteurs.

Une humidité faible est mesurée par les capteurs 8 et 11 pendant la nuit mais elle est élevée pour les capteurs 1, 17, 20. Pendant le jour, l'humidité est toujours la plus faible pour les capteurs 8 et 11 et la plus élevée pour les capteurs 1, 17 et 20, le capteur 15 vient se rajouter à ce dernier groupe. Les capteurs 8 et 11 enregistrent un pic à 6h du matin et enfin on observe un décalage d'une heure entre les capteurs positionnés en centre-ville et les autres, pour ce qui concerne l'augmentation de l'humidité en début de journée.

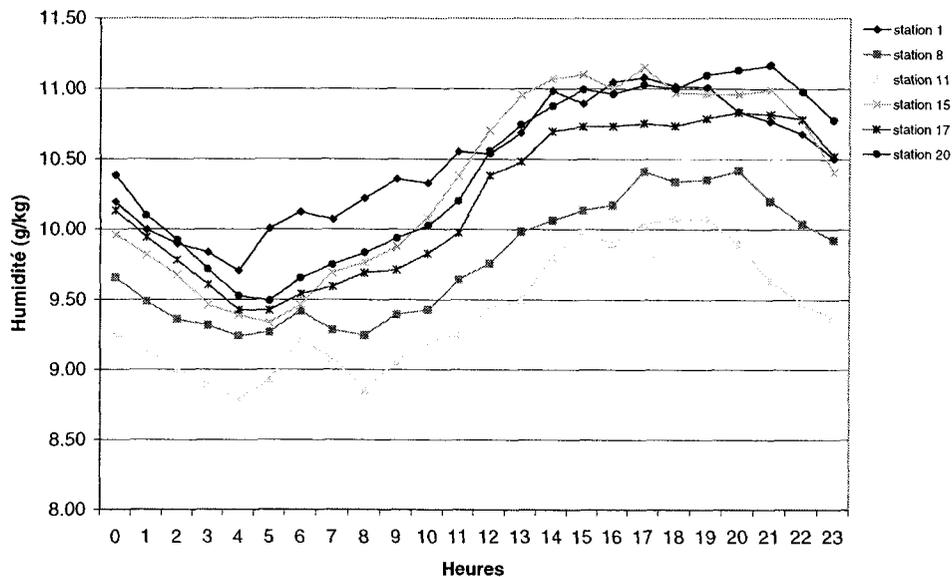


Figure 5-6: Régimes moyens de l'humidité pendant la période d'étude

L'amplitude des écarts thermiques entre les différentes stations est faible mais l'îlot de chaleur urbain apparaît à travers ces mesures, avec des températures qui restent légèrement plus élevées pendant la nuit en centre-ville. L'îlot de chaleur urbain n'est pas très important sur Marseille ; le même phénomène a été étudié à Nice par Carrega (1994). La proximité de la mer semble être responsable de la faible amplitude de l'îlot de chaleur urbain. Pendant le jour, les bâtiments et autres surfaces artificielles stockent la chaleur qui est restituée pendant la nuit. Dans un milieu où la densité bâtie est plus faible, le sol se réchauffe et se refroidit plus vite, le rayonnement n'étant pas piégé ou stocké par des surfaces verticales ; l'amplitude des températures est ainsi plus grande en périphérie qu'en centre-ville ou près de la côte. La proximité de la mer influence également la température et l'humidité car l'air qui passe au-dessus de la mer se charge d'humidité. Il se réchauffe en arrivant sur la terre et se décharge de son humidité. Les capteurs situés à proximité de la mer enregistrent donc des températures plus fraîches et une humidité plus importante pendant le jour. En effet, le système de brise de mer domine pendant

toute la période. Cette influence est également visible sur les capteurs situés en centre-ville : les capteurs 19 et 20 ont des températures légèrement inférieures à celles des capteurs 16 et 17 situés plus en retrait de la côte ; il en est de même pour l'humidité. La mer joue donc un rôle de régulateur de la température, qui varie moins entre le jour et la nuit qu'en périphérie.

Enfin, les réserves d'eau dans le sol ne sont pas les mêmes en centre-ville et en périphérie. Dans les quartiers densément bâtis, les matériaux imperméables recouvrent une grande partie de la surface. Il y a donc peu d'humidité produite par évaporation du sol et l'apport d'humidité se fait donc majoritairement par la mer.

5.1.3.2 Variabilité de la température et de l'humidité par type de temps

Trois types de temps ont été mis en évidence d'après les mesures de la station Vallon Dol ; un jour représentatif de chacun de ces types de temps a été choisi pour analyser les paramètres météorologiques mesurés par le réseau Pigeon et par la sonde mobile sur la Clio. De la même manière que précédemment, le régime et la variabilité spatiale de ces paramètres sont successivement analysés.

5.1.3.2.1 Le système de brise

Le 26 juin est un jour représentatif du système de brise où la direction du vent oscille entre le jour et la nuit.

L'évolution diurne des températures est proche du régime thermique moyen calculé sur l'ensemble de la période (figure 5-7). Les capteurs qui enregistrent les températures les plus basses la nuit sont ceux situés en périphérie et près de la côte (capteurs 1, 8, 11), les températures nocturnes les plus élevées sont mesurées en centre-ville et à proximité (capteurs 17, 20, 5 et 15). Pendant le jour les températures augmentent plus en périphérie et en centre-ville (capteurs 11, 8, 17, 20) et restent plus fraîches près de la côte (capteurs 1 et 5). Le capteur 15 enregistre également des températures assez fraîches par rapport aux autres capteurs mais un pic de températures apparaît à 15h ; les températures mesurées après ce pic sont dans la moyenne du groupe. Les températures diminuent à partir de 13-15h, mais à partir de 19h, la baisse des températures est moins importante au centre-ville et à proximité (capteurs 5, 15, 17, 20).

On note également un léger décalage dans le temps entre les capteurs en périphérie et les capteurs en centre-ville pour le début de l'augmentation des températures : en périphérie, la température augmente dès le lever du soleil, en centre-ville, une heure de plus est nécessaire pour noter l'augmentation des températures.

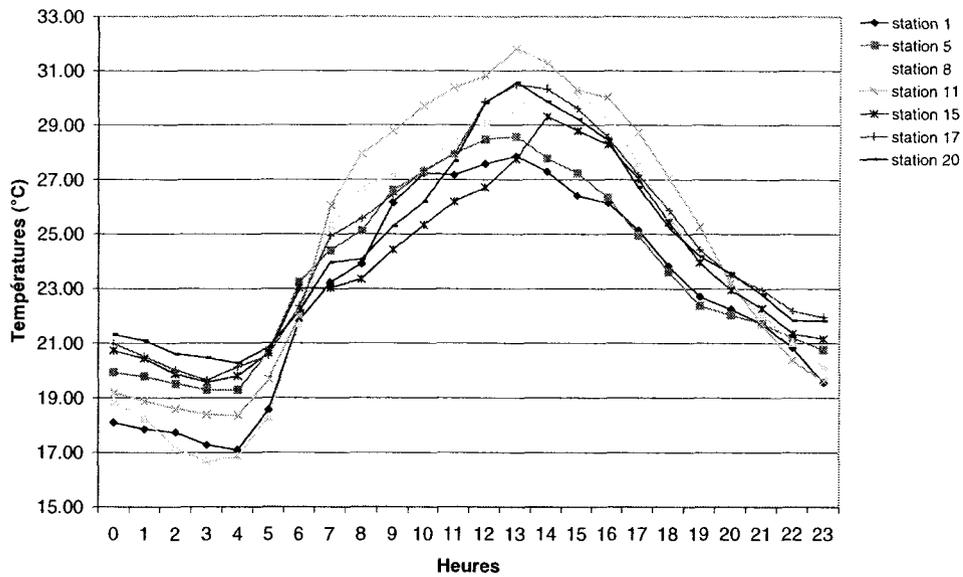


Figure 5-7: Évolution diurne des températures le 26 juin

L'évolution de l'humidité lors de cette journée a été chaotique. Une humidité élevée a été enregistrée par les capteurs 20 et 17 pendant la nuit et 20 et 15 pendant la journée (figure 5-8). Les capteurs 1, 8 et 11 ont au contraire enregistrés une humidité plus faible pendant la nuit et le jour (sauf le 8). L'humidité diminue pour le capteur 11 dès 18h alors qu'elle augmente toujours pour le capteur 15. La diminution de l'humidité survient vers 21h pour les capteurs 1 et 8, et encore une heure plus tard pour les capteurs du centre-ville.

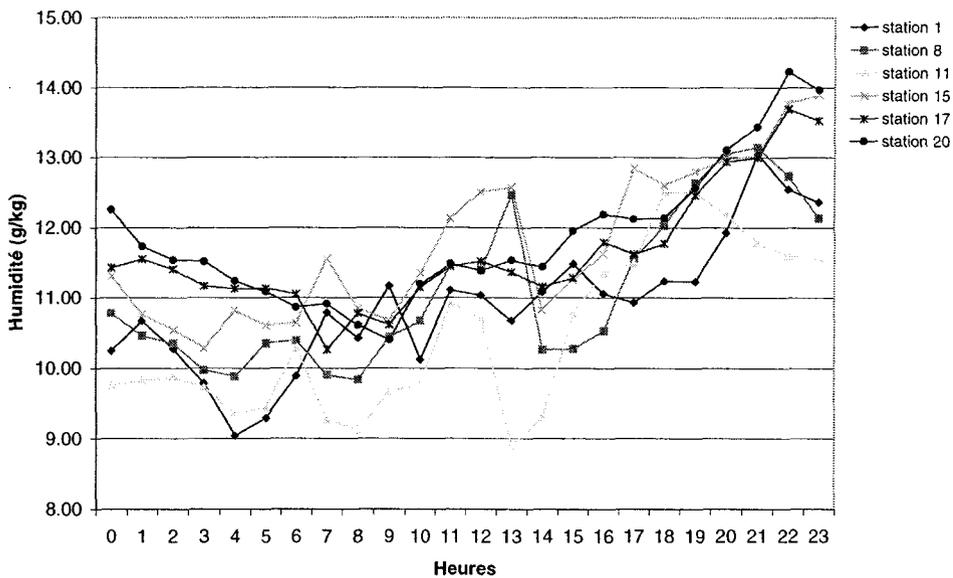


Figure 5-8: Évolution diurne de l'humidité le 26 juin

Les mesures réalisées par la sonde véhiculée sur les deux trajets permettent d'affiner l'analyse de la variabilité spatiale de la température et de l'humidité le 26 juin, en fin de matinée et en milieu d'après-midi (cartes 5-6 et 5-7).

Le premier trajet a été réalisé entre 10h et 12h. D'une manière générale, un gradient de température est identifiable de la côte où les températures sont plus basses, vers l'intérieur de la ville où les températures sont plus élevées (carte 5-6). Les températures enregistrées lors du passage en centre-ville sont plus élevées par rapport aux autres points de mesures ; elles sont les plus basses sur la côte, au nord du centre-ville. L'amplitude thermique est importante avec des températures comprises entre 22 °C et 30°C.

L'amplitude de l'humidité durant ce trajet est plus faible et varie entre 9.5 g/kg et 12.5 g/kg (carte 5-7). L'humidité est faible sur le centre-ville et sur le bord de la côte au sud de la ville, elle est au contraire plus élevée sur la côte au nord.

Le deuxième circuit a été parcouru de 15h à 17h. A la même latitude, les températures mesurées près de la côte sont plus fraîches que les températures mesurées à l'intérieur des terres (carte 5-8). Une opposition entre le nord et le sud est également mise en évidence avec des températures plus chaudes au nord de la ville qu'au sud. Par rapport aux mesures du matin, les températures semblent plus stationnaires sur la côte au sud de la ville que sur la côte nord où les températures augmentent beaucoup plus entre ces deux moments de la journée.

Les mesures d'humidité réalisées l'après-midi montrent une inversion de la tendance du matin : l'humidité est plus importante sur la côte sud que sur la côte nord mais l'écart d'humidité entre ces deux zones est moins important que le matin (carte 5-9). Sur la côte nord, l'humidité varie très peu entre les deux périodes de mesure ; la différence est légèrement plus marquée entre les deux périodes de mesure sur la côte au sud de la ville. Vers l'intérieur des terres, l'humidité diminue puis augmente à nouveau dans les espaces où la densité bâtie est moins importante.

Différents processus permettent d'expliquer les différentes évolutions de ces paramètres et leur variabilité spatiale :

➤ L'îlot de chaleur urbain se forme de nuit au-dessus du centre-ville à cause de la restitution de la chaleur par les bâtiments principalement tandis qu'en banlieue le sol se refroidit toujours. De plus, un système de brise de terre se met en place, la mer influence alors beaucoup moins les températures et cette brise peut amener de l'air chaud près de la côte car elle traverse toute la ville d'est en ouest et se réchauffe par la restitution de la chaleur par les bâtiments et autres surfaces artificielles. Au contraire pendant la journée, en transportant un air plus frais, la brise de mer limite l'augmentation des

températures sur la côte mais apporte de l'humidité. Par ailleurs un léger changement de direction est noté entre les deux parcours : la brise était de secteur sud-sud-ouest entre 10h et 12h et de secteur ouest-sud-ouest entre 15h et 17h. Ce changement pourrait expliquer l'humidité faible sur le sud de l'agglomération le matin, cette zone pouvant se trouver à l'abri du massif de Marseilleveyre.

➤ Les MOS et l'environnement immédiat des mesures pourraient expliquer certaines différences de température notamment entre les deux trajets effectués à deux moments de la journée. Les températures mesurées sur la côte au sud de la ville varient peu entre la fin de matinée et l'après-midi. En revanche, les températures mesurées sur la côte au nord de la ville augmentent de près de 6° entre les deux périodes de mesures. Cette zone correspond à la zone industrielle en arrière du PAM, où les surfaces artificielles recouvrent la majorité de la surface ; par contre au sud du centre-ville, la végétation est plus présente avec des espaces vert publics aménagés en bordure de mer et des jardins privés entourant les villas de cet ancien quartier bourgeois. Cette différence de température peut donc s'expliquer par l'environnement immédiat des parcours.

5.1.3.2.2 *Le mistral*

Le 18 juin a été un jour de mistral avec une vitesse du vent qui a rapidement augmenté en début de matinée pour atteindre plus de 14 m/s en milieu de journée puis a diminué jusqu'à une vitesse de 8 m/s en fin de journée. Le mistral est ici un vent de secteur nord-ouest, qui passe donc à proximité de la mer et éventuellement traverse la baie de Marseille avant d'atteindre la moitié sud de Marseille.

Seules les mesures du réseau Pigeon sont analysées pour ce type de temps car aucun circuit n'a été parcouru par temps de mistral

Les températures enregistrées durant cette journée sont plus fraîches que celles du 26 juin. Le champ des températures est légèrement modifié par rapport à la situation moyenne (figure 5-9). Le capteur 11 enregistre la nuit des températures plus élevées par rapport à sa situation moyenne et évolue de la même manière que les stations du centre-ville (capteurs 17 et 20). Les capteurs 5 et 15 enregistrent par contre des températures plus basses pendant la nuit et le capteur 5 des températures également plus basses pendant la journée. Enfin, les capteurs 15 et 20 mesurent des températures plus élevées pendant la journée et le capteur 8 les températures les plus faibles la nuit par rapport à la situation moyenne. En

résumé, les capteurs du centre-ville et le 11 ont les températures les plus élevées pendant le jour et la nuit, les capteurs près de la côte et au sud du centre-ville (capteurs 1 et 5) ont au contraire les températures parmi les plus basses.

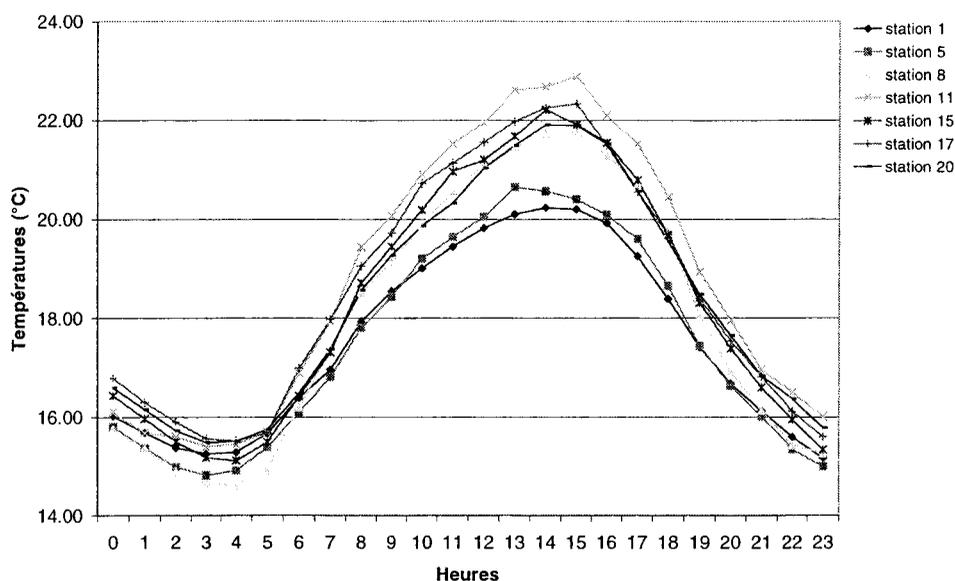


Figure 5-9: Évolution diurne des températures le 18 juin

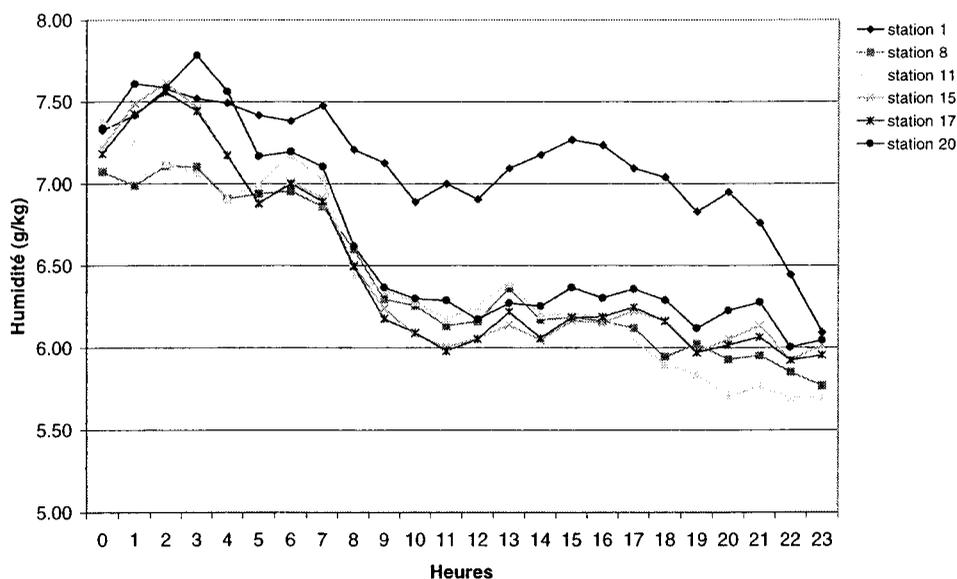


Figure 5-10: Évolution diurne de l'humidité le 18 juin

L'humidité est également plus faible que dans la situation moyenne (figure 5-10). L'évolution diurne de l'humidité est modifiée avec une diminution pendant la journée. Le capteur 1 enregistre malgré tout une humidité élevée pendant le jour et la nuit ; elle est faible pour les capteurs 8 et 11. Le capteur 1 évolue d'une manière assez différente des autres capteurs : tandis que l'humidité chute en général brutalement à partir de 7h du matin, l'humidité diminue de seulement 0.5 g/kg pour

le capteur 1 et reste plus élevée jusqu'à 20h où une forte diminution ramène l'humidité aux mêmes valeurs que celles des autres capteurs. Pour ces derniers, l'humidité est stationnaire de 12h à 17h puis diminue légèrement jusqu'à 19h pour les capteurs du centre-ville et jusqu'à la fin de la nuit pour les capteurs en périphérie.

Le mistral est un vent fort qui empêche la chaleur et l'humidité de s'accumuler ce qui explique les températures inférieures à la moyenne et les valeurs d'humidité assez faibles. Il transporte des masses d'air à longue distance et le cycle diurne local dépend largement de leur origine et des conditions synoptiques.

Toutefois, dans les quartiers densément bâtis, avec des immeubles imposants et hauts, les capteurs peuvent se trouver en situation d'abri et subir un vent moins fort qu'en banlieue. Le mistral s'accompagne d'un ciel clair, le rayonnement solaire varie donc peu par rapport à une journée de brise et les mêmes processus cités précédemment peuvent expliquer des températures et des humidités plus élevées en centre-ville qu'en banlieue. Le capteur 11 peut également être en situation d'abri de la Chaîne de l'Étoile et recevoir un mistral affaibli.

Enfin, le capteur 1 est le capteur situé le plus au sud de la ville. Compte tenu de la direction du vent, c'est peut-être le seul à recevoir un mistral qui s'est chargé réellement d'humidité en traversant la baie de Marseille.

5.1.3.2.3 Un vent de sud-est

Enfin, un vent de sud-est a été enregistré le 15 juin. Ce type de temps se met en place après une brise de terre durant la nuit.

Le champ des températures a donc une variabilité spatiale identique à celle du 26 juin pour la fin de la nuit (figure 5-11). Le changement de temps se fait vers 5-6h du matin avec une montée brutale des températures : à 5h du matin les températures sont comprises entre 14 et 18°C pour les 7 capteurs, et à 9h du matin elles varient entre 21 et 25°C. L'évolution diurne est modifiée avec des températures qui ne varient presque pas de 9h à 16h, puis diminuent ensuite légèrement mais restent élevées pendant la nuit, supérieures à 20-21°C. Les minima de température sont enregistrés par les capteurs 1, 8 et 11 pendant la nuit et les capteurs 1 et 5 pendant la journée. En revanche, les stations du centre-ville et à proximité (capteurs 15 et 20) mesurent les températures les plus élevées la nuit. Le jour les températures les plus élevées sont enregistrées par les capteurs 11, 15 et 17. A partir de 15-16h, les températures diminuent sauf pour la station 1 où la température augmente jusqu'à 22h puis se stabilise à la même température que

celles des autres capteurs. A 23h, le champ de température devient très homogène sur la ville.

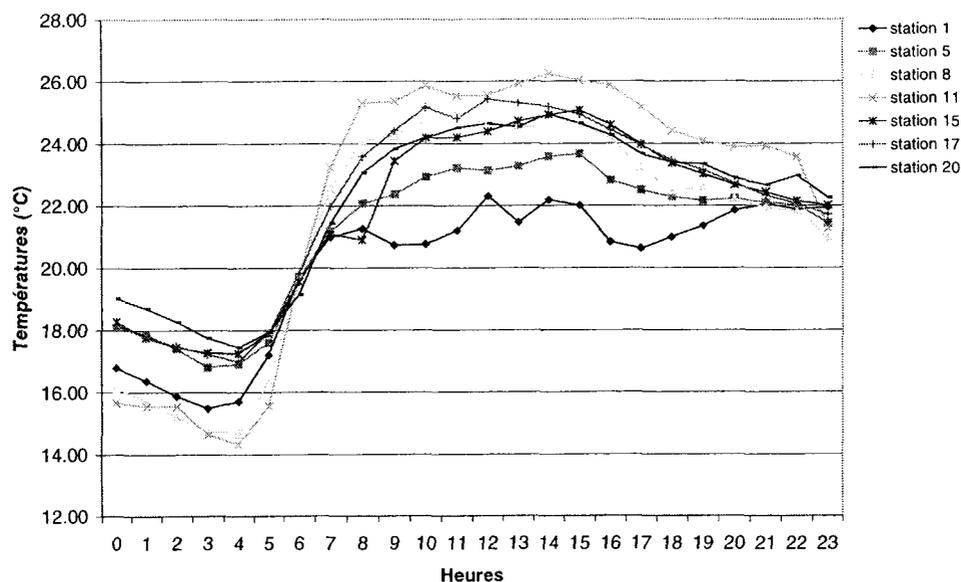


Figure 5-11: Évolution diurne des températures le 15 juin

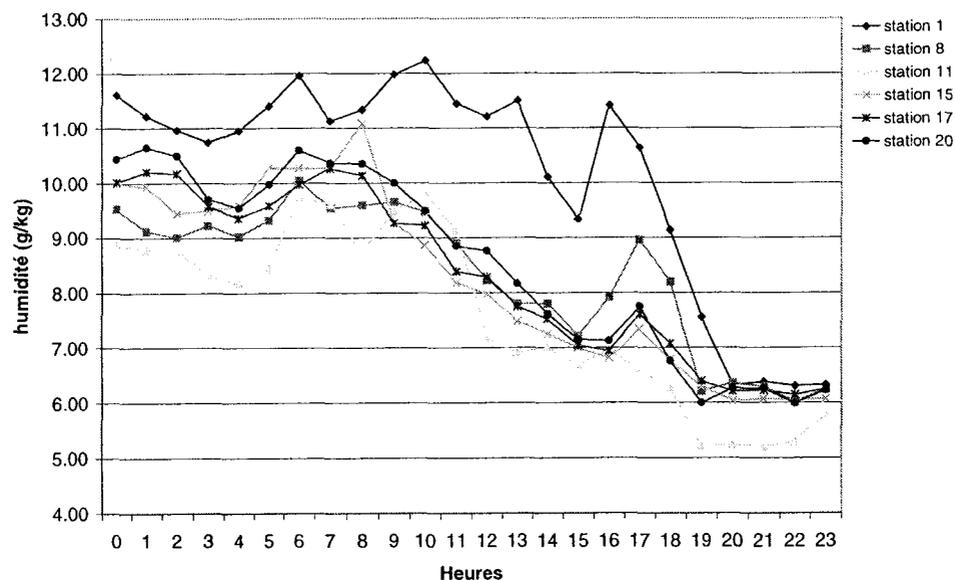


Figure 5-12: Évolution diurne de l'humidité le 15 juin

L'évolution diurne de l'humidité est à peu près similaire à celle de 18 juin (figure 5-12). On retrouve le capteur 1 qui enregistre l'humidité la plus élevée le jour et la nuit et les capteurs 8 et 11 la plus faible pendant la nuit. Pendant le jour, une humidité faible est mesurée par le capteur 11 et le capteur 15.

L'humidité augmente de 3 à 6 h du matin où le vent s'établit de secteur sud-est. Dès 8-10h, l'humidité diminue jusqu'à 19h où elle se stabilise ; un léger pic est

enregistré pour l'ensemble des capteurs vers 17h mais une heure plus tôt pour le capteur 1 situé le plus au sud ; il est presque inexistant pour le capteur 11. Ce capteur se détache également du groupe et évolue de manière différente avec une chute de l'humidité qui ne survient pas avant 13h ; mais après le pic de 16h, l'humidité diminue fortement jusqu'à 20h et reste très faible durant la nuit.

Les mesures effectuées par la sonde véhiculée le 5 juillet sont analysées ici car cette journée était également marquée par un vent de sud-est.

Les températures mesurées ce jour-là sur le deuxième trajet, entre 9h30 et 11h30, sont plus faibles sur la côte qu'à l'intérieur des terres (carte 5-10). Une opposition entre la côte sud, plus fraîche et la côte nord, plus chaude, est identifiable.

L'humidité mesurée est plus faible en général que par temps de brise (carte 5-11). Elle varie entre 8.6 et 10.2 g/kg. L'humidité est relativement importante sur toute la partie sud de la ville et à l'intérieur des terres au nord-est du centre-ville. Seule la côte au nord du centre-ville enregistre une humidité assez faible ainsi qu'en périphérie très éloignée.

Le vent de sud-est perturbe l'évolution diurne des températures ; il amène un air sec d'où une baisse de l'humidité au cours de la journée et une température constante. Seules les stations 11 et 1 semblent ne pas subir son influence. La station 11 peut se retrouver encore une fois en situation d'abri des pics de la Grande Tête Rouge (cf. carte 1-2) et subir une moindre influence du vent. Par contre, il est difficile d'expliquer l'évolution de la température et de l'humidité du capteur 1. Une station de mesure fixe de la campagne CLU-ESCOMPTE était positionnée à proximité, au nord-nord-est de ce capteur. Pour cette journée, la vitesse du vent a diminué brutalement à partir de 17h30 et est restée très faible (inférieure à 0.5 m/s) jusqu'à 19h30 puis elle a varié entre 0.5 et 1 m/s pour la fin de la journée. Le capteur 1 est situé en bordure de la ville au nord du massif de Marseilleveyre qui culmine à moins de 400 m. Si la vitesse du vent faiblit, le capteur peut alors se retrouver en position d'abri et la température de l'air augmente car le vent emporte moins la chaleur sensible.

Les températures sont assez variables sur l'ensemble de l'agglomération même si l'amplitude moyenne est faible entre les capteurs du réseau Pigeon. L'îlot de chaleur urbain est identifié sur le centre-ville avec des températures plus élevées pendant la nuit que dans le reste de la ville. Enfin, l'amplitude thermique de chaque capteur varie avec des écarts plus importants en périphérie près des zones rurales

qu'en centre-ville ce qui laisse supposer une influence de la structure des quartiers et des MOS sur les températures.

La variabilité spatiale de l'humidité est beaucoup moins évidente à analyser que celle des températures. On observe en général un gradient de la côte vers l'intérieur des terres, gradient modifié selon le type de temps.

Les champs de température et d'humidité ne sont pas homogènes sur l'ensemble de la zone d'étude. L'influence de la mer est identifiable avec des températures plus fraîches et une amplitude plus faible sur la côte ; l'humidité est également plus importante sur la côte qu'à l'intérieur des terres. Les zones densément bâties sont également caractérisées par un îlot de chaleur et peut-être par un îlot d'humidité (les différences de valeurs sont assez faibles) qui se forment la nuit avec des températures qui restent élevées et une humidité plus forte. Enfin, en périphérie, les températures ont une amplitude plus grande, mais c'est l'inverse pour l'humidité. Cette description générale est modifiée selon les types de temps : avec une brise de mer par exemple, l'air se charge d'humidité sur la mer et amène donc un air plus humide sur la côte, mais une différence entre les côtes nord et sud apparaît dans les mesures de température et d'humidité. D'autres facteurs interviennent pour expliquer cette variabilité spatiale. L'environnement immédiat de chaque capteur du réseau Pigeon peut influencer les mesures de température et d'humidité car comme on l'a vu dans le paragraphe 2.2 la présence d'une ville modifie les conditions météorologiques locales. Comme la ville est une combinaison de quartiers dont les caractéristiques morphologiques et les MOS diffèrent, leur influence sur les paramètres météorologiques n'est peut être pas identique.

5.1.4 Relation entre les quartiers aérodynamiques et les mesures du réseau Pigeon

L'îlot de chaleur urbain est un phénomène très étudié car la qualité de vie des urbains est devenu un problème préoccupant pour les communautés urbaines. De nombreuses études établissent des relations entre la morphologie de la ville, les MOS, le type de temps et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain. Pinho & Manso Orgaz (2000) ont réalisé une étude sur une ville côtière du Portugal afin d'analyser la variabilité spatiale des températures sur la ville. Ils montrent que la température est plus élevée lorsque la densité bâtie est élevée, sans surface de végétation, avec une production importante de chaleur par le trafic. Ils notent également que l'intensité de l'îlot de chaleur urbain est plus importante lorsque le ciel est totalement clair et qu'il n'y a pas de vent. Eliasson (1994a) a réalisé une observation pendant trois ans de la température de deux stations placées dans la ville de

Göteborg, Suède. Elle met en évidence l'îlot de chaleur urbain qui se développe avec une amplitude maximale de 5°C et établit des relations entre la température de l'air, les MOS, la morphologie, la topographie et la distance à la mer. Eliasson précise également que la morphologie des bâtiments influence la température de l'air de manière assez faible mais constante, plus fortement l'été que l'hiver (Eliasson, 1994b).

Le tissu urbain de Marseille a été découpé en six et neuf types de quartiers définis de façon à avoir un sens aérodynamique. Chaque capteur a été repéré sur les classifications en six classes et neuf classes afin d'identifier dans quel type de quartier il était situé. Avec la classification en six classes, la quasi-totalité des capteurs se trouvait dans la classe Individuel dense ; la répartition est meilleure avec la classification en neuf classes. La relation entre la température moyenne sur la période ($\langle T \rangle$) de chaque capteur et les différentes caractéristiques morphologiques et les MOS de chaque type de quartier correspondant sont analysés dans ce paragraphe à l'aide de la régression linéaire.

A Marseille, l'influence de la mer sur la météorologie locale apparaît assez importante. C'est pourquoi la distance entre la mer et chaque capteur est la première variable analysée par une corrélation simple. La température moyenne et cette distance à la mer sont corrélées à + 0.55, ce qui signifie que plus la distance entre le capteur et la mer est importante, plus la température augmente. Par contre, la corrélation simple de la température avec les autres paramètres descriptifs des quartiers aérodynamiques n'atteint pas des valeurs significatives.

Une première régression linéaire (régression 1) a été calculée : la température moyenne de la période d'étude ($\langle T \rangle$ en °C) est la variable expliquée et la distance à la mer (D en m), la variable explicative. L'équation de cette régression est :

$$\langle T \rangle = a D + 22.3$$

$$\text{avec } a = 0.0006^\circ\text{C/m}$$

Elle permet d'expliquer 30% de la variance des températures sur Marseille. La carte 5-12 présente les valeurs résiduelles de la régression 1. Certains résidus sont élevés mais ne dépassent pas 1°C. La température des capteurs situés près de la côte au sud de la ville et dans la première couronne est surestimée par la régression linéaire, ce qui signifie que la température est moins importante dans la réalité que celles estimées par le modèle. En revanche, la température des capteurs situés en centre-ville et à proximité est sous-estimée : les températures sont plus importantes que celles prévues par la régression. La distance à la mer n'est donc pas le seul paramètre qui permet d'expliquer la variabilité des températures.

Les résidus de la régression 1 représentent la part de l'information qui n'est pas expliquée par la variable Distance à la mer. Ils sont corrélés de manière plus significative avec certaines caractéristiques des quartiers aérodynamiques. Le coefficient de corrélation est de + 0.55 avec la densité des surfaces bâties, de -0.34 avec l'espacement moyen entre les bâtiments (en m), de + 0.47 avec le périmètre des bâtiments (en m), de + 0.35 avec le volume (en m³), de + 0.25 avec la densité des surfaces imperméables et de -0.32 avec la densité des surfaces de bois. Une seconde régression est donc calculée avec les résidus de la régression 1 (Resi) comme variable expliquée et les variables citées ci-dessus comme variables explicatives. L'équation de la régression 2 est :

$$\text{Resi} = a \text{ surf_bat} + b \text{ esp} + c \text{ péri} + d \text{ volu} + e \text{ surf_imper} + f \text{ surf_bois} + 3.86$$

avec $a = 0.21^{\circ}\text{C}$; $b = 0.06^{\circ}\text{C}/\text{m}$; $c = -0.17^{\circ}\text{C}/\text{m}$; $d = 0.0004^{\circ}\text{C}/\text{m}^3$; $e = 0.045^{\circ}\text{C}$; $f = -0.06^{\circ}\text{C}$

Cette régression explique 40% de l'information. Les résultats sont meilleurs pour les capteurs du centre-ville, 18 et 19, et de la périphérie, 13 et 8 (carte 5-13). En revanche, pour les capteurs de la côte au sud de la ville et ceux à proximité du centre-ville, la régression surestime les valeurs et pour ceux du péricentre, les valeurs sont au contraire sous-estimées. Cette nouvelle régression améliore les résultats pour certains capteurs mais ils peuvent également être plus médiocres pour d'autres capteurs.

Il semblerait que la température de certains capteurs soit influencée uniquement par la mer (capteurs 3, 4, 6, 7, 10, 11, 12 et 14) alors que pour d'autres (8, 11, 13, 19 et 20) les caractéristiques des quartiers seraient plus importantes.

C'est pourquoi une troisième régression a été calculée afin de « combiner » les effets à la fois de la proximité de la mer et de la structure de la ville. La température est la variable expliquée et la distance à la mer, la densité bâtie, l'espacement moyen entre les bâtiments, le périmètre des bâtiments, le volume, la densité des surfaces imperméables et des surfaces de bois les variables explicatives. L'équation de la régression 3 est :

$$\langle T \rangle = a D + b \text{ surf_bat} + c \text{ esp} + d \text{ péri} + e \text{ volu} + f \text{ surf_imper} + g \text{ surf_bois} + 26.22$$

avec $a = 0.0001^{\circ}\text{C}/\text{m}$; $b = 0.16^{\circ}\text{C}$; $c = 0.03^{\circ}\text{C}/\text{m}$; $d = -0.13^{\circ}\text{C}/\text{m}$; $e = 0.0003^{\circ}\text{C}/\text{m}^3$; $f = 0.014^{\circ}\text{C}$; $g = -0.06^{\circ}\text{C}$

Cette régression explique 75 % de la variance des températures. Les écarts entre les valeurs observées et les valeurs prévues par la régression ne dépassent

pas les 0.5° C. Mais l'amplitude thermique entre les stations est faible (1.25°C) ce qui amène à relativiser ce faible écart. La température des capteurs du péricentre est toujours sous-estimée par la régression ainsi que celle des capteurs 6 et 7 situés en périphérie (carte 5-14). Par contre, la température des capteurs 2, 14 et 15 est surestimée par la régression, leur température étant plus basse que celle prévue par le modèle.

Les résultats de ces régressions sont à prendre avec précaution car la condition de linéarité entre les variables expliquée et explicatives n'est pas toujours respectée et certaines variables sont corrélées entre elles. Il en ressort toutefois que la proximité de la mer influence le champ des températures (certainement selon le type de temps) mais que ce phénomène ne suffit pas à expliquer sa variabilité spatiale. La structure et les MOS de la ville jouent également un rôle important qu'il est délicat de quantifier.

L'humidité mesurée par le réseau Pigeon a été analysée de la même manière mais la qualité des résultats est similaire. L'humidité moyenne sur la période ($\langle H \rangle$) est corrélée assez fortement à la distance à la mer avec un coefficient de -0.87 , ce qui signifie que l'humidité ($\langle H \rangle$ en g/kg) diminue lorsqu'on s'éloigne de la côte. Une régression simple entre ces deux variables permet d'expliquer 75 % de la variance spatiale de l'humidité. L'équation de la régression 4 est :

$$\langle H \rangle = a D + 10.27$$

$$\text{avec } a = 0.00007 \text{ g/kg/m}$$

Les résidus ne dépassent pas 0.5 g/kg. L'humidité du capteur 13 est celle qui est la moins bien estimée, avec une valeur surestimée par la régression ; c'est également le cas du capteur 7 (carte 5-15). L'humidité du capteur 19 est en revanche sous-estimée par la régression. Comme pour la température, l'influence de la mer ne suffit pas pour expliquer la variabilité spatiale de l'humidité. D'autres variables ont été ajoutées au modèle, celles qui étaient les mieux corrélées aux résidus de cette première régression. L'équation de la régression 5 est alors

$$\langle H \rangle = a D + b \text{ surf_bat} + c \text{ esp} + d \text{ surf_imper} + e \text{ surf_veg} + 5.77$$

$$\text{avec } a = -0.00007 \text{ g/kg/m} ; b = 0.02 \text{ g/kg} ; c = 0.02 \text{ g/kg/m} ; d = 0.09 \text{ g/kg} ; e = 0.03 \text{ g/kg}$$

Elle permet d'expliquer 90 % de la variance spatiale de l'humidité. D'après l'analyse des résidus, l'humidité des capteurs 7, 12, 14, 18 et 19 est toujours sous ou

surestimée par la régression, par contre celle du capteur 13 est nettement améliorée (carte 5-16). Les capteurs 1 et 2 sont à la limite de l'intervalle de confiance à 95 %.

Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence l'influence majeure de la mer sur la variabilité de l'humidité sur la ville de Marseille. La ville joue un rôle assez secondaire dans cette répartition mais semble cependant importante pour certains capteurs comme le 13.

5.1.5 Conclusion partielle

Trois types de temps principaux ont été enregistrés pendant la campagne ESCOMPTE. La majeure partie de la campagne a été marquée par un système de brise avec une brise de mer qui s'installait au début de la journée, remplacée par une brise de terre en début de soirée. Quelques journées ont également enregistré un vent fort ; vent typique de la région, le mistral provoque une chute de la température et de l'humidité. Enfin quelques journées ont connu un vent de secteur sud-est.

D'après les mesures du réseau Pigeon, l'îlot de chaleur urbain a été clairement identifié avec cependant des différences de température relativement faible entre le centre-ville et la banlieue éloignée. Des différences dans l'amplitude du cycle diurne des températures ont également été notées entre ces deux zones. Pour l'humidité, on observe un gradient de la côte, où l'humidité est élevée, vers l'intérieur des terres, où l'humidité est plus faible.

La variabilité spatiale de ces paramètres météorologiques est modifiée par les différents types de temps. L'humidité et la température ne varient pas de la même manière sur l'ensemble de la ville ; les conditions météorologiques ne sont pas le seul facteur expliquant ces différences dans la variabilité des champs de température et d'humidité sur la ville. C'est pourquoi des régressions linéaires ont été calculées afin de quantifier l'influence de l'environnement des capteurs sur les mesures. Cette influence reste relativement faible mais dépendante de l'environnement très local avec une variabilité de très petite échelle spatiale.

Il n'était pas évident de mener cette étude avec ces données car la température et l'humidité dépendent principalement des conditions météorologiques et l'influence des différentes structures de la ville est un facteur secondaire pour expliquer cette variabilité. C'est pourquoi l'analyse de la relation entre les quartiers aérodynamiques et les paramètres météorologiques a été poursuivie avec des mesures de température de surface qui apparaissent beaucoup moins liées aux conditions météorologiques et à la proximité de la mer.

5.2 La température de brillance

Dans le cadre de CLU-ESCOMPTE, une étude des températures de brillance a été entreprise sur Marseille à partir d'images satellites NOAA-AVHRR afin d'établir des relations entre les températures de brillance et les MOS (Dousset & Kermadi, 2003). Des études antérieures ont montré qu'effectivement il existait une forte anti-corrélation entre les températures de brillance et l'indice de végétation calculé à partir des images SPOT sur le bassin de Los Angeles (Dousset, 1991).

La température de surface correspond à la température que l'on peut mesurer avec un thermomètre ou un thermocouple à la surface d'un corps. Cette mesure n'est pas très facile à réaliser car il faut que le thermomètre soit bien collé à la surface et qu'il ne soit pas influencé par un autre rayonnement. C'est pourquoi la température de surface est plutôt mesurée à partir d'un radiomètre. Le flux infrarouge thermique est un rayonnement de grande longueur d'onde situé entre 8 et 15 μm qui varie en fonction de l'émissivité et de la température de la surface : si cette émissivité est connue la mesure du flux infrarouge thermique donne la température de surface. Malheureusement, en ville, l'émissivité est très variable car la surface urbaine est très hétérogène, on préfère alors mesurer une température de brillance qui est estimée sans tenir compte de l'émissivité. La température de brillance correspond à la température d'un corps noir qui aurait la même luminance que l'objet observé (Robin, 1995). A l'intérieur d'un pixel, la température de surface, référencée comme une température radiométrique, correspond alors à l'intégrale des températures de brillance de chacun des objets contenus dans le pixel. L'angle de visée ainsi que le canal dans lequel sont effectuées les mesures sont également à prendre en compte (Becker, 1995).

5.2.1 Données utilisées

Des mesures de température de brillance ont été réalisées par avion pendant la campagne ESCOMPTE. Une série de vols a été effectuée au-dessus de la ville sur différents quartiers. Ces mesures ont été faites à l'aide d'une caméra infrarouge thermique embarquée sur l'avion. Les images ont été acquises avec un objectif grand angulaire dans le but principal de caractériser les effets directionnels selon un protocole développé par Lagouarde *et al.* (2000). Des imagerie autour du nadir (visée verticale +/- 20°) en ont été extraites. Celles-ci ont été rectifiées en géométrie et corrigées des effets perturbateurs de l'atmosphère. Les imagerie ainsi extraites ont été superposées à la BDTopo selon la position GPS de l'avion et en tenant compte du roulis et du tangage. La direction de l'avion a également permis d'orienter l'imagerie. Une vérification des résultats obtenus a alors été réalisée : on

note un décalage d'une centaine de mètre par rapport à la BDTopo lorsqu'il est possible de se repérer sur l'imagerie.

Après ce travail de mise en place des données, un jeu de données a été mis à disposition un an après les mesures ; seules quelques imagettes ont été sélectionnées pour cette étude. Le 10 juillet, des mesures ont été effectuées sur le centre-ville, puis sur le quartier St Barnabé et enfin sur le quartier La Rose, entre 14h et 15h (carte 5-17). Deux imagettes ont été sélectionnées sur le vol réalisé au-dessus du centre-ville, deux au-dessus du quartier St Barnabé, et une imagerie sur le quartier La Rose (carte 5-18). De ces imagettes ont été calculés l'histogramme des températures et des profils des températures moyennes, minimales, maximales et de l'écart type sur l'ensemble de chaque vol.

5.2.2 Résultats

La fréquence des températures de chaque imagerie a été calculée pour les cinq imagettes retenues pour cette étude (figure 5-13). On note tout d'abord qu'il y a très peu de différence entre les deux quartiers du centre-ville et entre les deux quartiers de St Barnabé. D'une manière générale, la fréquence maximale est atteinte pour la température de 35° pour le centre-ville, elle est de 35.5° pour le quartier La Rose et de 33°C pour le quartier St Barnabé. Les histogrammes du centre-ville sont beaucoup plus effilés que ceux des deux autres quartiers, ce qui signifie que la température est plus homogène à l'intérieur des imagettes étudiés. Pour le quartier St Barnabé, les fréquences augmentent assez vite pour marquer ensuite un palier entre 32 et 35° puis diminuent. Pour le quartier La Rose, on observe une variabilité plus importante des températures avec des températures maximales plus élevées par rapport aux deux autres quartiers. Les valeurs sont beaucoup plus dispersées pour ce quartier ce qui montre la diversité des surfaces qui le composent.

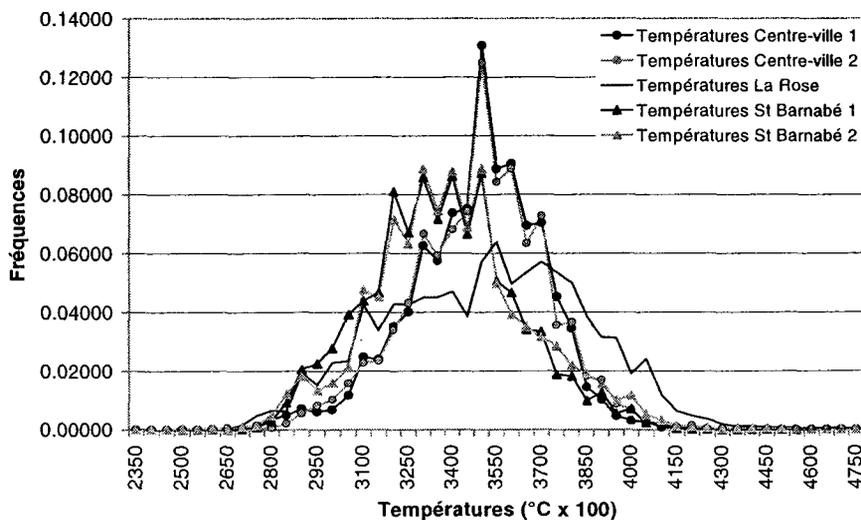


Figure 5-13: Fréquences des températures de brillance des six imagettes.

Afin de vérifier ces différences entre les trois quartiers, les profils de température le long des vols sont analysés. La moyenne, l'écart type, la température minimale et maximale ont été calculés pour chaque imagerie pour construire ces profils. Un seul vol est analysé pour le quartier St Barnabé car les deux vols ont été réalisés dans des directions presque identiques et leurs résultats sont très proches. Le trajet de chaque vol a également été superposé à la classification en 9 classes du tissu urbain de Marseille afin d'établir des relations entre la variation spatiale des températures et celle des différents quartiers où ont été effectuées les mesures.

Le vol 1 a été effectué au-dessus du centre-ville du sud-est vers le nord-ouest (figure 5-14). Le profil de température moyenne est stable sur toute la première partie du vol. Les mesures sont d'abord effectuées au-dessus du centre-ville (A-classe en rouge) où les températures moyennes sont de 35° environ. Cette zone apparaît très homogène car l'écart type mesuré dans chaque imagerie est faible (<3°). La structure de ce quartier est très régulière avec une densité bâtie élevée ; les MOS varient très peu durant toute cette première partie du vol. Sur la fin du vol, les températures fluctuent de quelques degrés en moyenne. La première baisse des températures correspond au passage du Vieux Port (B - classe en bleu et en vert). L'écart type dans chaque imagerie est alors très élevé car les mesures portent à la fois sur des surfaces artificielles et naturelles. Les températures moyennes ré-augmentent lorsque les mesures sont réalisées sur la rive nord du Vieux Port (classe en rose) puis chutent lorsque l'avion survole la mer (C- classe en bleu). Les écarts types sont élevés lorsque les mesures sont effectuées à la fois sur les espaces bâtis et sur la mer puis diminuent sur la mer où la surface redevient homogène.

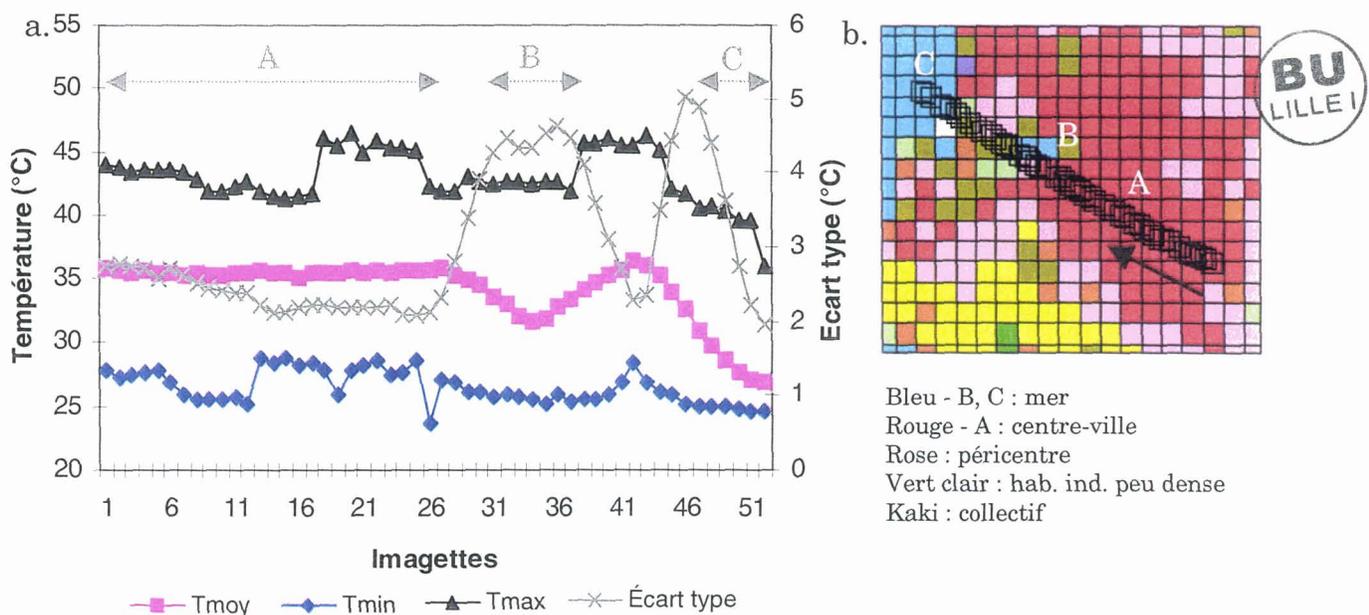


Figure 5-14: Profils des températures moyennes, minimales, maximales et des écarts types (a) lors du vol sur le centre-ville 1 (b) (la flèche sur la carte indique le sens du vol, en couleurs, la classification en 9 classes du tissu urbain)

Le vol 2 a également été effectué sur le centre-ville, du sud-ouest vers le nord-est (figure 5-15). On note tout d'abord que la température moyenne est de 35° environ sur le centre-ville (A - classe en rouge) c'est-à-dire à la même température que pour le vol 1. Le changement de direction entre les deux vols ne semble pas provoquer de différence de températures entre les deux vols, en moyenne. L'écart type mesuré dans chaque imagerie est également faible et stable pendant cette première partie du vol ; on note sur les premières imageries, un écart type plus élevé qui correspond au passage entre une zone mixte composée de végétation et d'habitation (au pied de Notre Dame de la Garde) et le centre-ville proprement dit. Sur la fin du vol, l'écart type et les températures maximales augmentent tandis que la température moyenne chute. Ces observations correspondent au péricentre (B - classe en rose), puis à une zone où se mêlent habitations et végétation (C - classes en kaki et vert clair). Le vol se termine sur le quartier St Barnabé, composé d'habitat individuel dense et de jardins (D - classe en jaune). Dans le péricentre, la structure urbaine est moins homogène qu'en centre-ville : la densité bâtie est plus faible, des façades peuvent donc être prises en compte dans les mesures, ce qui expliquerait l'augmentation des températures maximales. Les MOS sont également plus diversifiés dans ce type de quartier avec des zones de végétation de plus en plus importantes au fur et à mesure que l'avion se dirige vers le quartier St Barnabé. Enfin, on note que les températures minimales sont assez stationnaires malgré une baisse enregistrée au milieu du vol qui correspond peut-être au passage près de l'hôpital de la Conception qui est devancé d'un parc.

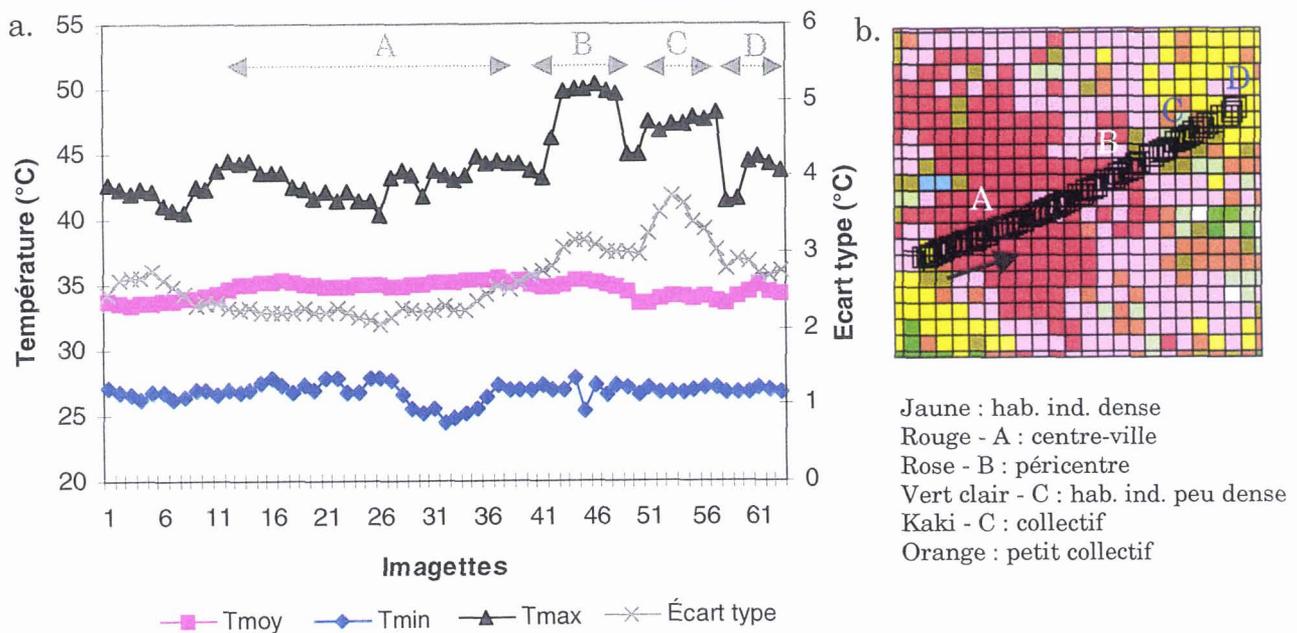


Figure 5-15: Profils des températures moyennes, minimales, maximales et des écarts types (a) lors du vol sur le centre-ville 2 (b) (la flèche sur la carte indique le sens du vol, en couleurs, la classification en 9 classes du tissu urbain)

Un troisième vol a été effectué du sud du quartier St Barnabé vers le centre-ville. Les températures moyennes sont assez stables pendant toute la durée du vol ; elles sont toutefois plus faibles sur le début du parcours où l'avion survole un quartier d'habitat individuel peu dense où la végétation est assez présente (A - classe en vert clair). Les valeurs de l'écart type sont beaucoup plus variables avec deux augmentations importantes : la première (B) correspond au survol d'une zone de travaux (construction d'une rocade) où les MOS sont très variables (terres, béton, végétation, habitation, ...) et la deuxième (C) à des quartiers où la densité bâtie est assez faible. On a donc une variabilité importante des MOS (végétation, surfaces imperméables). La température moyenne augmente légèrement sur la fin du vol lorsque l'avion survole le péricentre et le centre-ville (D - classes en rose et rouge). Les températures maximales sont plus importantes car on retrouve des grands bâtiments dans le péricentre puis diminuent ainsi que l'écart type lorsque les mesures se terminent sur le centre-ville, zone plus homogène du point de vue de la morphologie et des MOS.

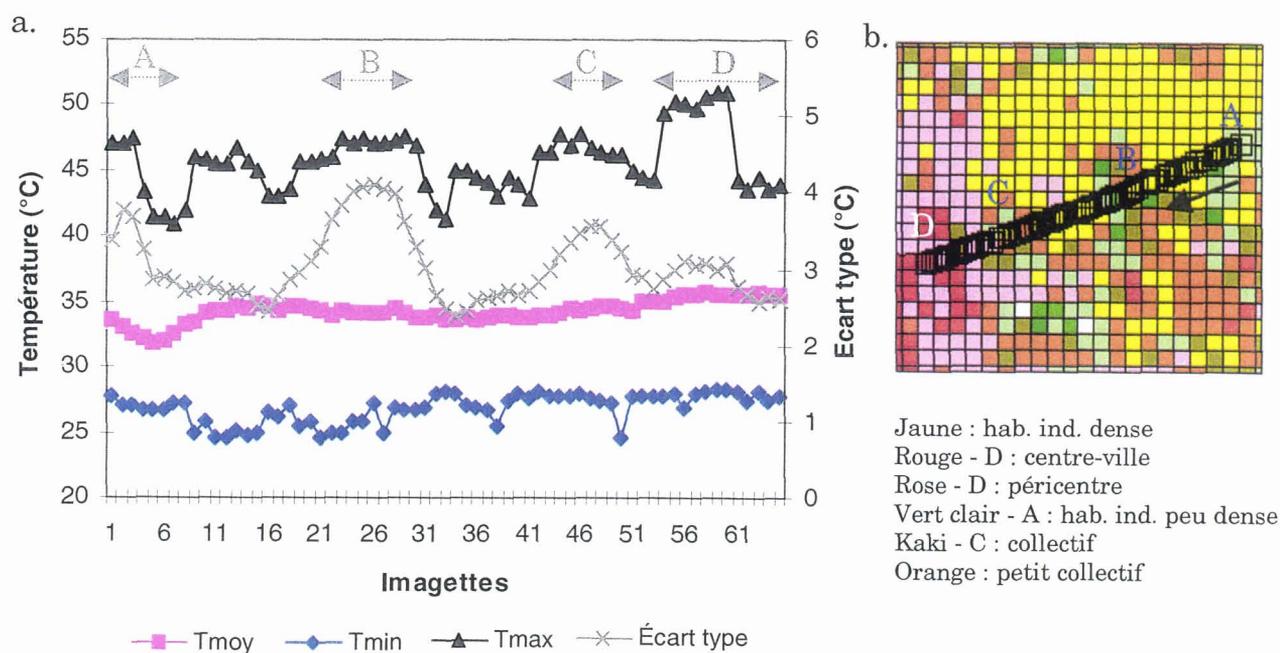


Figure 5-16: Profils des températures moyennes, minimales, maximales et des écarts types (a) lors du vol sur le quartier St Barnabé (b) (la flèche sur la carte indique le sens du vol, en couleurs, la classification en 9 classes du tissu urbain)

Enfin, le dernier vol a été réalisé sur le quartier La Rose, au sud du quartier St Jérôme, étudié au paragraphe 4.2.2. Le vol a été effectué du sud vers le nord. Il débute à l'extrémité nord du quartier St Barnabé et se termine sur une zone où la surface de végétation est plus importante que l'habitat (A - classes en vert clair et

foncé) La température moyenne varie de 32°C à 35°C sur l'ensemble du vol. Elle augmente légèrement vers le milieu du parcours lorsque l'avion survole la zone d'habitat collectif (classe en kaki) où les températures maximales et minimales sont élevées. Cette zone correspond à des immeubles de grande taille, les surfaces des façades sont donc importantes car la densité bâtie est faible. Ils sont entourés de parkings, de zones d'herbe desséchée ou de sol nu. Comparé aux autres quartiers, l'écart type est élevé sur l'ensemble du vol et atteint 4° lorsque les mesures sont réalisées au-dessus d'une zone de Petit Collectif (B - classe en orange). Ce type de quartier apparaît le plus hétérogène d'un point de vue des MOS et de la morphologie des bâtiments.

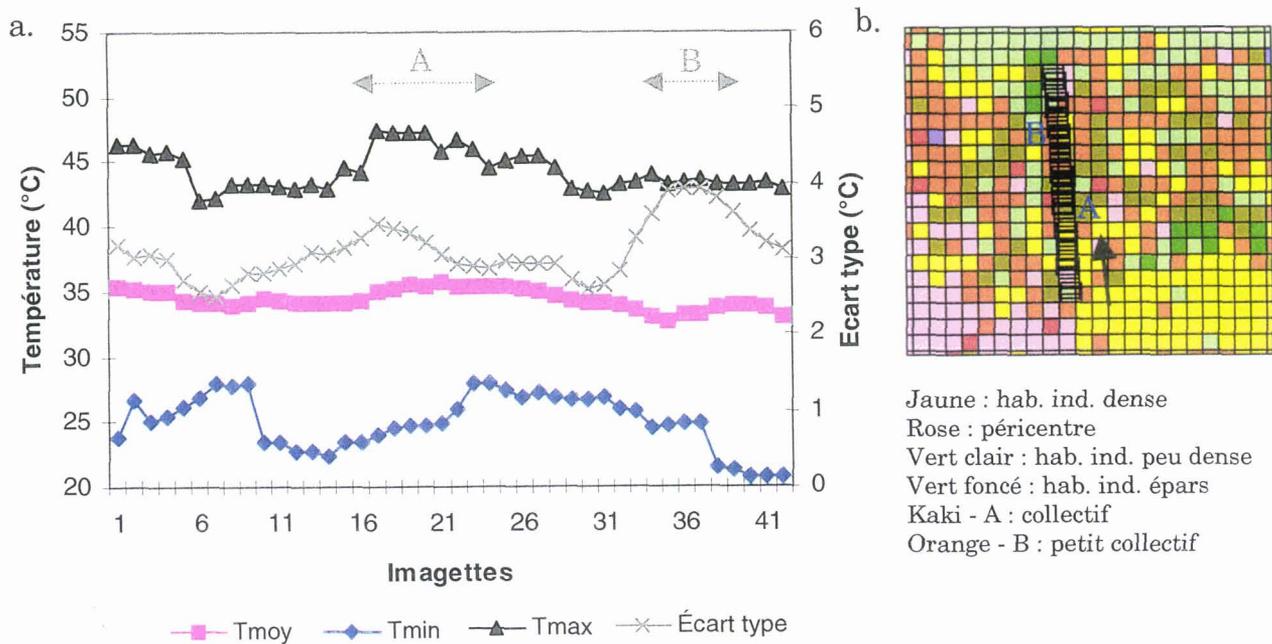


Figure 5-17: Profils des températures moyennes, minimales, maximales et des écarts types (a) lors du vol sur le quartier La Rose (b) (la flèche sur la carte indique le sens du vol, en couleurs, la classification en 9 classes du tissu urbain)

5.2.3 Conclusion partielle

Les profils de températures permettent de mettre en évidence de manière contrastée la variabilité radiative du tissu urbain de Marseille et surtout son hétérogénéité. Les températures moyennes varient de quelques degrés d'un quartier à un autre. Ce sont surtout les valeurs de l'écart type qui permettent de mettre en évidence la structure homogène ou non d'un quartier. En centre-ville, les températures mesurées sont relativement homogènes. En revanche, dans les quartiers d'habitat individuel, les MOS sont beaucoup plus diversifiés ce qui entraîne

un écart type plus élevé. On note également que les températures maximales sont les plus élevées sur les quartiers d'habitat collectif.

Enfin, en centre-ville, les températures moyennes sont très proches entre les deux vols ; le changement de direction ne semble pas provoquer, en moyenne, des variations importantes de température sur ce quartier. La densité bâtie est trop importante pour que les surfaces à l'ombre, lorsque les mesures sont effectuées face au soleil ou ensoleillées, lorsque le soleil est derrière l'avion, aient vraiment un impact sur les moyennes des températures de brillance. Ces effets directionnels doivent avoir plus d'importance lorsqu'on étudie chaque imagette dans le détail. En effet, Voogt & Oke, (1998) montrent à partir de mesures de température de surface effectuée par hélicoptère au-dessus de trois types de quartiers, un effet directionnel important qui introduit un biais dans les mesures de température de surface.

5.3 Conclusion

Les relations entre les caractéristiques physiques de chaque quartier et les paramètres climatiques sont délicates à mettre en évidence sur Marseille, qui semble être un cas particulier du fait de sa situation en bord de mer qui influence les conditions météorologiques au-dessus de la zone d'étude. Pendant la durée de la campagne CLU-ESCOMPTE, un système de brise a dominé, caractérisé par un changement de direction du vent entre le jour et la nuit. Un faible îlot de chaleur urbain a pu être mis en évidence pendant la nuit et semble se former quelques soient les conditions météorologiques (mistral, vent de sud-est). Cependant, à travers l'analyse du régime des températures, on a pu observer une évolution diurne différente selon les points de mesure : l'amplitude du cycle diurne thermique est plus importante en banlieue qu'en centre-ville, les températures sont les plus basses sur la côte, ...

L'influence de la ville sur l'humidité est également difficile à analyser à cause de la proximité de la mer : plus on est proche de la mer, plus l'humidité est importante, évidemment. Il semble cependant qu'un îlot d'humidité se forme la nuit sur le centre-ville mais les différences entre les valeurs observées sont assez faibles.

Toutefois, d'après les résultats des régressions linéaires multiples, il semblerait que certains capteurs aient été plutôt sous l'influence de la mer, d'autres sous l'influence de la ville et enfin d'autres sous l'influence des deux. La part d'information non-expliquée par ces modèles n'est cependant pas négligeable ce qui laisse supposer que d'autres paramètres peuvent intervenir.

Face à ces résultats, des données de températures de brillance ont été analysées. Elles présentent l'avantage de couvrir des surfaces assez importantes et sur un parcours traversant différents quartiers de Marseille. On a ainsi pu mettre en évidence des fluctuations de températures selon les quartiers correspondant à la combinaison des surfaces qui les composent. L'écart type surtout montre la variabilité spatiale de certains quartiers. Les quartiers seraient ainsi pratiquement mieux définis et distincts les uns des autres, par la valeur de l'écart type calculée.

Cette dernière étude permet de confirmer la représentativité micro-climatologique de la classification du tissu urbain de Marseille réalisée à partir de la morphologie des bâtiments et des MOS puisqu'il s'avère que les températures de brillance observées reflètent l'hétérogénéité spatiale de la ville.

Conclusion et perspectives

L'objectif de ce travail de thèse était le développement d'une méthodologie permettant d'analyser le tissu urbain dans la perspective de simulation numérique de la météorologie et de la climatologie urbaine. La ville est en effet un espace complexe qui est souvent représentée dans les modèles atmosphériques par des valeurs moyennées pour l'ensemble de la ville. Avec l'évolution et l'amélioration des modèles, la résolution spatiale des simulations numériques est de plus en plus fine, c'est pourquoi la ville doit dorénavant être représentée par l'assemblage de divers quartiers avec leurs caractéristiques spécifiques. La méthodologie développée devait permettre non seulement de choisir la base de données la plus adaptée et de préciser les méthodes de calcul des variables à travers le développement du logiciel DFMap mais aussi de définir une méthode délimitant des zones homogènes, distinctes entre elles, qui pourront avoir des influences différentes sur le climat urbain.

La BDTopo est la base de données qui a été utilisée pour définir la morphologie des bâtiments, les MOS et des paramètres aérodynamiques. Le logiciel DFMap a été développé et validé afin de transposer les informations contenues dans la BDTopo sur une grille, format plus accessible que le format vectoriel de la BDTopo. Les méthodes de calcul des différentes variables ont été validées, ce qui a permis de travailler à partir d'une nouvelle base de données dont la qualité a également été évaluée. Chaque variable a été intégrée sur une maille de 200 m * 200m ; cette taille a été jugée la plus appropriée pour décrire les différentes structures urbaines qui constituent une ville. Ce choix est validé pour Marseille avec la fin de cette étude car aucun problème qui aurait pu le remettre en cause n'a été mis à jour lors de l'analyse des résultats. Afin d'améliorer la qualité des calculs des différentes variables, il serait intéressant à terme de minimiser l'influence du maillage en réalisant dans un premier temps un découpage du tissu urbain en zones homogènes regroupant des ensembles de mailles contiguës, puis dans un second temps en refaisant les calculs à l'échelle de chaque zone. Ceci permettrait d'une certaine manière de limiter le découpage arbitraire des bâtiments et donc d'obtenir des résultats plus proches de la réalité.

L'analyse du tissu urbain de Marseille à partir de la cartographie des différentes variables a mis en évidence des structures urbaines différentes. Les quartiers typiques des villes européennes sont identifiables. Une méthode de classification automatique a alors été utilisée pour différencier ces différents quartiers, la méthode des nuées dynamiques. Elle a d'abord été appliquée à la zone de Marseille puis l'étude a été focalisée sur le tissu urbain seulement. Plusieurs classifications ont ainsi été proposées, de plus en plus détaillées au fur et à mesure que le nombre de classes augmentait. Le tissu urbain est divisé en 6 puis 9 classes correspondant chacune à un quartier. Ces quartiers sont définis par la morphologie des bâtiments, leur répartition dans l'espace et les MOS. La méthode a également été appliquée à la ville de Nantes : les quartiers typiques des villes européennes sont également bien mis en évidence par la méthode des nuées dynamiques. Plusieurs classifications ont été calculées permettant d'affiner la description du tissu urbain. On remarque par ailleurs que chaque quartier possède ses caractéristiques propres mais qu'elles ne sont pas forcément identiques d'une ville à l'autre. Par exemple, les centre-villes de Nantes et de Marseille ne sont pas définis en moyenne par la même hauteur de bâtiments, la même densité de végétation, ... Les résultats obtenus permettent de valider l'utilisation de la méthode des nuées dynamiques pour définir des classes correspondant chacune à un type de quartier ou à un MOS naturel. La méthode des nuées dynamiques appartient à la statistique non paramétrique. Cette méthode fait encore l'objet de nombreux tests afin d'analyser ses performances et ses défauts. Elle est ainsi souvent utilisée dans des études comparatives ou pour des applications où le résultat est plus ou moins connu à l'avance. Comme pour cette thèse, le découpage en quartier du tissu urbain peut être « deviné » à partir d'une carte IGN avant d'utiliser la méthode des nuées dynamiques ce qui permet de valider le choix de la méthode après analyse des résultats. Le seul défaut des nuées dynamiques, c'est qu'aucune méthode n'est réellement reconnue et statistiquement justifiable pour définir le nombre optimal de classes.

La deuxième partie de la validation des classifications a porté sur les caractéristiques de chaque classe. La BDTopo ne permet pas d'avoir une information sur la nature des sols sur 100 % du territoire ; certaines surfaces ne sont pas définies ce qui pose problème lors de l'utilisation de ces résultats dans les modèles de simulation des échanges d'énergie sol – atmosphère. Grâce à des photos aériennes, chaque MOS a été identifié et des corrections, adaptées à chaque type de quartier, ont été apportées. Ce sont les surfaces imperméables et les surfaces de végétation qui sont les plus sous-estimées par la BDTopo. De nouveaux MOS ont également été proposés afin de représenter le plus fidèlement possible la réalité. Suite à ces corrections, chaque quartier urbain est défini par une couverture du sol

à 100 %. Enfin, une longueur de rugosité moyenne a été attribuée à chaque quartier permettant ainsi de définir les quartiers d'un point de vue aérodynamique. Les modèles de Bottema, Raupach et Macdonald sont utilisés. Une comparaison des résultats obtenus avec les trois modèles pour deux directions de vent dans chaque quartier montre que le modèle de Raupach est celui qui donne les meilleurs résultats sur Marseille. Chaque quartier devient ainsi un quartier aérodynamique mais seules des simulations numériques reprenant les caractéristiques de chaque quartier permettront de valider le nombre de quartiers ayant réellement une influence différente sur les conditions météorologiques urbaines.

Une première application climatologique a été réalisée à partir des mesures de température et d'humidité effectuées pendant la campagne CLU-ESCOMPTE. L'objectif était d'établir un lien entre les quartiers préalablement définis et la variabilité spatiale de ces paramètres météorologiques. L'îlot de chaleur urbain est identifié sur le centre-ville, de nuit, mais il est d'une faible intensité, certainement à cause de la proximité de la mer. Un régime de brise a dominé pendant presque toute la campagne CLU-ESCOMPTE : une brise de mer s'installait le jour, remplacée par une brise de terre la nuit. Marseille est apparue comme une ville où les conditions météorologiques sont très liées à la proximité de la mer Méditerranée. L'analyse de régressions linéaires multiples a permis, quoique difficilement, de séparer l'influence de la mer et celle des quartiers de la ville sur les champs de température et d'humidité. Il se peut également que les capteurs, positionnés à 6 m du sol, soient encore sous l'influence de leur environnement immédiat (façade d'un bâtiment, arbre, ...) et ne permettent donc pas bien d'identifier l'influence de la ville dans son ensemble sur les champs de température et d'humidité. C'est pourquoi l'analyse a été poursuivie avec des mesures de température de brillance qui n'est pas influencée par la proximité de la mer. Différents profils de température ont été tracés, qui mettent en évidence la variation des températures de brillance d'un quartier à l'autre. La valeur de l'écart type calculée pour chaque imagerie est particulièrement intéressante car elle met en évidence le niveau d'hétérogénéité des surfaces d'un quartier. Cette diversité des surfaces peut être un élément caractéristique et discriminant du quartier. La relation entre la classification en 9 classes du tissu urbain et les variations de température de brillance est ainsi établie montrant que chaque quartier survolé peut être caractérisé par une température de brillance moyenne mais surtout par une valeur de l'écart type de la température de brillance.

Marseille n'était peut-être pas la ville idéale pour étudier les relations entre la morphologie urbaine et le climat à cause de la proximité de la mer et de la complexité de la topographie dans et autour de la ville. La météorologie de la

canopée urbaine est très complexe ce qui ne facilite pas la compréhension des différents facteurs et processus climatologiques. Cependant, l'utilisation d'images satellites pourrait permettre d'améliorer la connaissance à haute résolution du milieu urbain dans le domaine de l'infrarouge mais également celui du visible.

La BDTopo est produite à partir de photos aériennes traditionnelles mais l'utilisation d'images numériques (caméras ou satellites) devrait améliorer la restitution du bâti d'une part, et la modélisation en trois dimensions des éléments urbains d'autre part, rendant ainsi la base de données plus précise et plus facile à actualiser. Cette évolution des bases de données sous-entend également une évolution des outils qui permettent de les traiter. En effet, le logiciel DFMap est adapté à la BDTopo uniquement : il ne peut être utilisé que pour des analyses des villes françaises pour lesquelles la BDTopo est disponible, ce qui limite les applications dans le temps et dans l'espace. Reprendre la méthodologie développée dans DFMap et l'utiliser avec des images satellites comme sources d'informations permettrait d'étendre le champ d'application en dehors de la France. De plus, les images satellites atteignent aujourd'hui une très haute résolution comme les images du satellite IKONOS. Leur utilisation permettra d'analyser avec une extrême précision les MOS. A partir d'images stéréoscopiques de SPOT 5, la morphologie des bâtiments pourra également être calculée. Dans cette perspective, il est nécessaire de réfléchir dès maintenant à la « reconversion » de DFMap dont seule la méthodologie de calcul pourra probablement être conservée.

Les données de température de brillance utilisées dans cette étude ne couvrent qu'une faible surface de Marseille, l'étude est ainsi limitée à quelques quartiers très spécifiques de Marseille. Mais des images satellites NOAA-AVHRR et ASTER pourraient être utilisées pour poursuivre cette étude. Des images collectées pendant la campagne CLU-ESCOMPTE sont analysées par Bénédicte Dousset au *Hawaii Institute of Geophysics and Planetology*. Les résultats des comparaisons entre les analyses des images NOAA-AVHRR et celles d'images SPOT 4 laissent supposer une bonne relation entre les MOS et les températures de brillance (Dousset & Kermadi, 2003). La classification de Marseille, plus détaillée que l'analyse des images SPOT 4, pourrait ainsi être superposée aux images satellites NOAA-AVHRR, actuellement disponibles, afin d'établir des relations entre les températures de brillance et les quartiers urbains. Les images NOAA-AVHRR ont une résolution de 1.1 km ce qui est suffisant pour distinguer les différents quartiers d'une ville. Les images ASTER ont une résolution de 90 m et doivent permettre de détailler l'information sur l'émissivité en milieu urbain.

Enfin, ce travail ouvre de nombreuses perspectives pour les simulations numériques de la canopée urbaine à partir de la discrétisation du tissu urbain. Est-ce que les caractéristiques morphologiques et aérodynamiques et les MOS des

différents quartiers identifiés à Marseille permettront aux modèles de reproduire correctement les conditions météorologiques observées pendant la campagne CLUESCOMPTE ?

Bibliographie

- AGAM**, 1992, Rapport de présentation Tome II, Étude d'environnement, 108 pages.
- Anderson J.**, E. Hardy, J. Roach, R. Witmer, 1976 A landuse and landcover classification scheme for use with remote sensor data, USGS Paper 964, U.S. Geological Survey.
- Anquetin S.**, J.P. Chollet, A. Coppalle, P. Mestayer, J.F. Sini, 1998, The Urban Atmosphere Model SUBMESO, Contribution to the sub-project SATURN, EUROTRAC Symposium CE98, Garmisch-Partenkirchen, Ed. P.M. Borrel & P. Borrel, WIT Press, Boston, Southampton, proceed. Vol. 2, pp. 750-757.
- Arnfield A.J.** & S. Grimmond, 1998, An urban canyon energy budget model and its application to urban storage heat flux modelling, *Energy and Buildings*, 27, 61-68.
- Arnfield A.J.**, 2003, Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island, *International Journal of Climatology*, 23, 1-26.
- Asaeda T.**, V.T. Ca, A. Wake, 1996, Heat storage of pavement and its affection on the lower atmosphere, *Atmospheric Environment*, 30, 413-427.
- Bastié J.** & B. Dézert, 1991, La ville, Masson, Paris, 415 pages.
- Becker F.** & Li Z-L., 1995, Surface temperature and emissivity at various scales: definition, measurement and related problem, *Remote Sensing Reviews*, 12, 225-253.
- Beguín M.** & D. Pumain, 2000, La représentation des données géographiques – Statistique et cartographie, Ed. Armand Colin, Paris, 192 pages.

- Bonillo** J.L., R. Borruéy, J.M. Chancel, A. Hayot, P. Graff, M. Perloff, C. Peyre, 1988, Atlas des formes urbaines de Marseille - volume 1 : les types, Laboratoire INAMA, École d'architecture de Marseille, 135 pages.
- Bornstein** R. & Q. Lin, 2000, Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: three cases studies, *Atmospheric Environment*, 34, 507-516.
- Bossard** M., J. Feranec, J. Otahel, 2000, CORINE Land Cover technical Guide – Addendum 2000, 33 pages.
- Bottema** M., 1995, Aerodynamic roughness parameters for homogeneous buildings groups – part 1 : Theory, document SUBMESO 18, École Centrale de Nantes, France, 40 pages.
- Boyer** F., A. Orioux, E. Pouget, 1970, Le mistral en Provence occidentale, Monographie n°79 de la météorologie nationale, Centre régional de Marignane, 25 pages.
- Buckley** P. & D. Mookherjee, 1999, Non metric conceptual clustering: a new tool for investigating urban quality of life, *Cybergéo*, 109, 25 p.
- Burian** S.J., M. Brown, S.P. Linger, 2002, Morphological analyses using 3D buildings databases: Los Angeles, California, LA-UR-02-0781, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 73 pages.
- Caniggia** G. & G.L. Maffei, *Composizione architettonica e tipologia edilizia – Lettura dell'edilizia di base*, 1979, Venezia Marsilio Editore, Traduit de l'italien par P. Larochelle (2000), École d'Architecture de Nantes.
- Carrega** P., 1994, Analyse spatiale quantitative et appliquée – Topoclimatologie et habitat, *Revue de Géographie du Laboratoire d'Analyse Spatiale Raoul Blanchard*, 35-36, 408 pages.
- Celeux** G., Diday E., G. Govaert, Y. Lechevallier, H. Ralambondrainy, 1989, Classification automatique des données, Ed. Dunod Informatique, Paris, 285 pages.

- Chaillou F.**, 1996, Classification morphologique sur 3 critères de tissu urbains résidentiels – Extraits du plan référentiel de Nantes, rapport interne, École d'Architecture de Nantes, 30 pages.
- Champy M.**, 2003, Analyse de la variabilité spatio-temporelle de la température et de l'humidité de l'agglomération marseillaise au cours de ESCOMPTE, mémoire de stage, IUT Mesures Physiques de St Nazaire, 31 pages.
- Cianco R.M. & R. Ellefsen**, 1998, High resolution urban morphology data for urban wind flow modelling, *Atmospheric Environment*, 32, 7-17.
- Civerolo K.L., G. Sistla, S.T., Rao, D.J. Nowak**, 2000, The effects of land use in meteorological modeling: implications for assessment of future air quality scenarios, *Atmospheric Environment*, 34, 1615-1621.
- Commission of the European Communities (CEC)**, 1995, CORINE Land Cover technical Guide, Luxembourg, 114 pages.
- Cord M., M. Jordan, J.P. Cocquerez, N. Paparoditis**, 1999, Automatic extraction and modelling of urban buildings from high resolution aerial images, IAPRS, 32, Part 3-2w5, "Automatic of GIS Objects from Digital Imagery", München.
- Cord M., M. Jordan, J.P. Cocquerez**, 2001, Accurate building structure recovery from high resolution aerial imagery, *Computer vision and image understanding*, 82, 138-173.
- Counihan J.**, 1971, Wind tunnel determination of the roughness length as a function of the fetch and the roughness density of three-dimensional roughness elements, in *Atmospheric Environment*, 5, 637-642.
- Diday E., J. Lemaire, J. Pouget, F. Testu**, 1982, Éléments d'analyse de données, Ed. Dunod – Bordas, Paris, 464 pages.
- Dorier-Apprill E.**, 2001, Vocabulaire de la ville, Notions et références, Ed. du Temps, Paris, 191 pages.
- Dousset B.**, 1991, Surface temperature statistics over Los Angeles: the influence of land use, Proceeding of International Geoscience and Remote Sensing Symposim, Espoo, Finlande, II, 367-371.

- Dousset B. & S. Kermadi**, 2003, Remote sensing observations over the Berre-Marseille area, during the UBL/CLU ESCOMPTE experiment, Proceeding of International Conference on Urban Climate, Lodz, Pologne.
- Dupont S.**, 1998, Rapport sur les problèmes du logiciel ASTUCE, Rapport interne, ECN, France, 10 pages.
- Dupont S.**, 2000, Analyse du logiciel ASTUCE, Rapport interne, ECN, France, 5 pages.
- Dupont S.**, 2001, Modélisation dynamique et thermodynamique de la canopée urbaine : réalisation du modèle de sols urbains pour SUMESO, Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes - Université de Nantes, France.
- Dupont S., E. Guilloteau, P. G. Mestayer**: 2000, Energy balance and surface temperatures of urban quarters, Third Symposium of the Urban Environment, Davis, California, 14-18 August 2000, Proceed. AMS, 149-150.
- Eliasson I.**, 1990-1991, Urban geometry, surface temperature and air temperature, *Energy and Buildings*, 15-16, 141-145.
- Eliasson I.**, 1994a, Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use, *Atmospheric Environment*, 30, 379-392.
- Eliasson I.**, 1994b, Urban-suburban-rural air temperature differences related to street geometry, *Physical Geography*, 15, 1-22.
- Eliasson I.**, 1996, Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use, *Atmospheric Environment*, 30, 379-392.
- Escourrou G.**, 1991, Le climat et la ville, Nathan, Paris, 191 pages.
- Fabriès-Verfaillie M. & S. Stragiotti**, 2000, La France des villes, Coll Bréal, 336 pages.
- François N., P. Frankhauser, D. Pumain**, 1995, Villes, densité et fractalité, in Densité et Espacement, *Les annales de la recherche urbaine*, 67, 55-64.

- Godard A. & M. Tabeaud**, 1996, Les climats – Mécanismes et répartitions, Armand Collin, Paris, 191 pages.
- Gong X. & M.B. Richman**, 1995, On the application of cluster analysis to growing season precipitation data in north america east of the Rockies, *Journal of climate*, 8, 897-931.
- Grimmond S. & T.R. Oke**, 2002, Turbulent heat fluxes in urban areas: observation and a Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme (LUMPS), *Journal of Applied Meteorology*, 41, 792-810.
- Grimmond S. & T. Oke**, 1999, Aerodynamic properties of urban area derived from analysis of surface form, *Journal Applied Meteorology*, 38, 1261-1292.
- Groleau D.**, éditeur, 1997, Des densités aux rugosités, caractérisation des tissus urbains pour la modélisation des échanges entre l'atmosphère et la canopée urbaine, Rapport du projet Densité – Rugosité, Programme interdisciplinaire sur la Ville (Pir-Villes), Fédération de Recherche No 73 Physique et Images de la ville, CNRS, 107 pages.
- Groleau D. & P. Woloszyn**, 2000, Traitement des données géométriques pour la simulation des phénomènes physiques des ambiances urbaines, in Données Urbaines, Édition Anthropos, Paris, 387-396.
- IGN**, 1999, Descriptif technique BDTopo, 37 pages.
- Laaribi A.**, 2000, SIG et analyse multicritère, Ed. Hermes, Paris, 190 pages.
- Laborde P.**, 1995, Les espaces urbains dans le monde, Édition Nathan, Paris, 240 pages.
- Lafore J.P.**, J. Stein, N. Asencio, P. Bougeault, V. Ducrocq, J. Duron, C. Fisher, P. Hereil, P. Mascart, J.P. Redelsperger, E. Richard, J. Vila-Guerau de Arellano, 1998, The meso-NH atmospheric simulation system. Part I: Adiabatic formulation and control simulations, *Annales Geophysicae*, 16, 90-109.
- Lagouarde J.P.**, H. Ballans, P. Moreau, D. Guyon, D. Coraboeuf, 2000, Experimental study of brightness surface temperature angular variations of Maritime Pine (*Pinus Pinaster*) stands, *Remote Sensing Environment*, 72, 17-34.

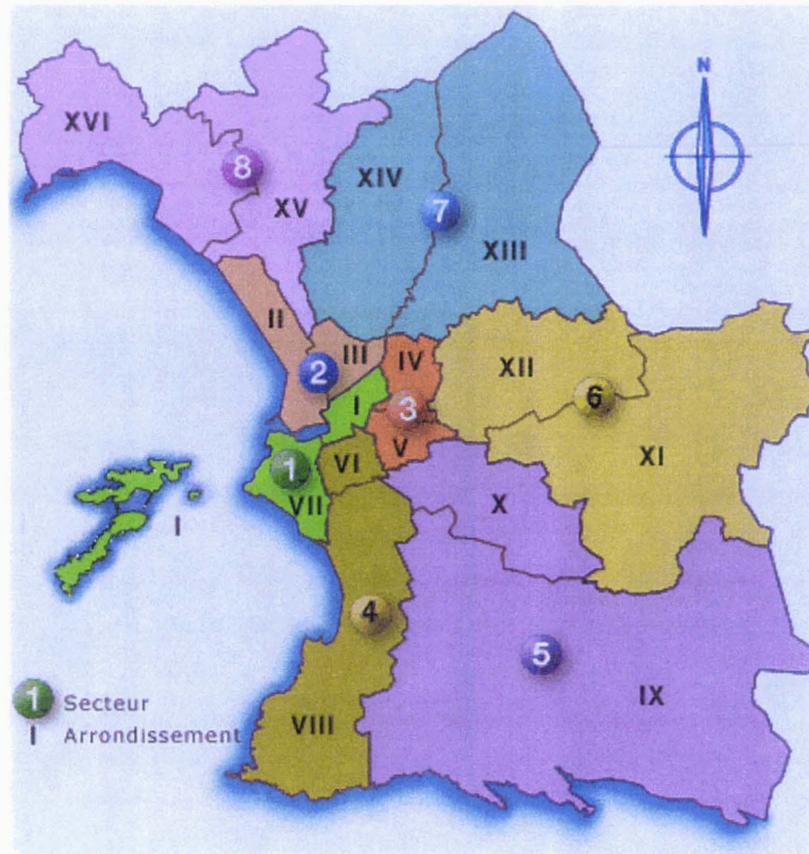
- Lemonsu A., C.S.B. Grimmond, V. Masson, 2003,** Modelling the surface energy balance of an old Mediterranean city core, *Journal of Applied Meteorology*, submitted.
- Lettau H., 1969,** Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element description, *Journal of applied meteorology*, 8, 828-832.
- Loiseau J.M., F. Terrasson, Y. Trochel, 1993,** Le paysage urbain, Ed. Sang de la Terre, Paris, 193 pages.
- Long N., 2002,** Présentation et procédure d'utilisation de DFMap, Rapport interne École Centrale de Nantes, 16 pages.
- Long N. & E. Gabet, 2002a,** Cahier des charges DFMap, Rapport interne SIRIATECH, 8 pages.
- Long N. & E. Gabet, 2002b,** Plan test – DFMap, Rapport interne SIRIATECH, 117 pages.
- Long N., S. Kermadi, C. Kergomard, P.G. Mestayer, A. Trébouet, 2003a,** Urban cover modes and thermodynamic parameters from urban data base and satellite data: comparison for Marseille during ESCOMPTE », 5th International Conference on Urban Climate, Lodz, Pologne.
- Long N., S. Kermadi, J.P. Lagouarde, C. Kergomard, A. Trébouet, 2003b,** Apports des SIG dans l'étude du climat urbain : cas de Marseille pendant la campagne ESCOMPTE (été 2001), Congrès de l'Association Internationale de Climatologie, Varsovie, Pologne.
- Longley P.A. & V. Mesev, 2002,** Measurement of density gradients and space-filling in urban systems, *Regional Science*, 81, 1-28.
- Macdonald R.W., Griffiths R.F., Hall D.J., 1998,** An improved method for estimation of surface roughness of obstacle arrays, *Atmospheric Environment*, 32, 1857-1864.
- Masson V., 2000,** A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, *Boundary Layer Meteorology*, 94, 357-397.

- Mestayer P.G.**, 1998, Urban scale models, in Urban air pollution - European aspects, Kluwer Academic Publishers, the Netherlands, pp 197-222.
- Mestayer P.G. & P. Durand**, The UBL/CLU-Escompte experiment : description and first results, 4th symposium on Urban Climatology, 20-24 May 2002, Norfolk, VA. Proceedings AMS, 19-20.
- Morel B.**, 1999, Marseille, naissance d'une métropole, Ed. l'Harmattan, Paris, 221 pages.
- Oke T.R.**, 1982, The energetic basis of the urban heat island, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 1-24.
- Oke T.R.**, 1987a, The surface energy budgets of urban areas, in Modelling the urban boundary layer, AMS, 1-52.
- Oke TR.**, 1987b, Boundary layer climates, 2nd edition, Edition Methuen, London, 435 pages.
- Oke T.R., R.A. Spronken-Smith, E. Jáuregui, C.S.B. Grimmond**, 1999, The energy balance of central Mexico city during the dry season, *Atmospheric Environment*, 33, 3919-3930.
- Panerai P., M. Demorgon, J.C. Depaule**, 1999, Analyse urbaine, Ed. Parenthèse, Gémenos - Marseille, 189 pages.
- Pauleit S. & F. Duhme**, 2000, Assessing the environmental performance of land cover types for urban planning, *Landscape and Urban Planning*, 52, 1-20.
- Paulet J.P.**, 2000, Géographie urbaine, Armand Colin, Paris, 315 pages.
- Pielke R.A., W. Cotton, R.L. Walko, C.J. Tremback, W.A. Lyons, D.L. Grasso, M.E. Nichols, M.D. Moran, D.A. Wesley, T.J. Lee, J.H. Copeland**, 1992, A comprehensive meteorological modelling system – RAMS, *Meteorological Atmospheric Physics*, 49, 69-91.
- Pinho O.S. & M.D. Manso Orgaz**, 2000, The urban heat island in a small city in coastal Portugal, *International Journal of Biometeorology*, 44, 198-203.

- Ramos M.C.**, 2001, Divisive and hierarchical clustering techniques to analyse variability of rainfall distribution patterns in a Mediterranean region, *Atmospheric Research*, 57, 123-138.
- Ratti C.F.**, S. Di Sabatino, F. Caton, R.E. Britter, 2000, Morphological parameters for urban dispersion models, 3rd AMS Urban Environmental Symposium, Davis, CA.
- Raupach M.R.**, 1994, Simplified expressions for vegetation roughness length and zero-plane displacement, *Boundary Layer Meteorology*, 71, 211-216.
- Raupach M.R.**, 1995, Corrigenda, *Boundary-Layer Meteorology*, 76, 303-304.
- Robin M.**, 1995, La télédétection, édition Nathan, Paris, 318 pages.
- Roncayolo M.**, 2001, La ville et ses territoires, Ed. Folio essais, Paris, 285 pages.
- Sakakibara Y.**, 1996, A numerical study of the effect of urban geometry upon the surface energy budget, *Atmospheric Environment*, 30, 487-496.
- Sanders L.**, 1990, L'analyse des données appliquée à la géographie, GIP Reclus, Montpellier, 267 pages.
- Stull R. B.**, 1988, An introduction to boundary layer meteorology, Kluwer Academic Publishers, the Netherlands, 666 pages.
- Taha H.**, 1997, Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat, *Energy and Buildings*, 25, 99-103.
- Theurer W.**, 1999, Typical building arrangements for urban air pollution modelling, *Atmospheric Environment*, 33, 4057-4066.
- Tomassone R.**, M. Danzart, J.J. Daudin, J.P. Masson, 1988, Discrimination et classement, Ed. Masson, Paris, 172 pages.
- Viaut A.**, 1956, La météorologie du navigant, Ed. Blondel la Rougery, Paris, 284 pages.

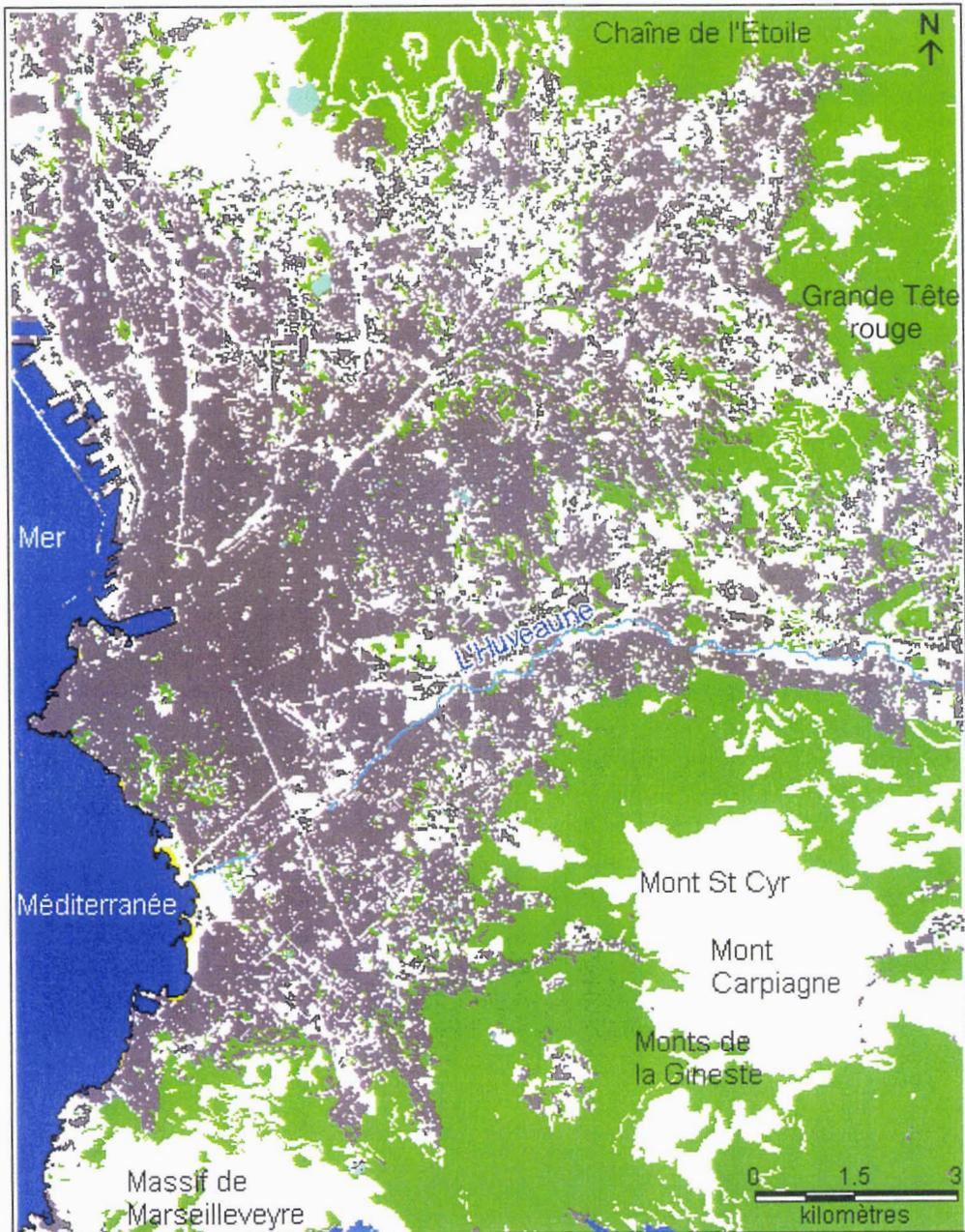
- Vinson S. & L.D. Cohen**, 2002, Extraction des bâtiments complexes à partir d'images aériennes et de MNE, Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle, Angers.
- Voogt J.A. & T.R. Oke**, 1998, Effects of urban surface geometry on remotely-sensed surface temperature, *International Journal of Remote Sensing*, 19, 895-920.
- Yu T. & L.W. Chang**, 2001, Delineation of air quality basins utilizing multivariate statistical methods in Taiwan, *Atmospheric Environment*, 35, 3155-3166.
- Wackermann G.**, 2000, Géographie urbaine, Ed. Ellipses, Paris, 239 pages.
- Weber C.**, 2001, Formes urbaines et répartition des polluants, colloque V^e rencontre de Théo Quant, 14 pages.

Cartes



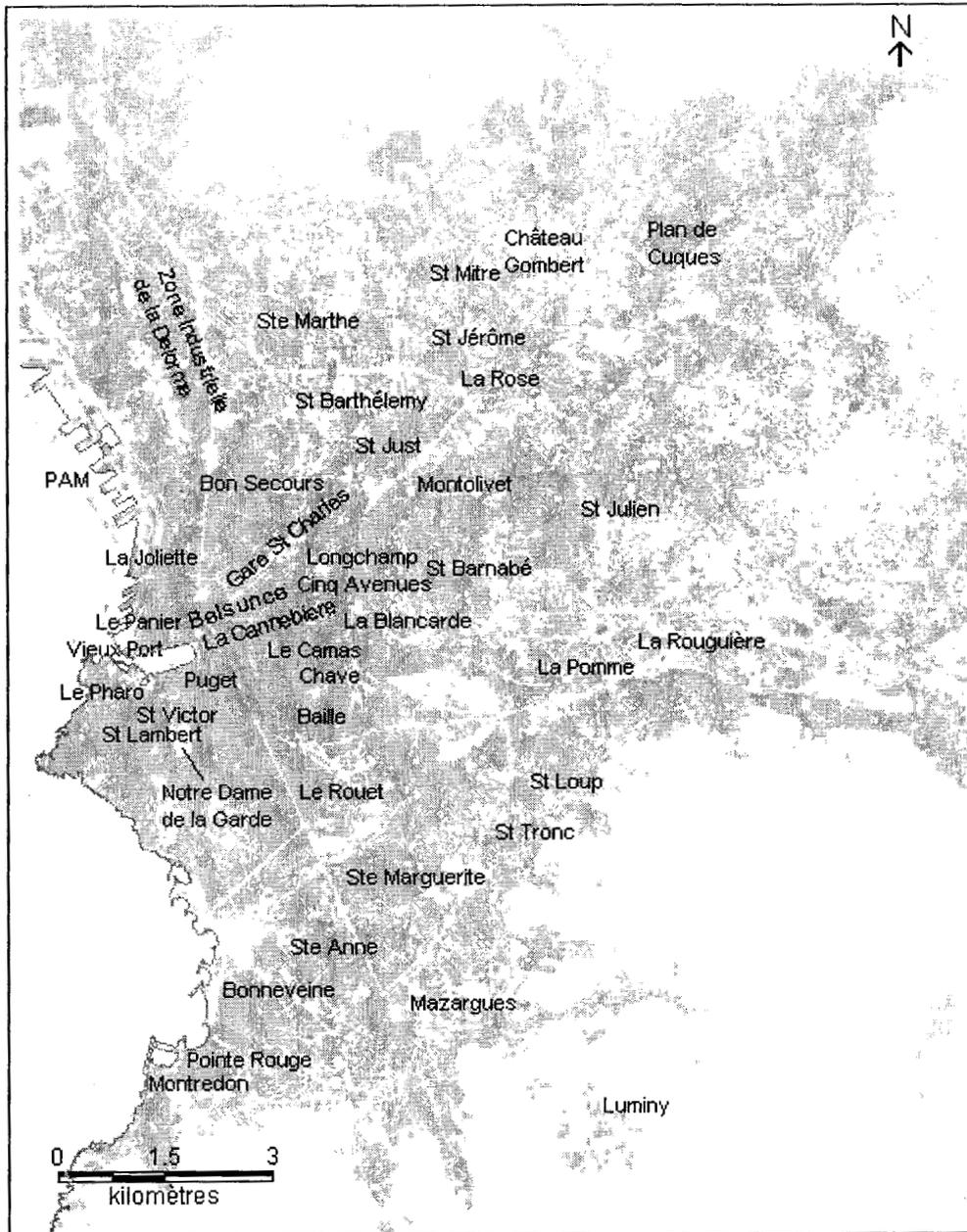
Source : Site Internet de la mairie de Marseille

Carte 1-1 : Arrondissements de Marseille (en chiffre romain)

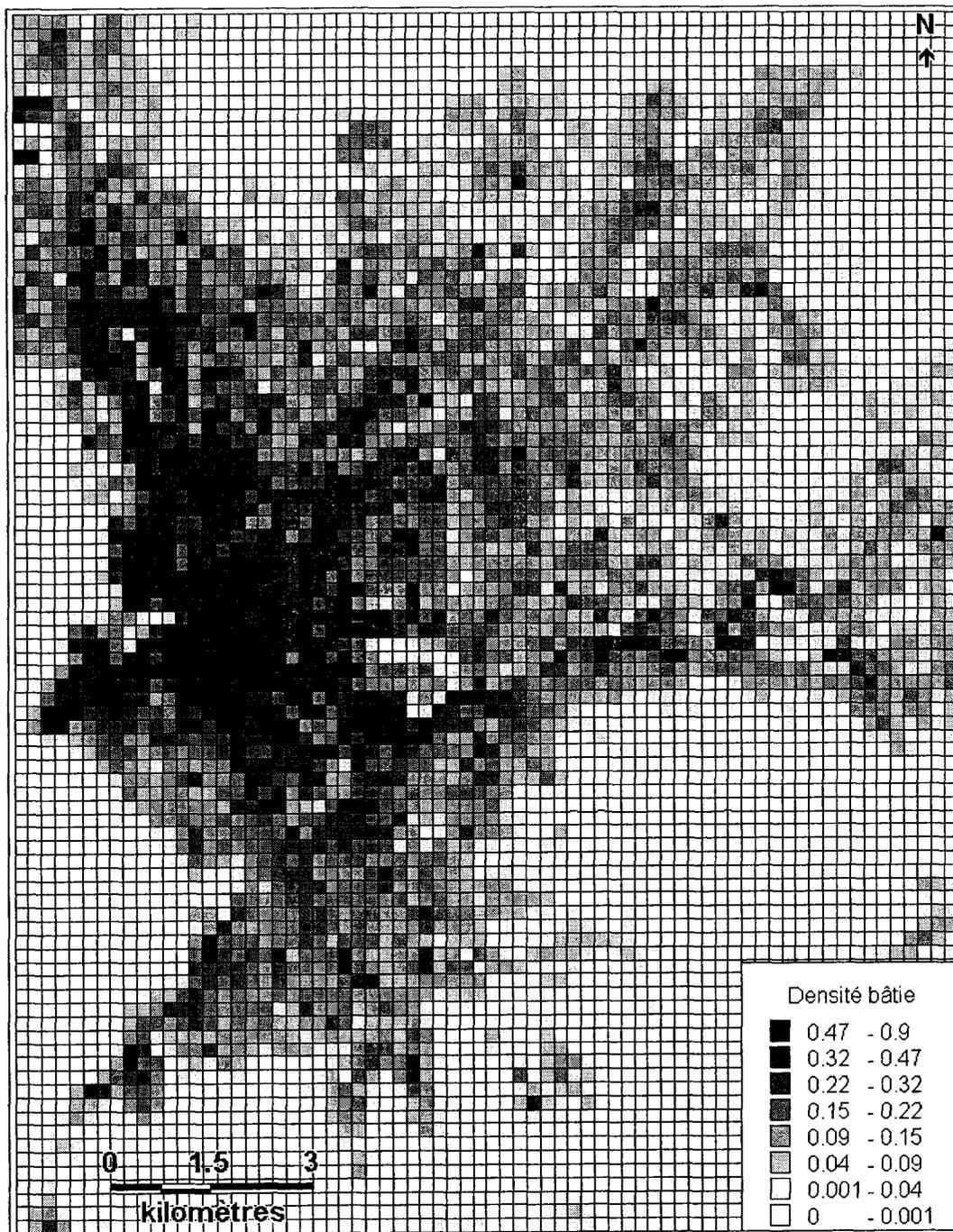


- zone de végétation
- zone bâtie
- cours d'eau
- surface d'eau
- surface de sable
- surface sans information dans la BDTopo

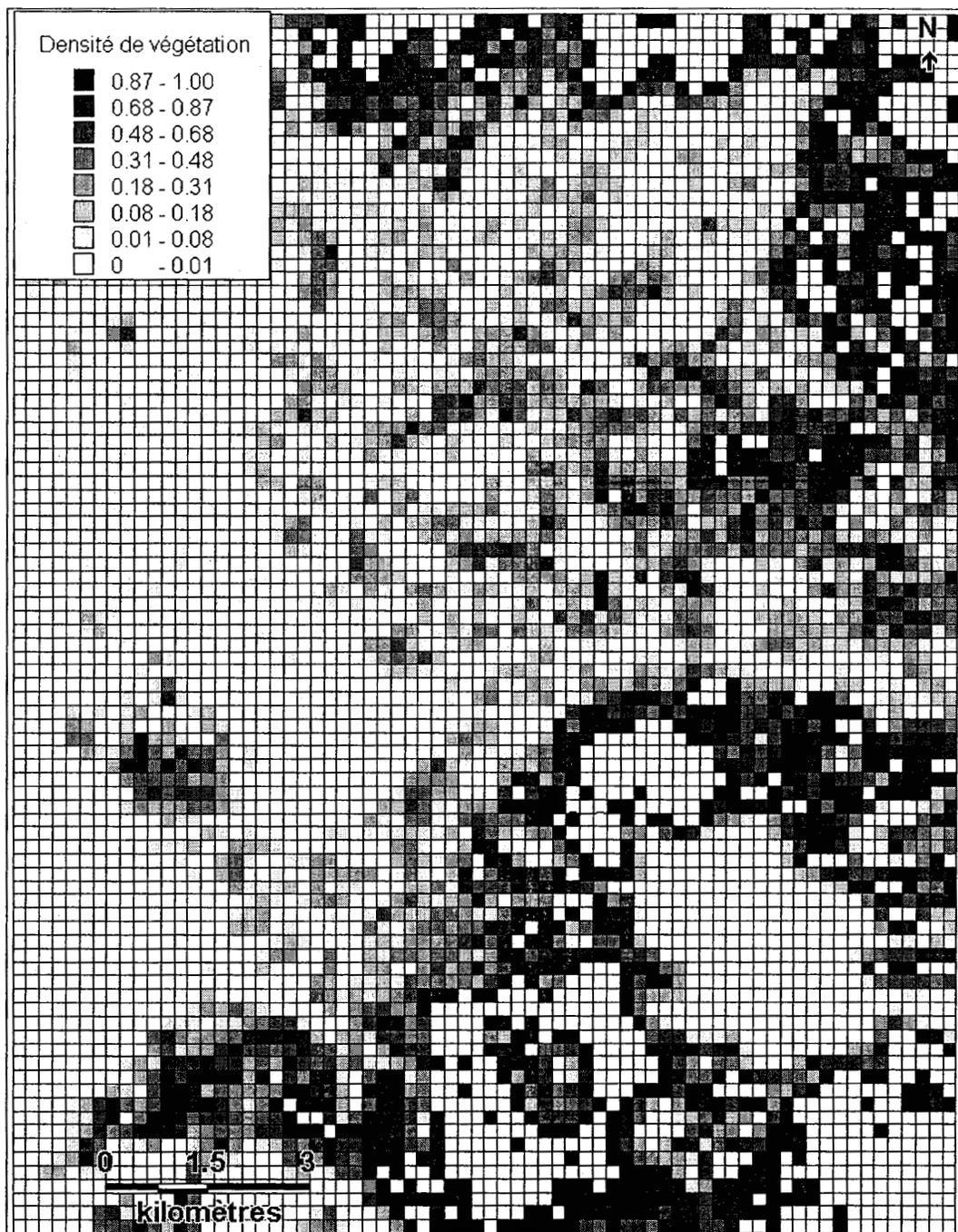
Carte 1-2 : Présentation de Marseille



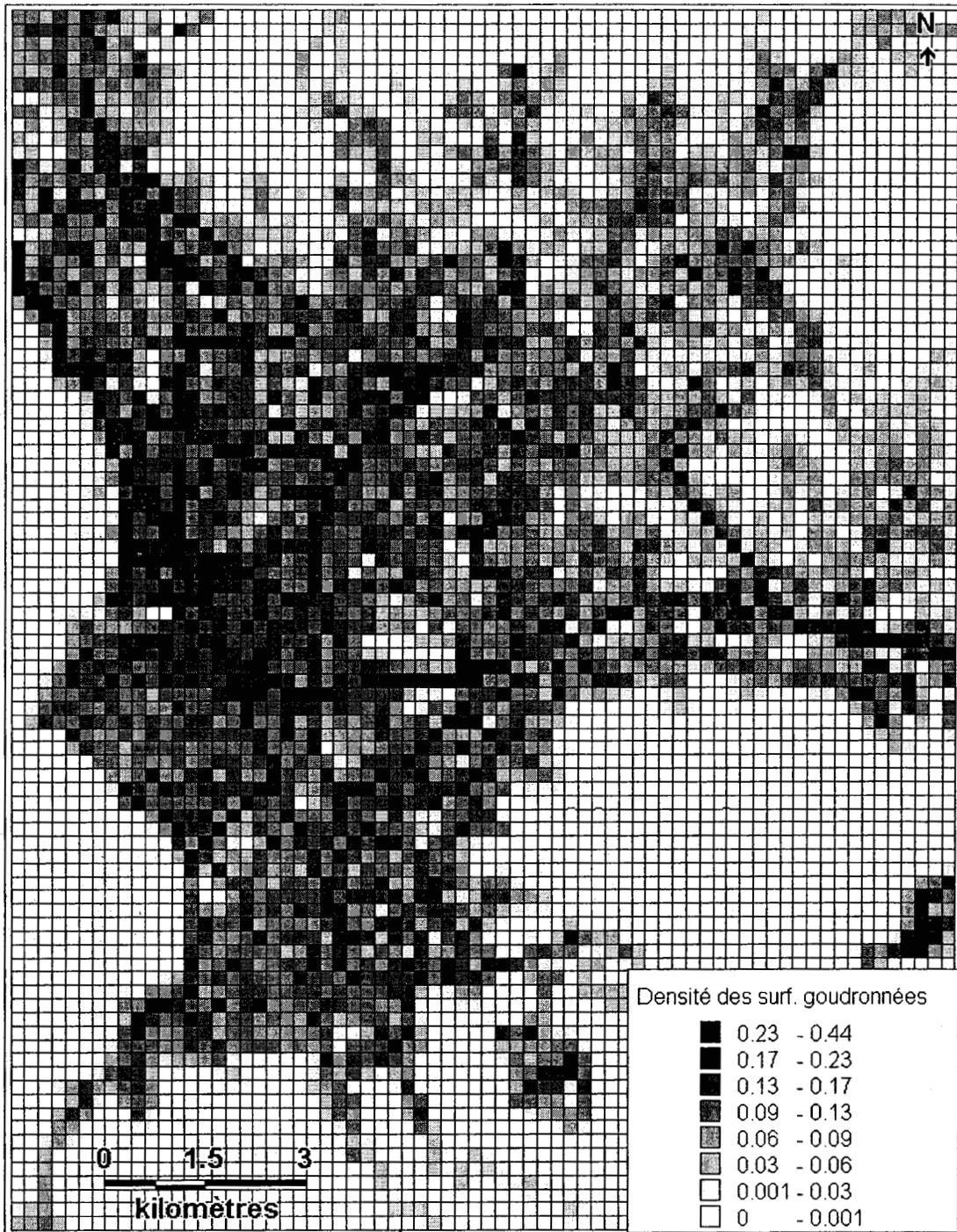
Carte 1-3 : Les principaux quartiers de Marseille



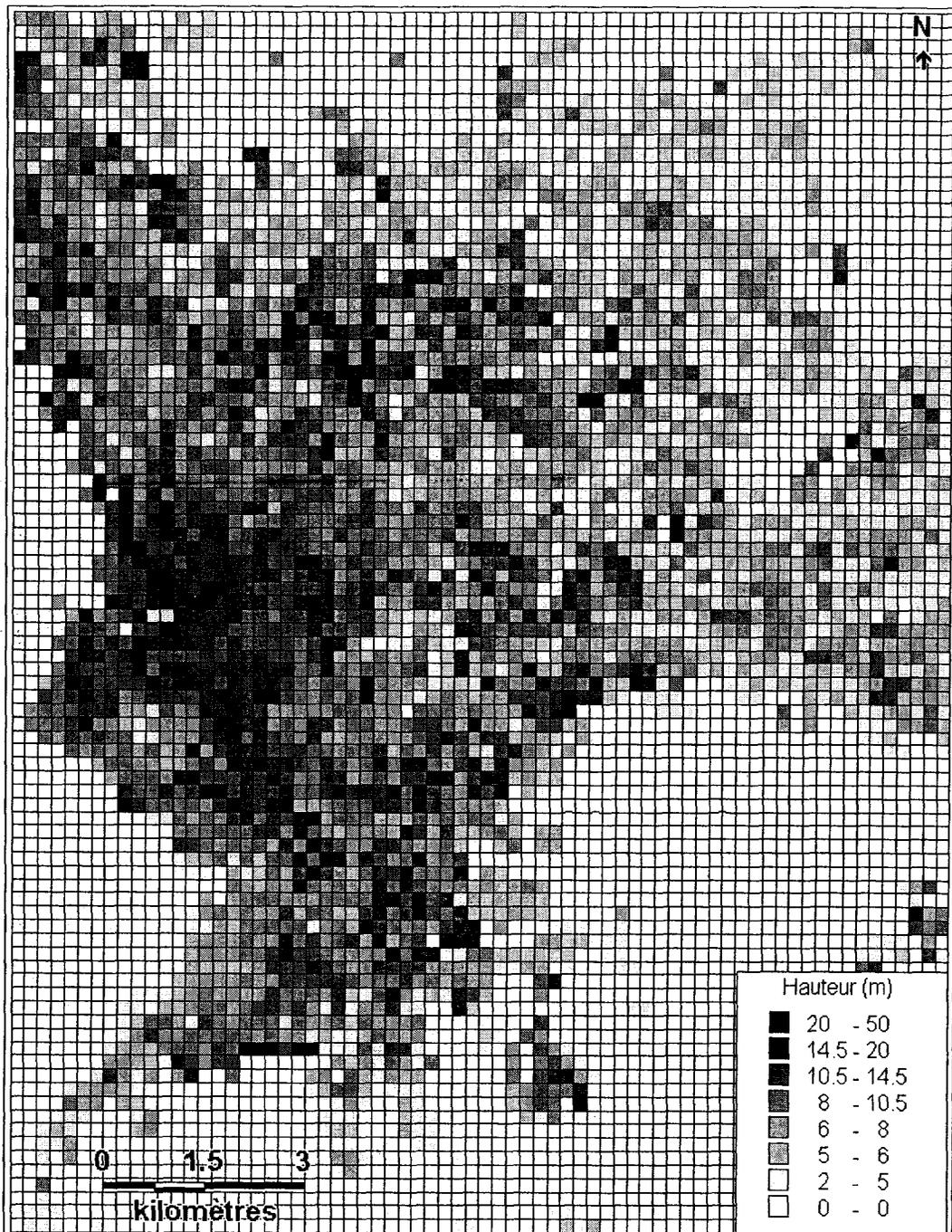
Carte 3-1 : La densité bâtie de Marseille



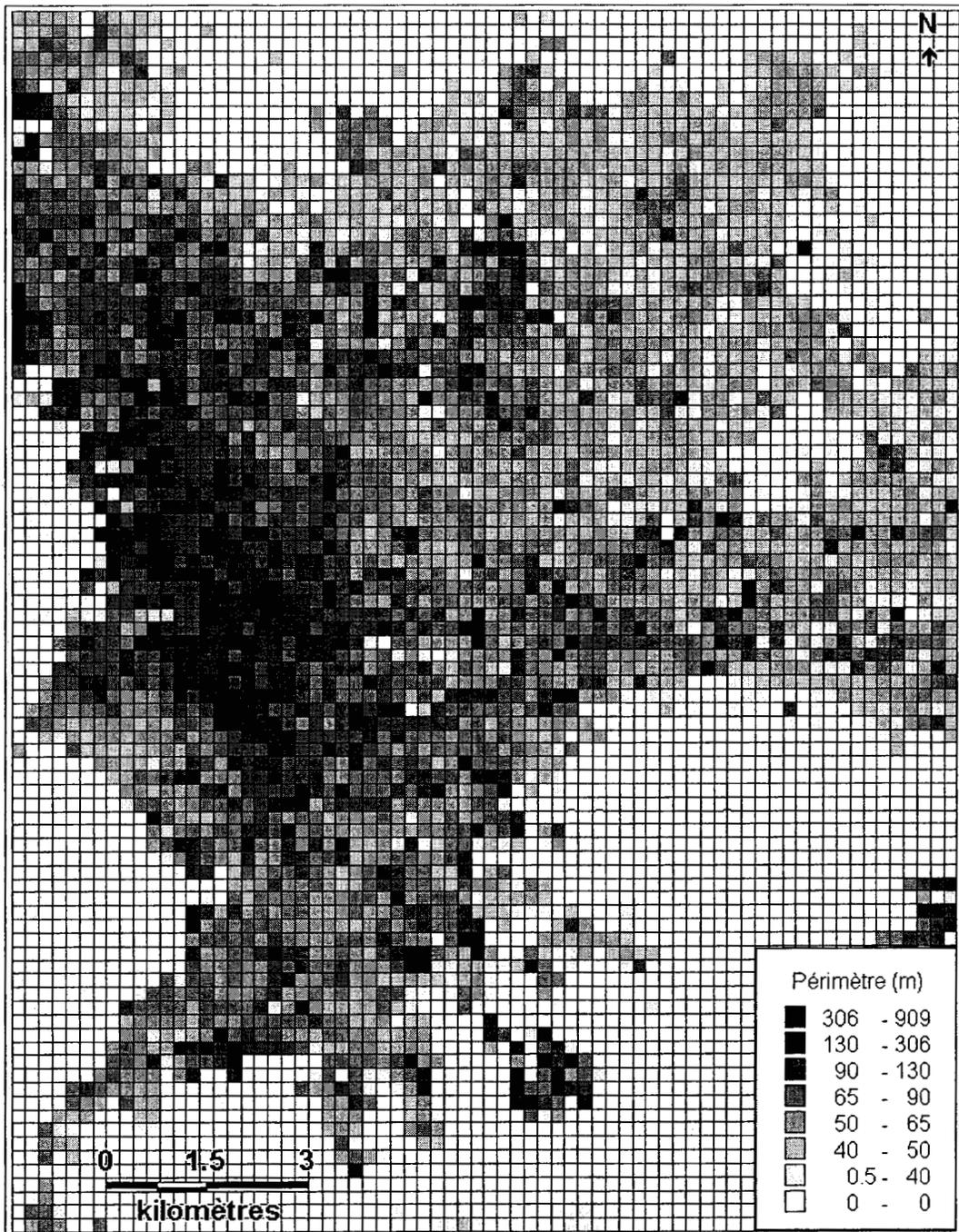
Carte 3-2 : La densité de la végétation de Marseille



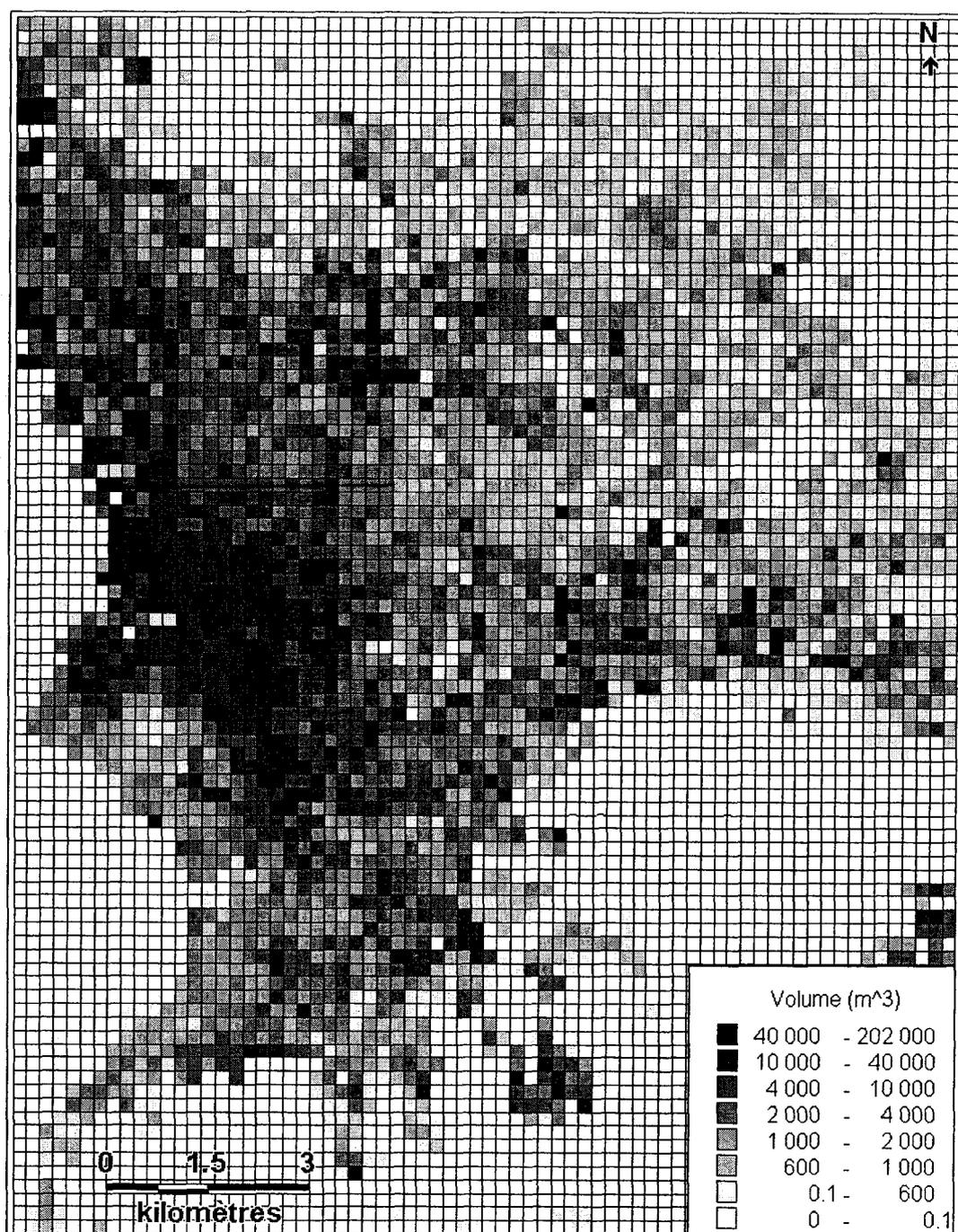
Carte 3-3 : La densité des surfaces goudronnées de Marseille



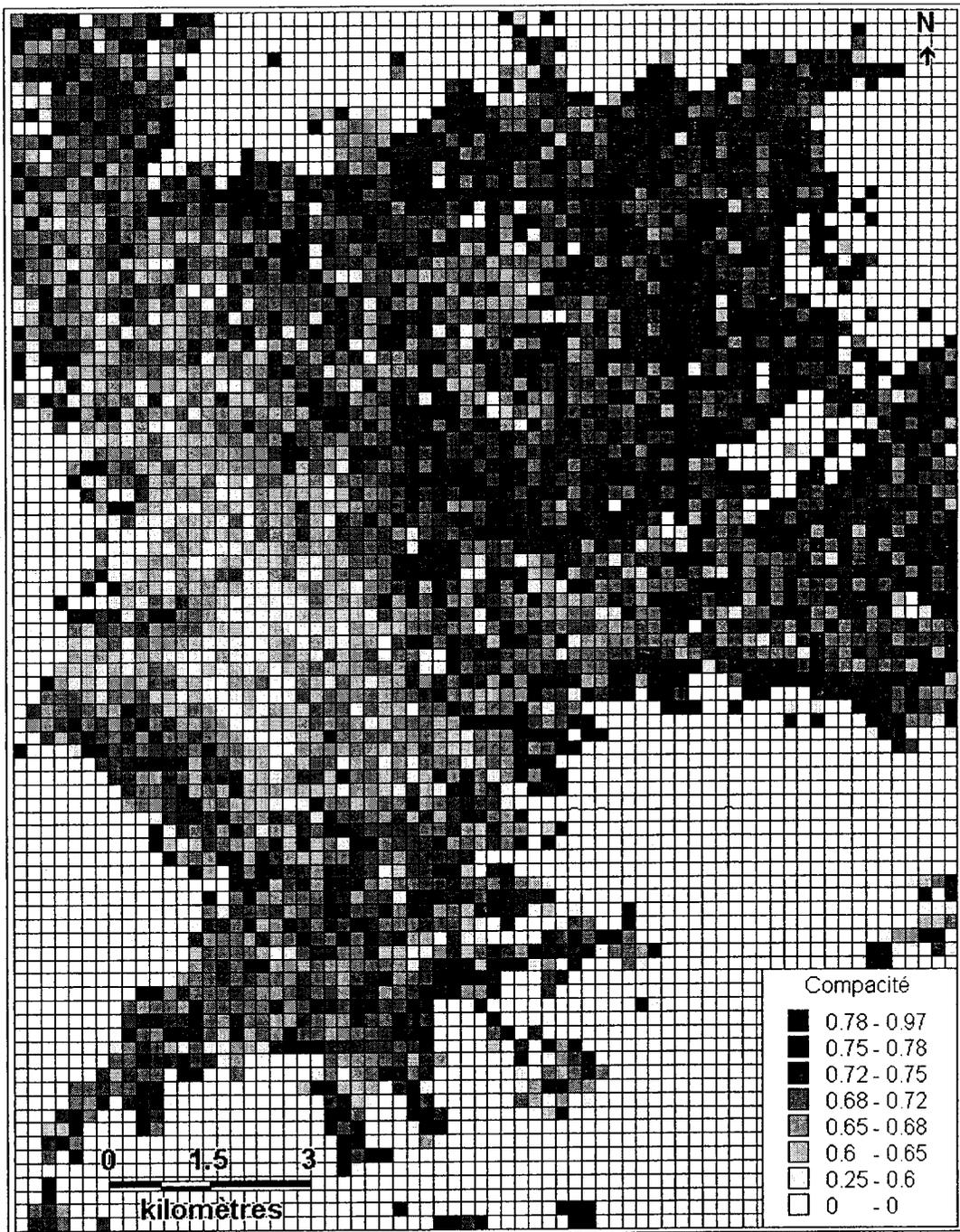
Carte 3-4 : La hauteur moyenne des bâtiments du tissu urbain de Marseille



Carte 3-5 : Le périmètre moyen des bâtiments du tissu urbain de Marseille



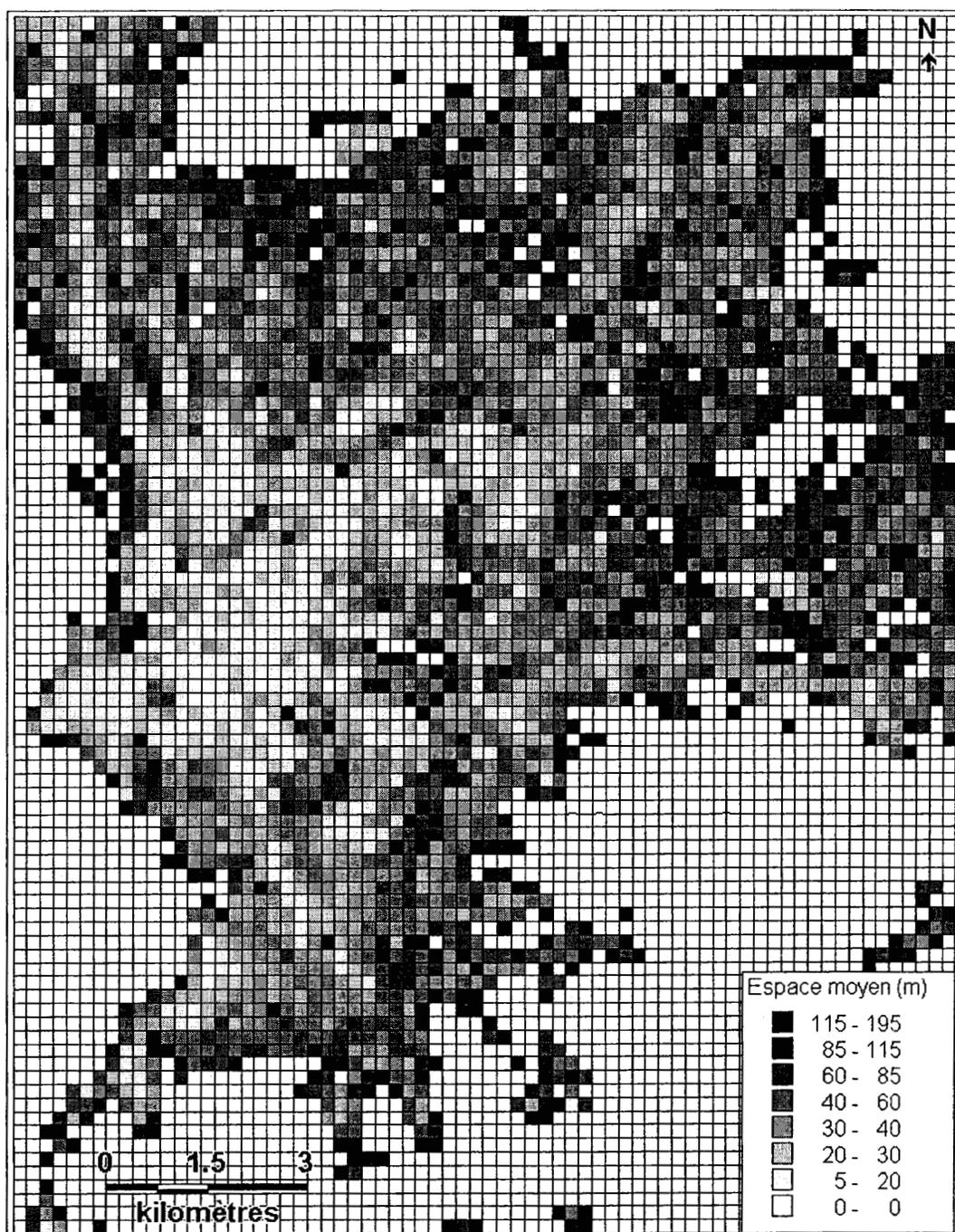
Carte 3-6 : Le volume moyen des bâtiments du tissu urbain de Marseille.



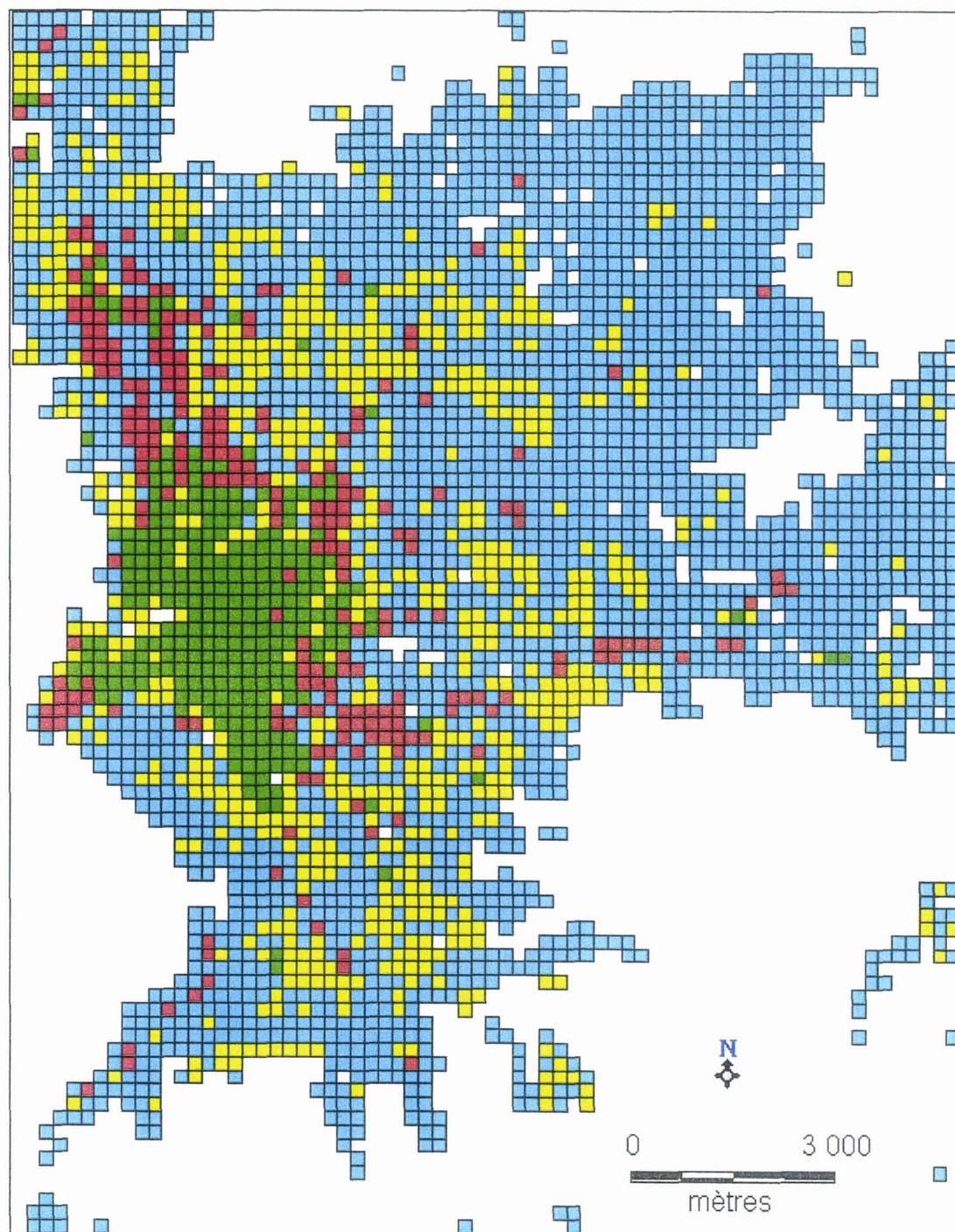
Carte 3-7 : La compacité moyenne des bâtiments du tissu urbain de Marseille.



Carte 3-8 : Nombre de bâtiments sur 4 ha du tissu urbain de Marseille.

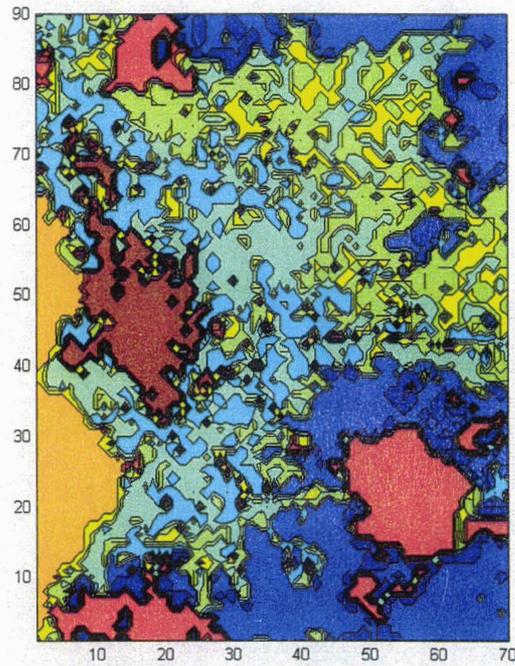


Carte 3-9 : L'espacement moyen entre les bâtiments du tissu urbain de Marseille.

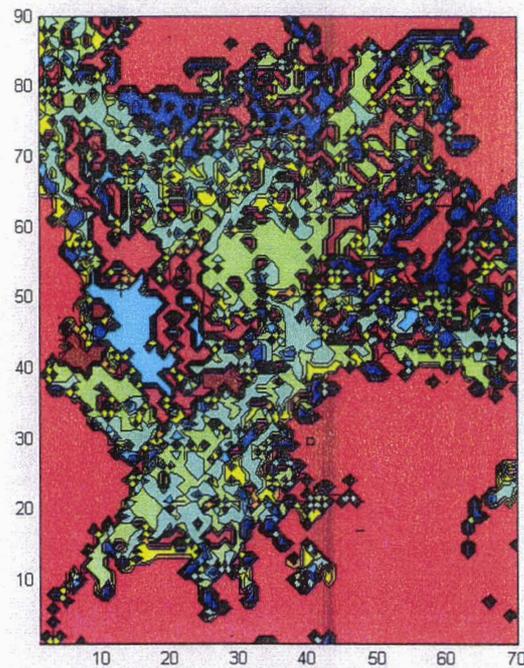


-  Zone industrielle
-  Zone d'habitat individuel
-  Centre-ville
-  Zone d'habitat collectif

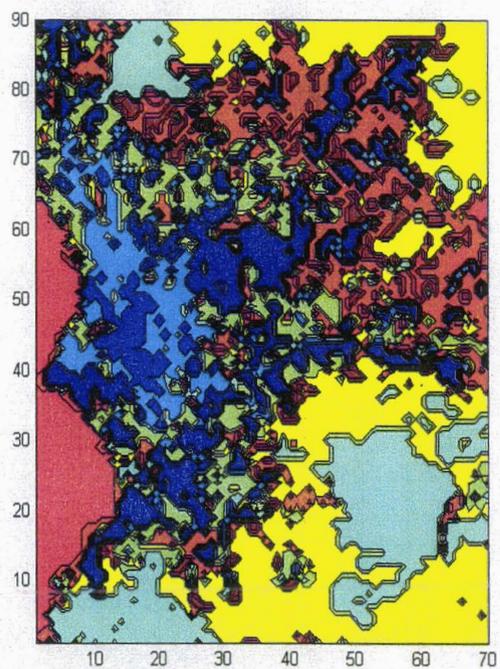
Carte 3-10 : Classification du tissu urbain de Marseille selon la méthode développée par Chaillou, 1996.



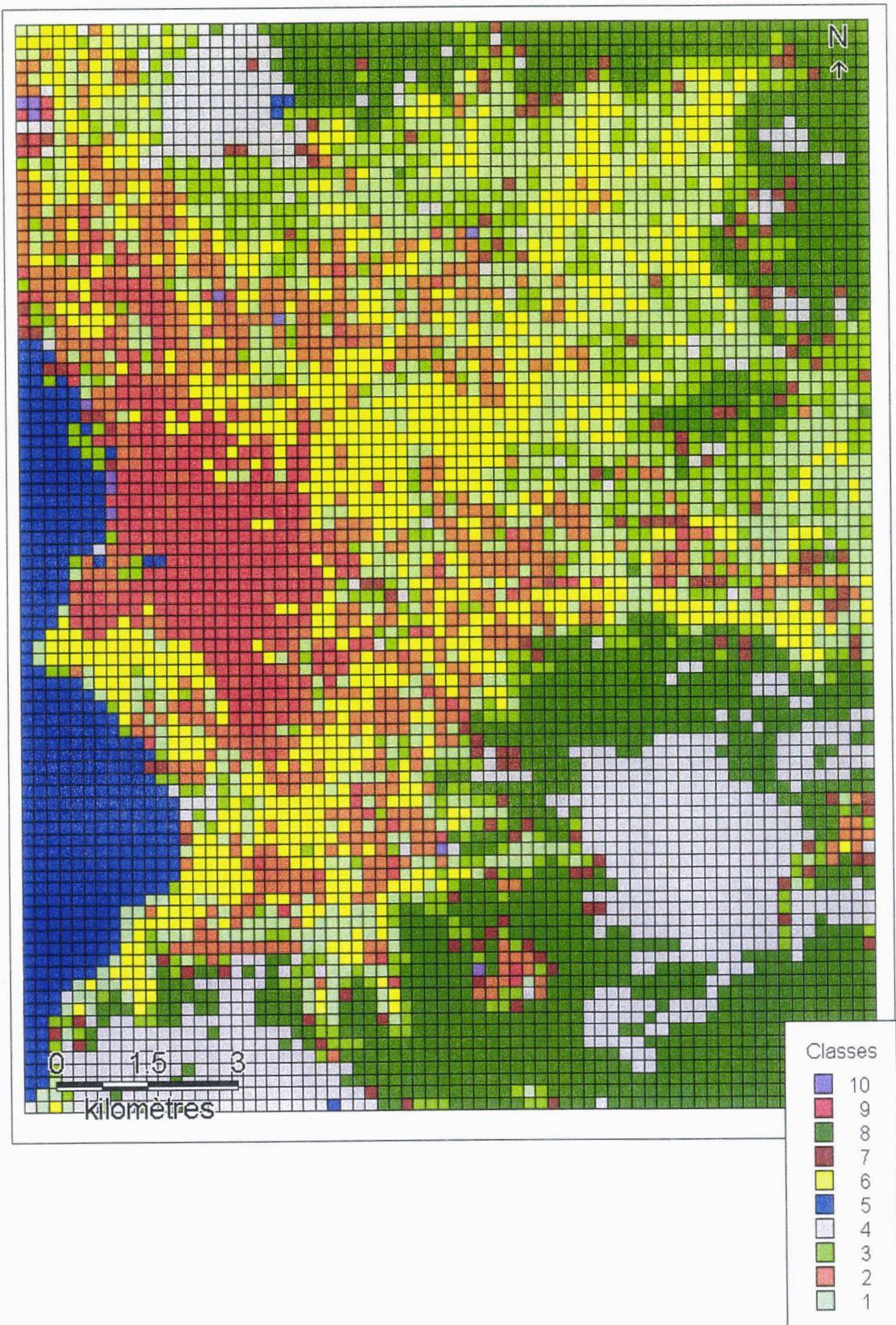
Carte 3-11 : Classification de Marseille par la méthode k-means de Matlab : cas satisfaisant.



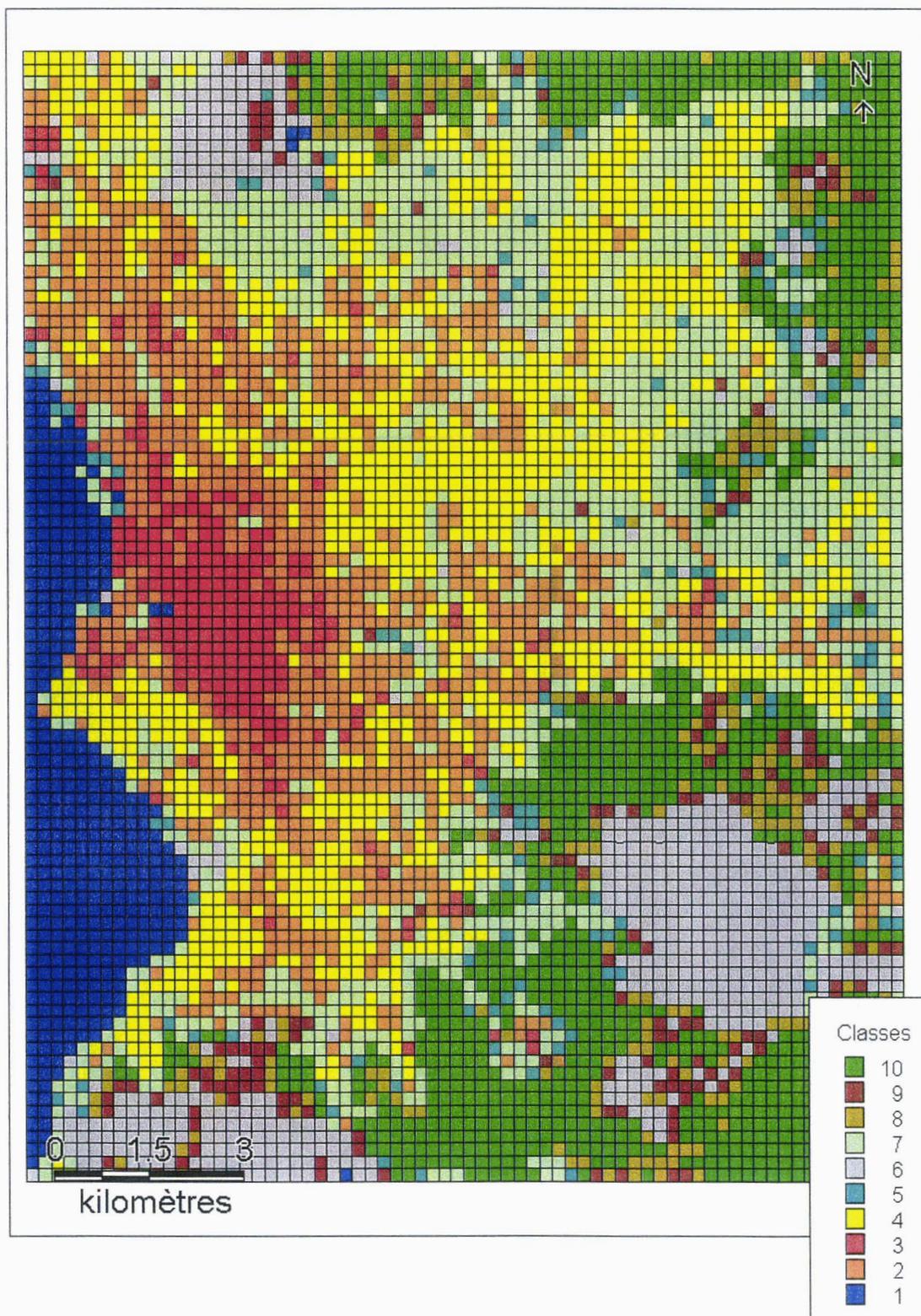
Carte 3-12 : Classification de Marseille par la méthode k-means de Matlab : cas non-satisfaisant.



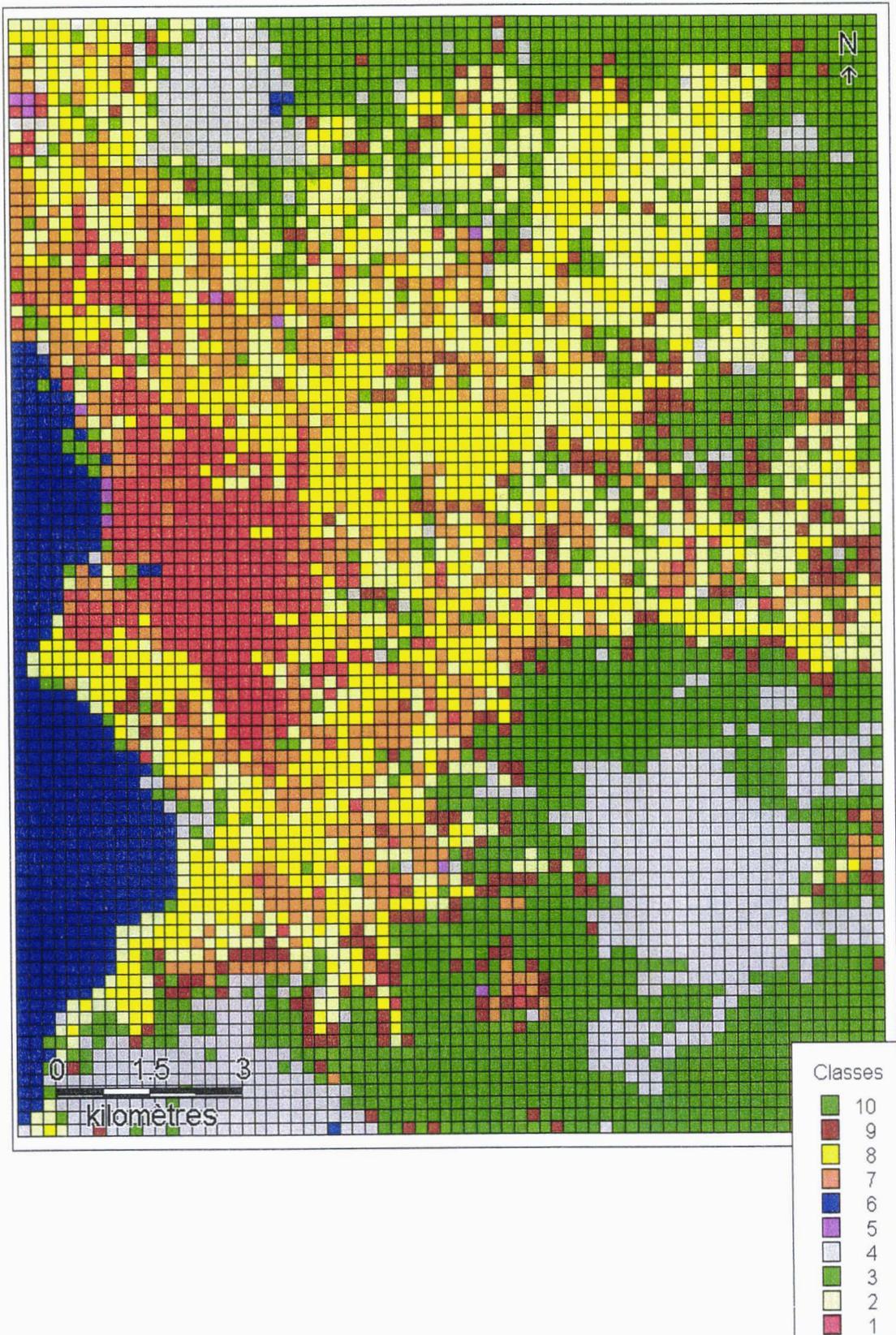
Carte 3-13 : Classification de Marseille selon la méthode k-means de Matlab (méthode « uniform »).



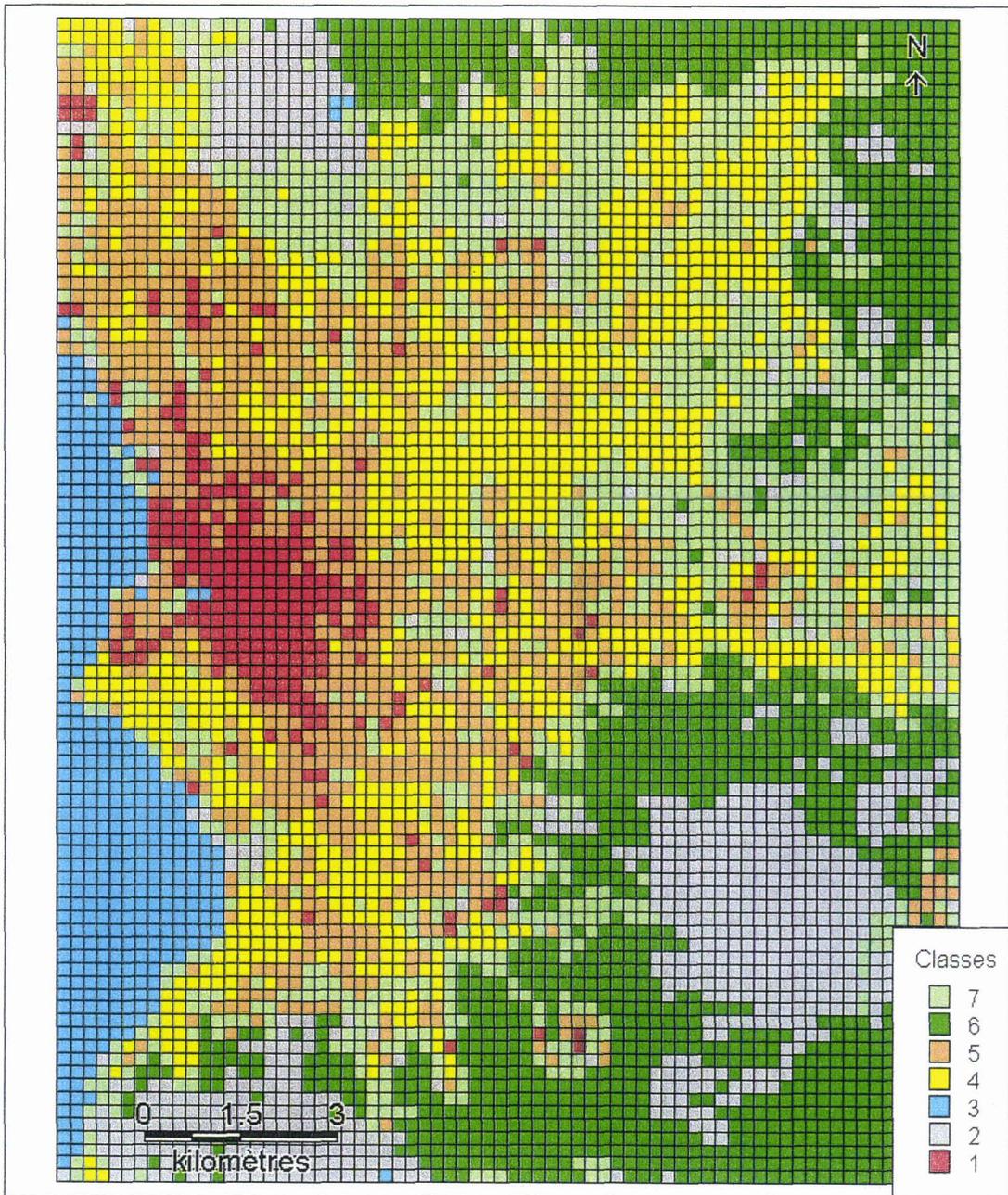
Carte 3-14 : Classification de Marseille en 10 classes selon le choix 2



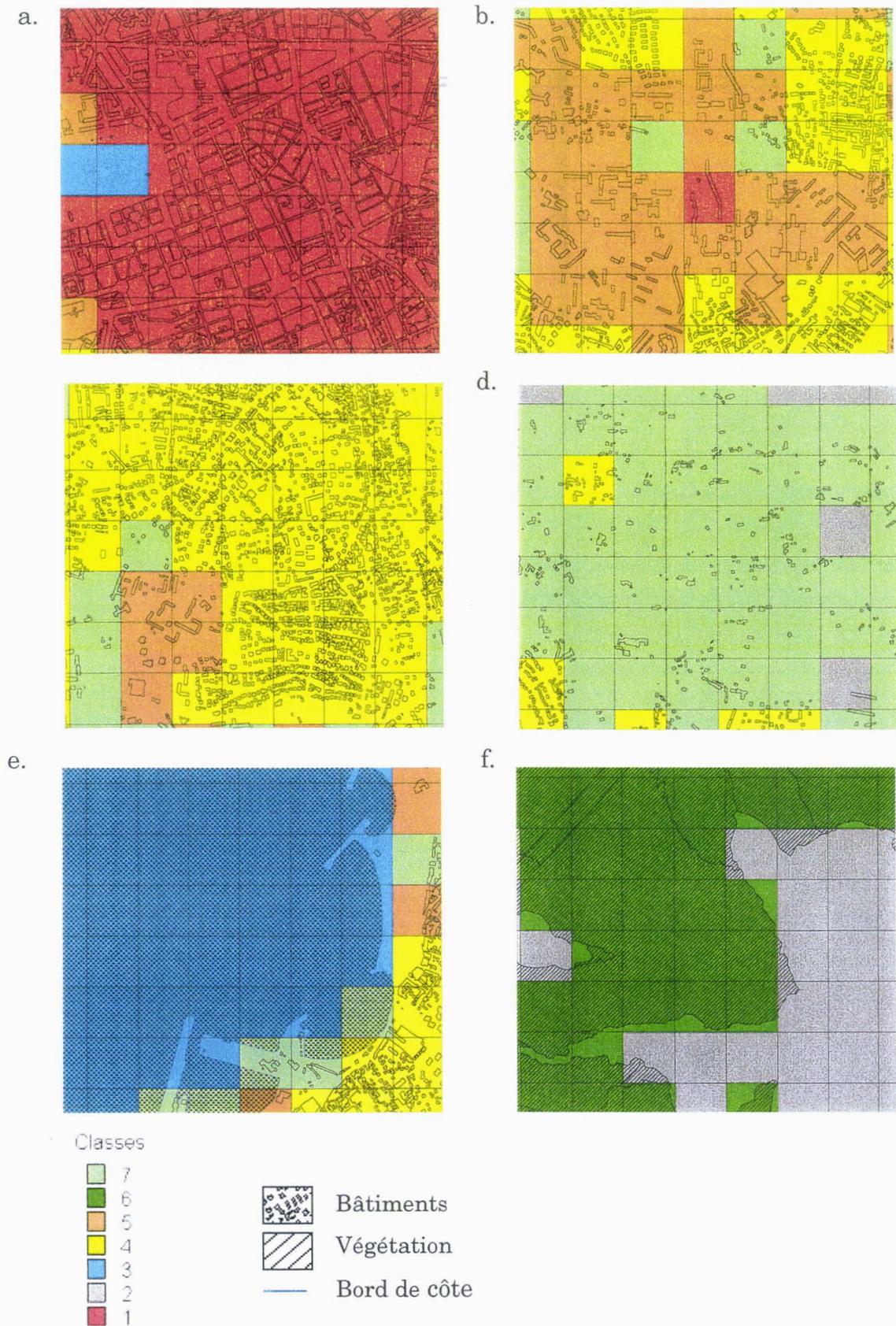
Carte 3-15 : Classification de Marseille en 10 classes selon le choix 3.



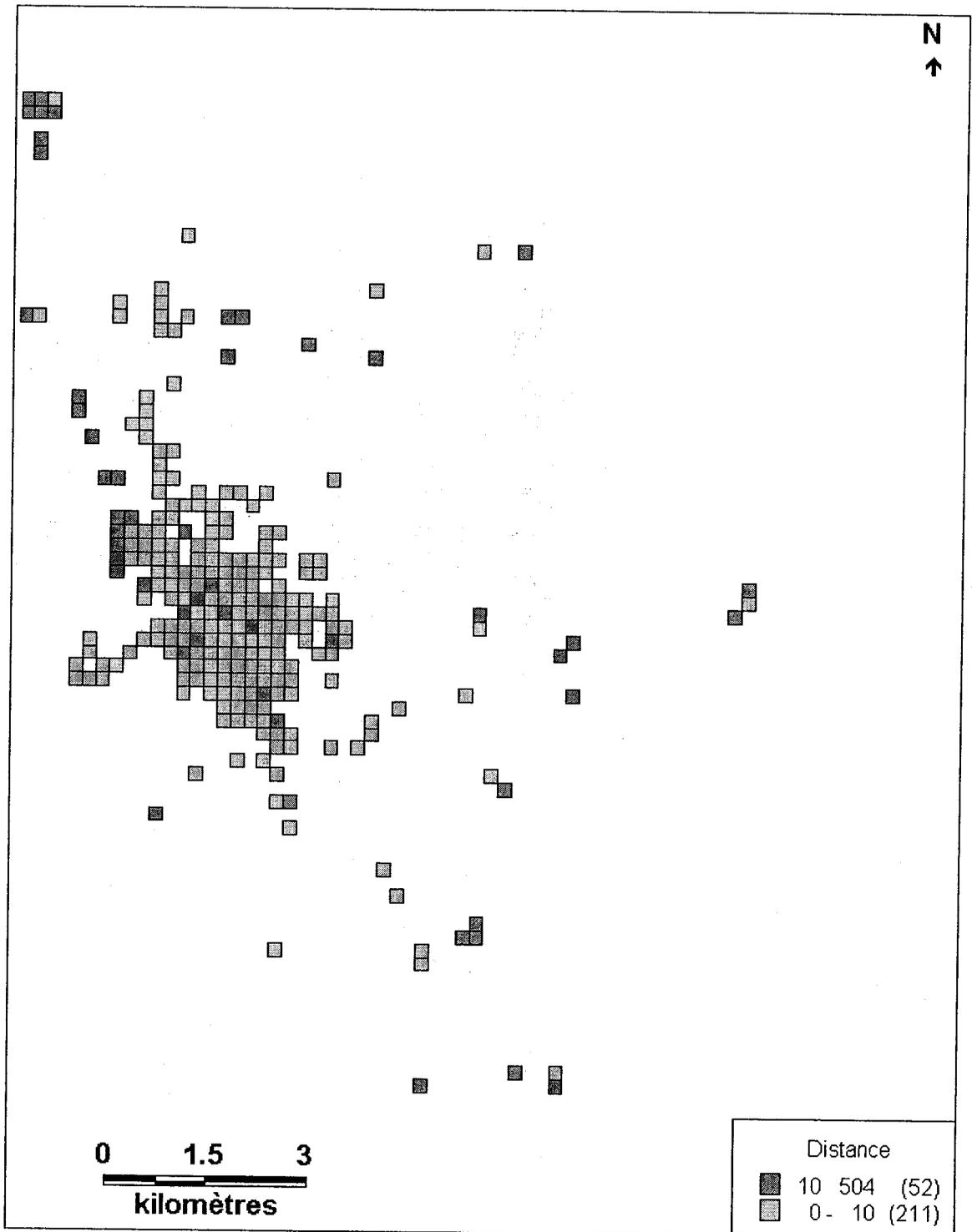
Carte 3-16 : Classification de Marseille en 10 classes selon le choix 3 à partir d'une matrice où les 20 premières valeurs ont été déplacées à la fin.



Carte 3-17 : Classification de Marseille en 7 classes



Carte 3-18 : Superposition de la classification en 7 classes et de la BDTopo : le centre ville (a), l'habitat collectif (b), l'habitat individuel dense (c) et peu dense (d), les surfaces d'eau (e), les surfaces de végétation et de sol sans information (f).



Carte 3-19 : Distances euclidiennes de la classe 1 issue de la classification en 7 classes de Marseille.



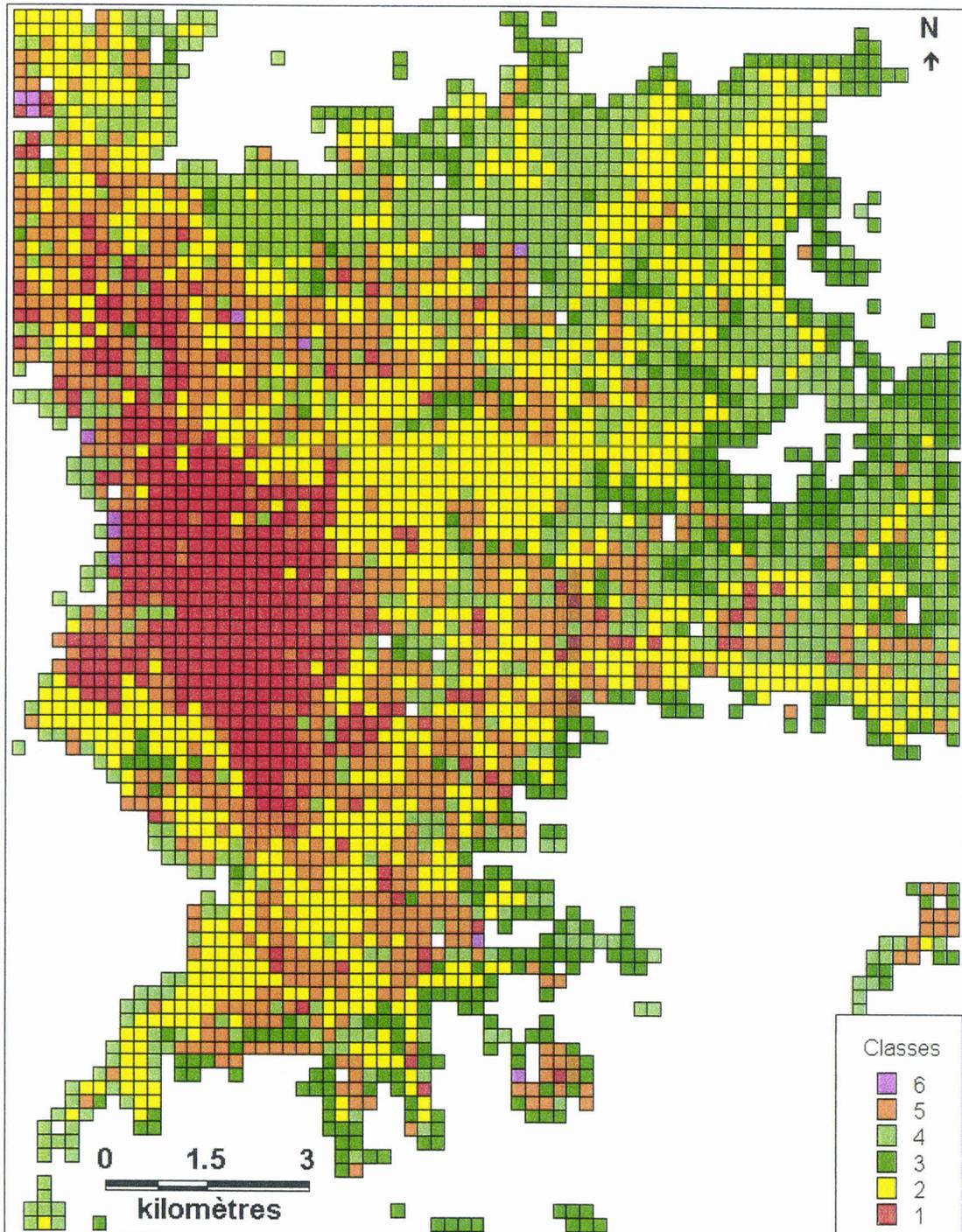
Carte 3-20 : Distances euclidiennes de la classe 4 issue de la classification en 7 classes de Marseille.



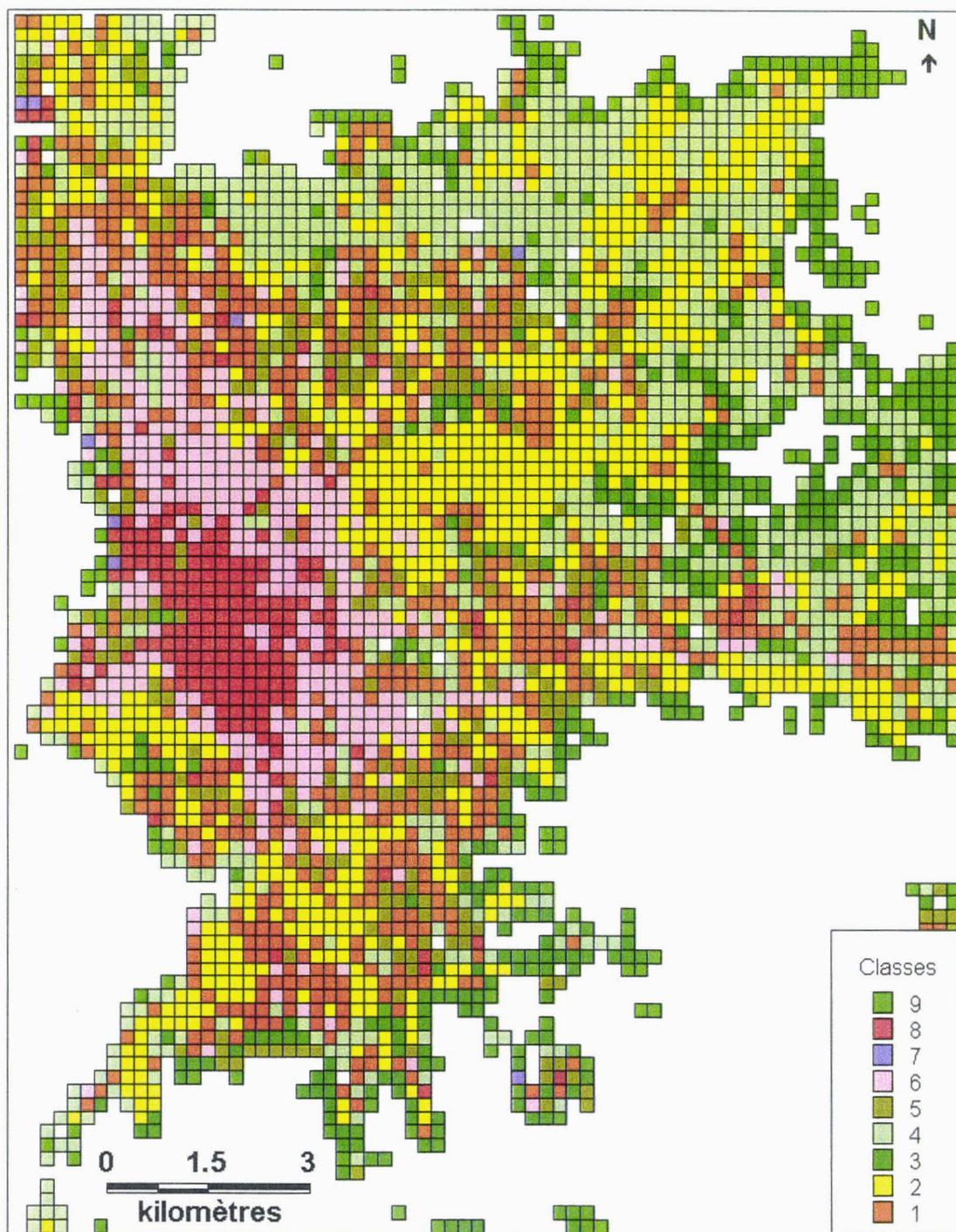
Carte 3-21 : Distances euclidiennes de la classe 5 issue de la classification en 7 classes de Marseille.



Carte 3-22 : Distances euclidiennes de la classe 7 issue de la classification en 7 classes de Marseille.



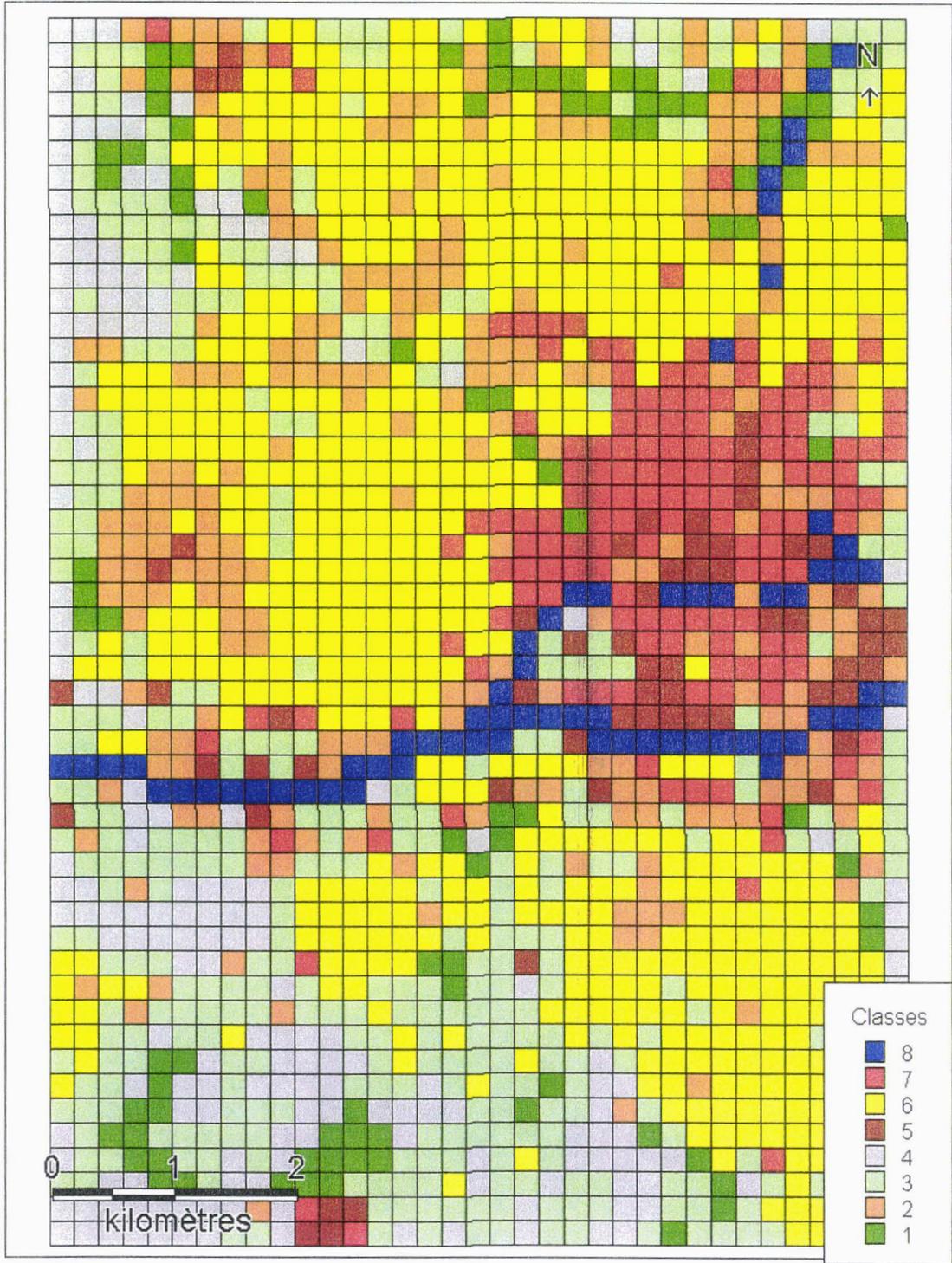
Carte 3-23 : Classification en 6 classes du tissu urbain de Marseille.



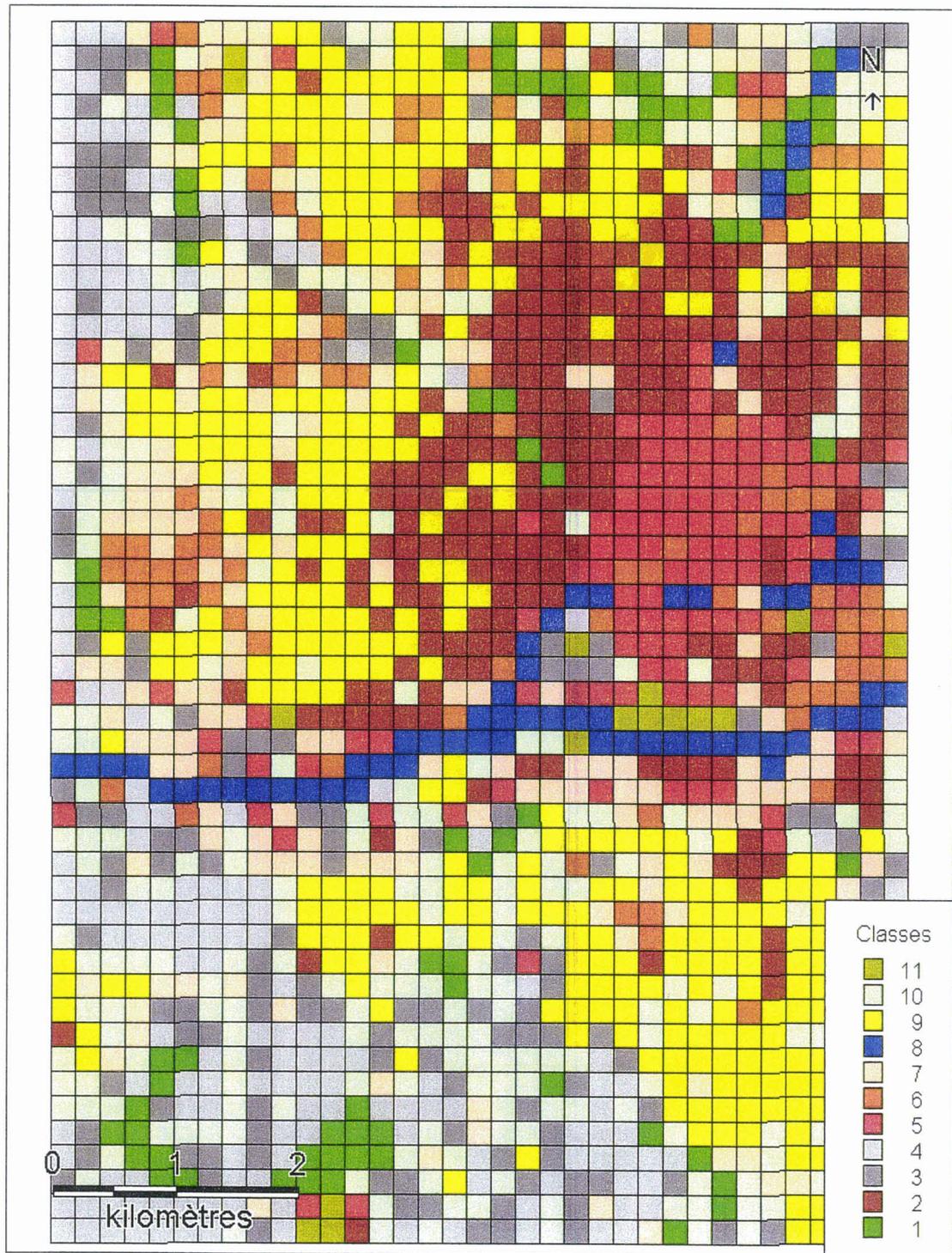
Carte 3-24 : Classification en 9 classes du tissu urbain de Marseille.



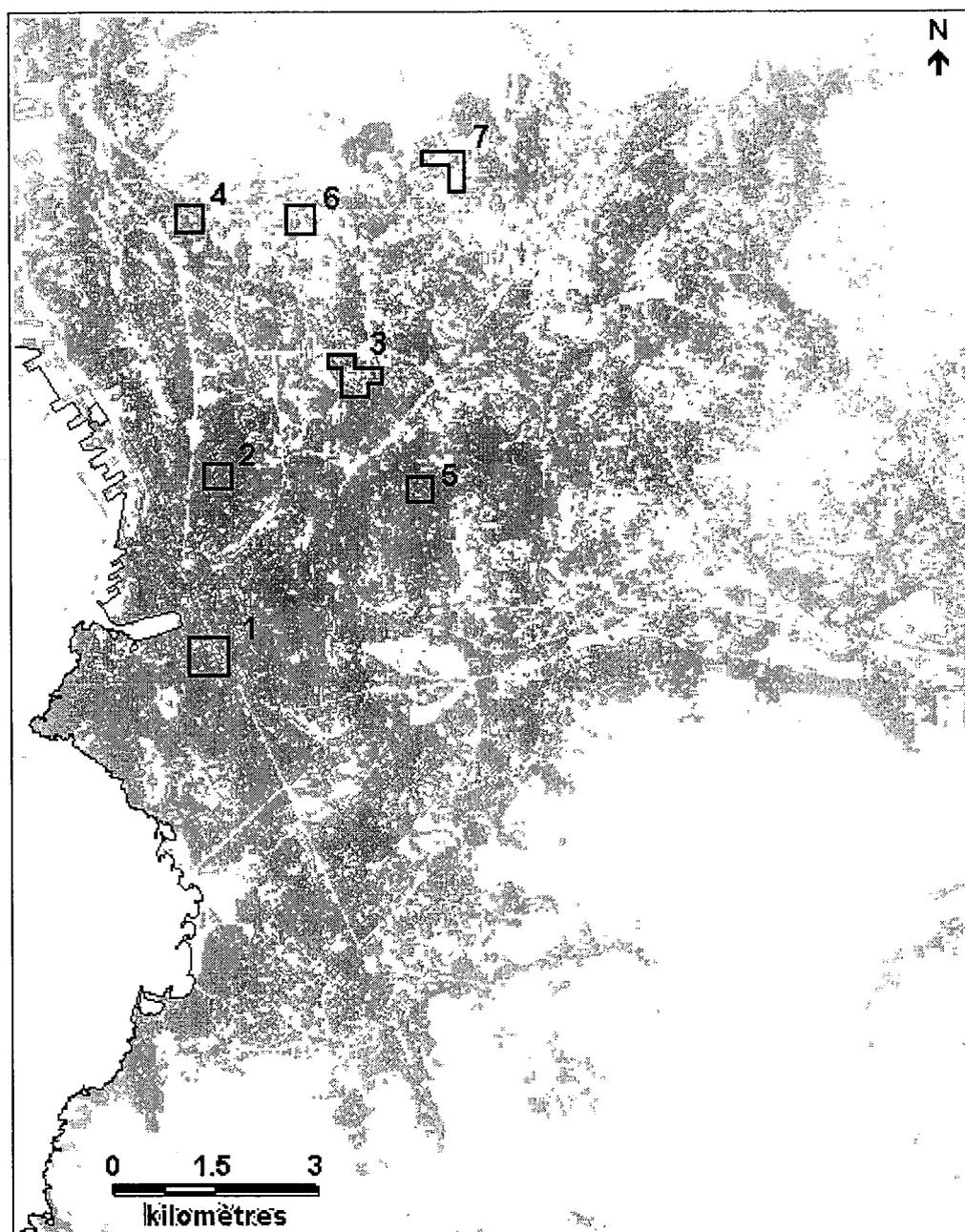
Carte 4-1 : Présentation de la ville de Nantes



Carte 4-2 : Classification en 8 classes de Nantes.

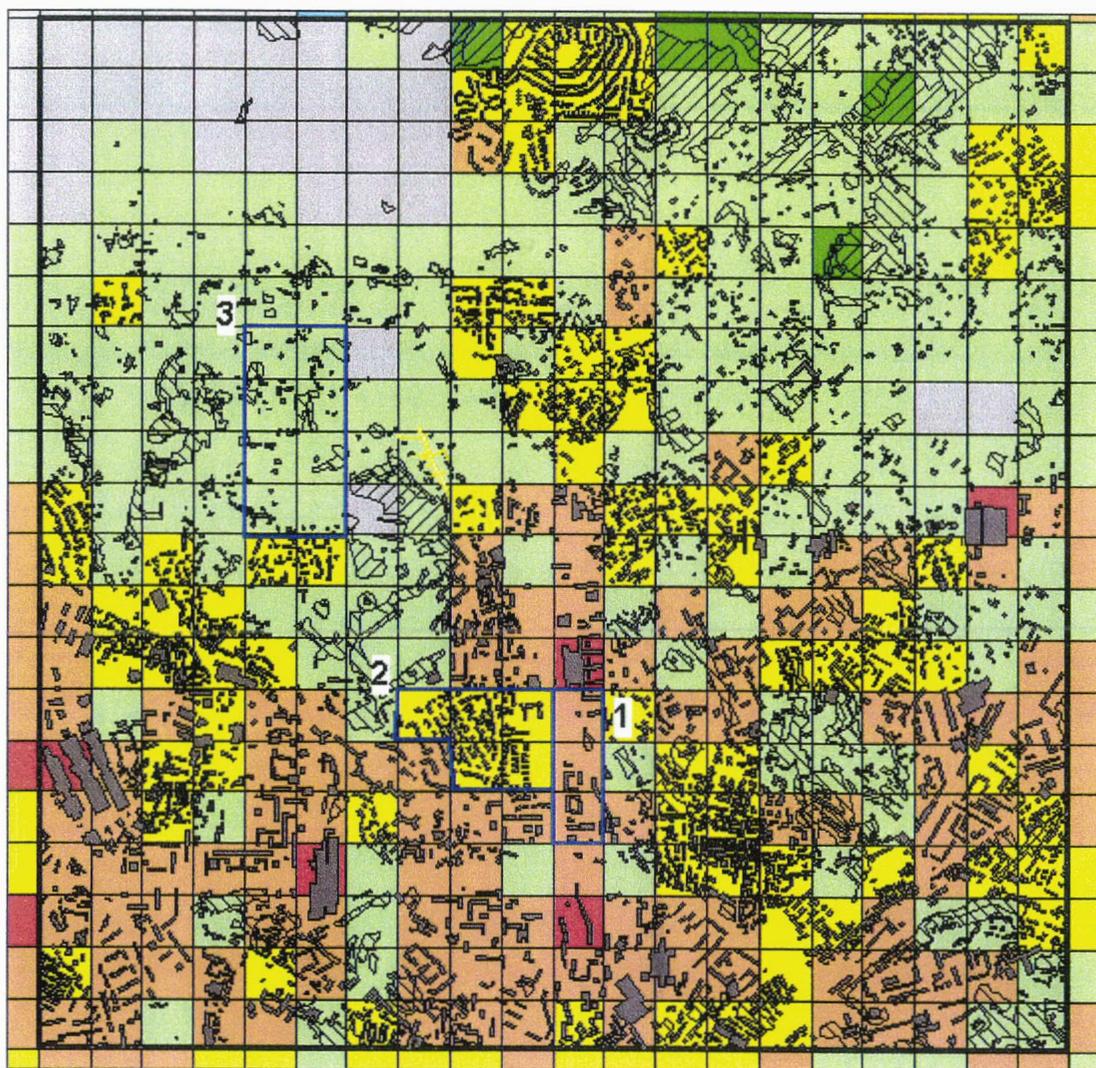


Carte 4-3 : Classification en 11 classes de Nantes.



1 : zone du centre-ville, 2 : zone du péri-centre, 3 : zone d'habitat collectif, 4 : zone de petit collectif, 5 : zone d'habitat individuel, 6 : zone d'habitat individuel peu dense, 7 : zone d'habitat individuel épars.

Carte 4-4 : Zones-tests définies pour chacune des classes de la classification en 9 classes du tissu urbain de Marseille (sauf les classes 3 et 9)

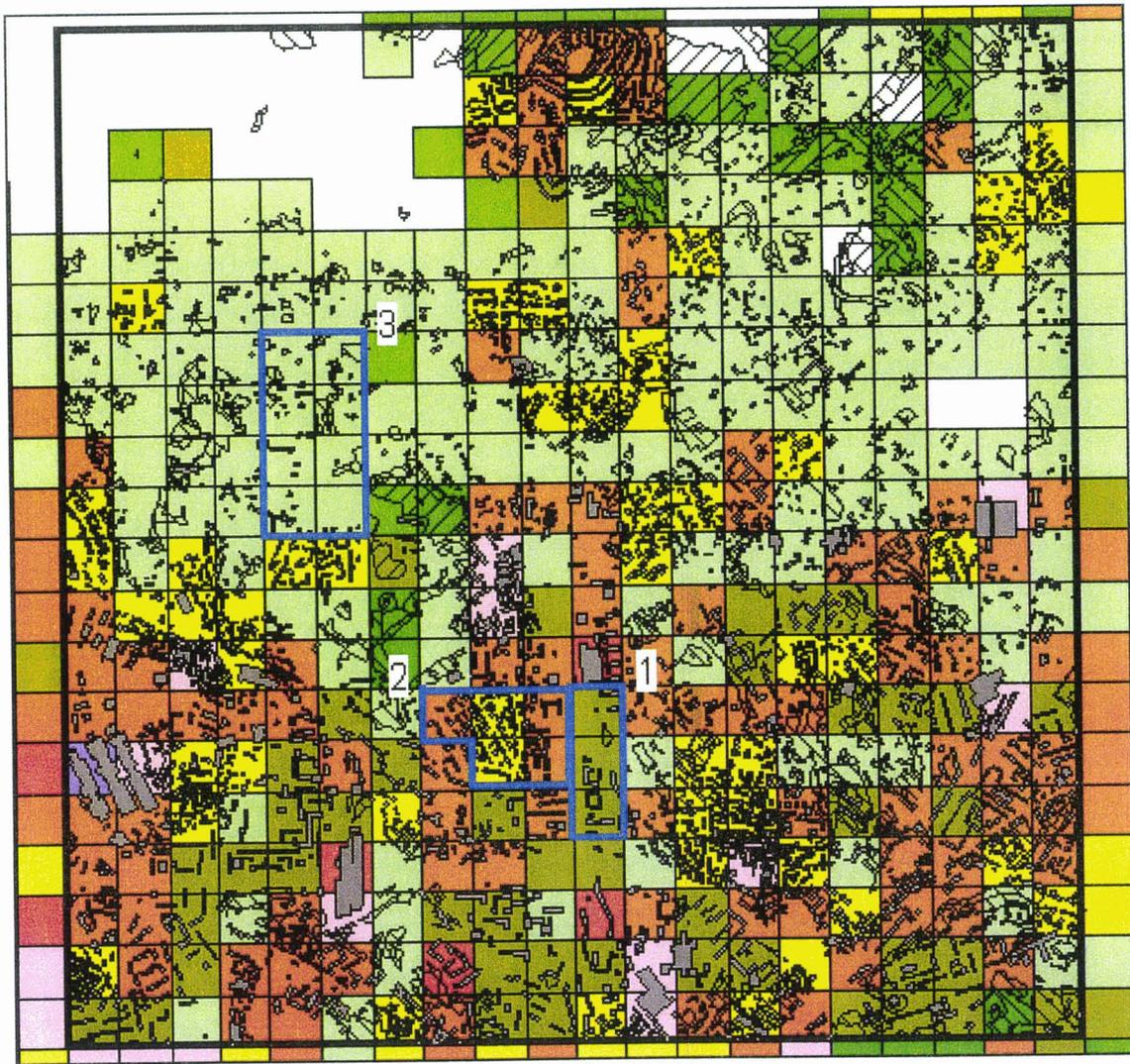


Classes

<ul style="list-style-type: none"> 7 6 5 4 3 2 1 	<ul style="list-style-type: none"> Bâtiment Broussaille Bois Zones-test Zone du quartier St Jérôme
--	--

1 : habitat collectif,
2 : habitat individuel dense,
3 : habitat individuel peu dense

Carte 4-5 : Superposition de la classification en 7 classes de Marseille et de la BDTopo pour le quartier St Jérôme.

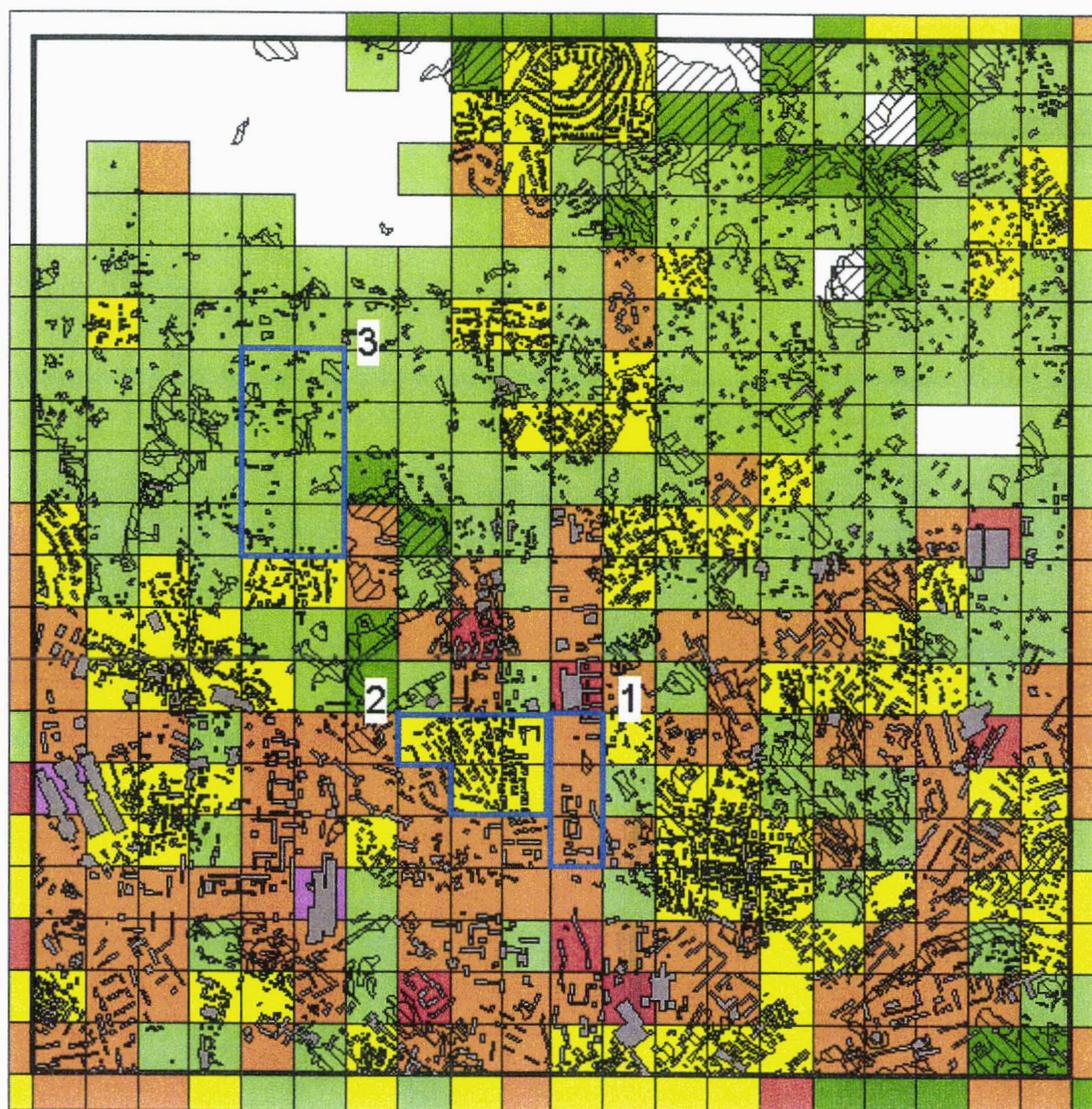


Classes

<ul style="list-style-type: none"> <li style="margin-bottom: 5px;">9 <li style="margin-bottom: 5px;">8 <li style="margin-bottom: 5px;">7 <li style="margin-bottom: 5px;">6 <li style="margin-bottom: 5px;">5 <li style="margin-bottom: 5px;">4 <li style="margin-bottom: 5px;">3 <li style="margin-bottom: 5px;">2 <li style="margin-bottom: 5px;">1 	<ul style="list-style-type: none"> <li style="margin-bottom: 10px;"> Bâtiment <li style="margin-bottom: 10px;"> Broussaille <li style="margin-bottom: 10px;"> Bois <li style="margin-bottom: 10px;"> Zones-test <li style="margin-bottom: 10px;"> Zone du quartier St Jérôme
--	---

1 : habitat collectif,
 2 : habitat individuel dense,
 3 : habitat individuel peu dense

Carte 4-6 : Superposition de la classification en 9 classes du tissu urbain de Marseille et de la BDTopo pour le quartier St Jérôme.



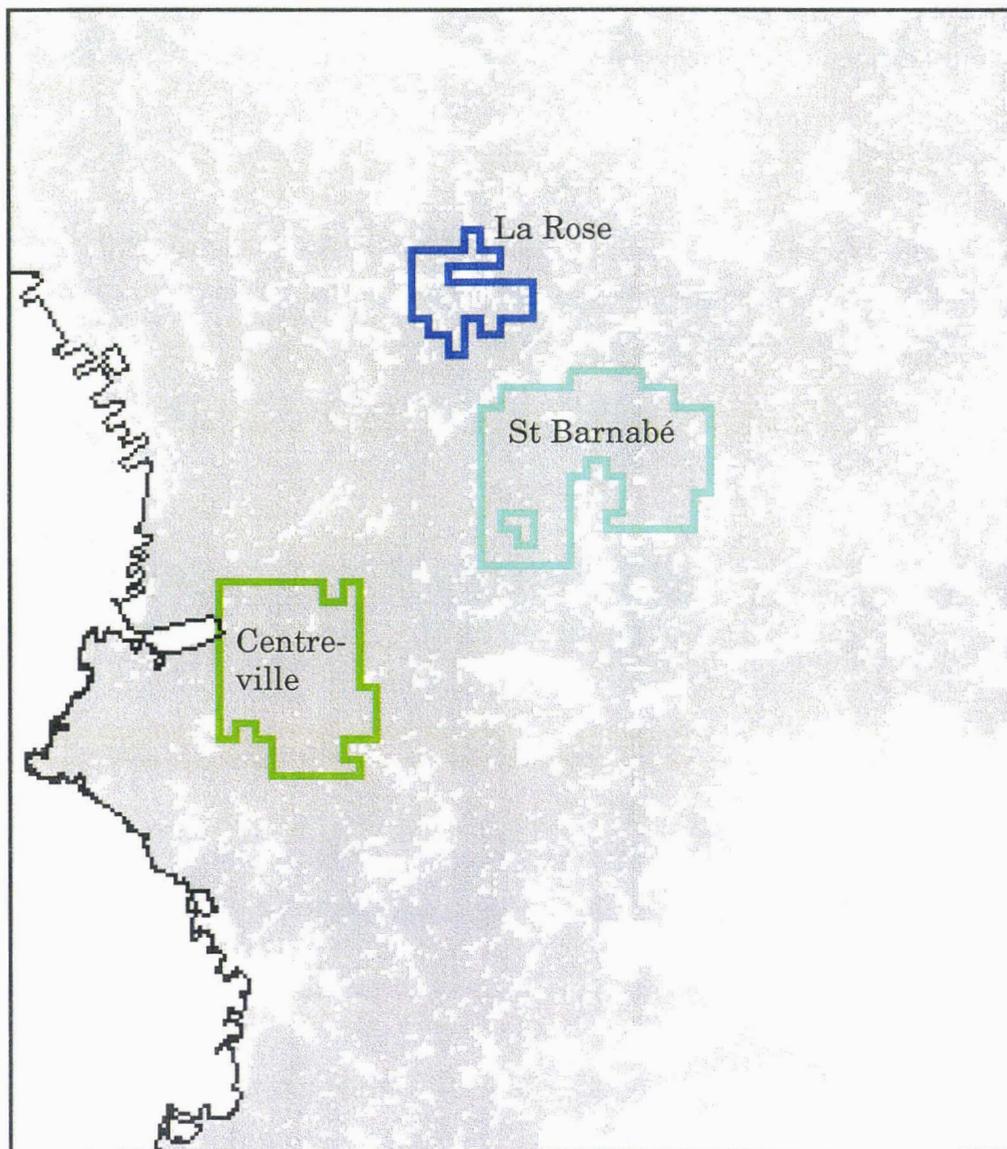
Classes

- 6
- 5
- 4
- 3
- 2
- 1

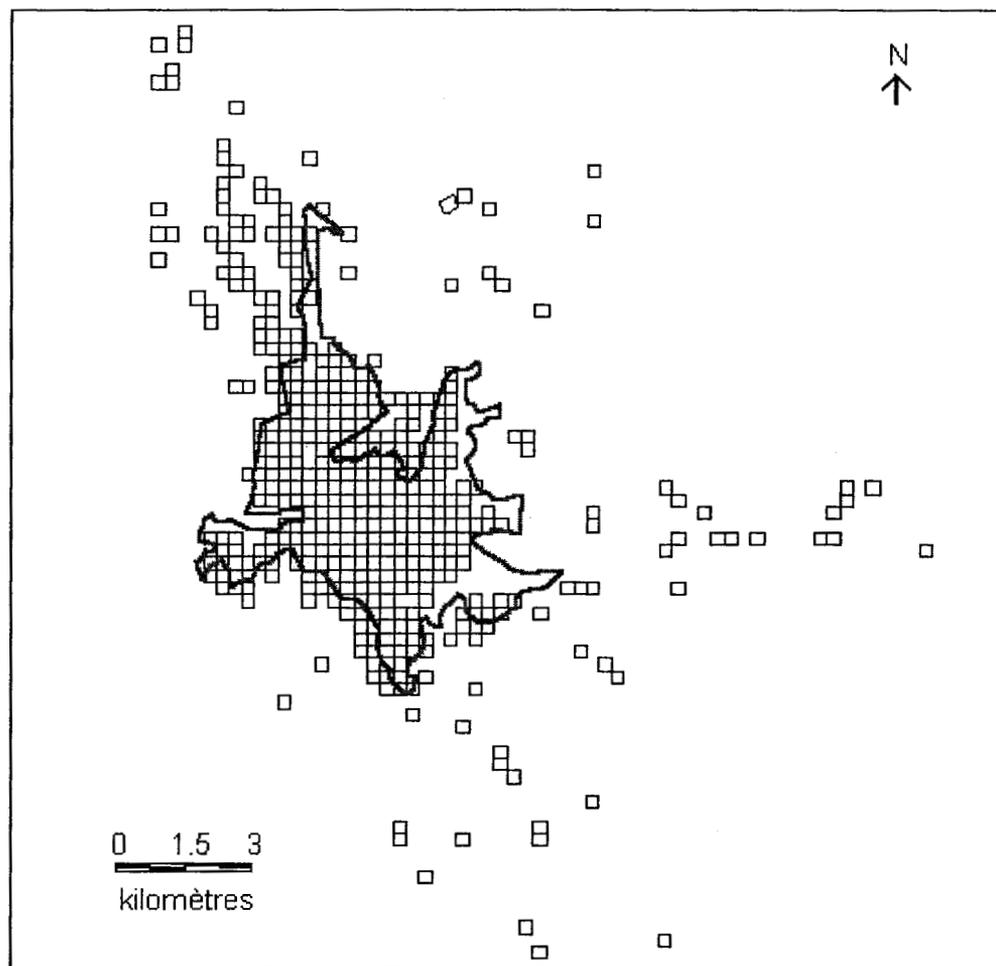
- Bâtiment
- Broussaille
- Bois
- Zones-test
- Zone du quartier St Jérôme

- 1 : habitat collectif,
- 2 : habitat individuel dense,
- 3 : habitat individuel peu dense

Carte 4-7 : Superposition de la classification en 6 classes du tissu urbain de Marseille et de la BDTopo pour le quartier St Jérôme.

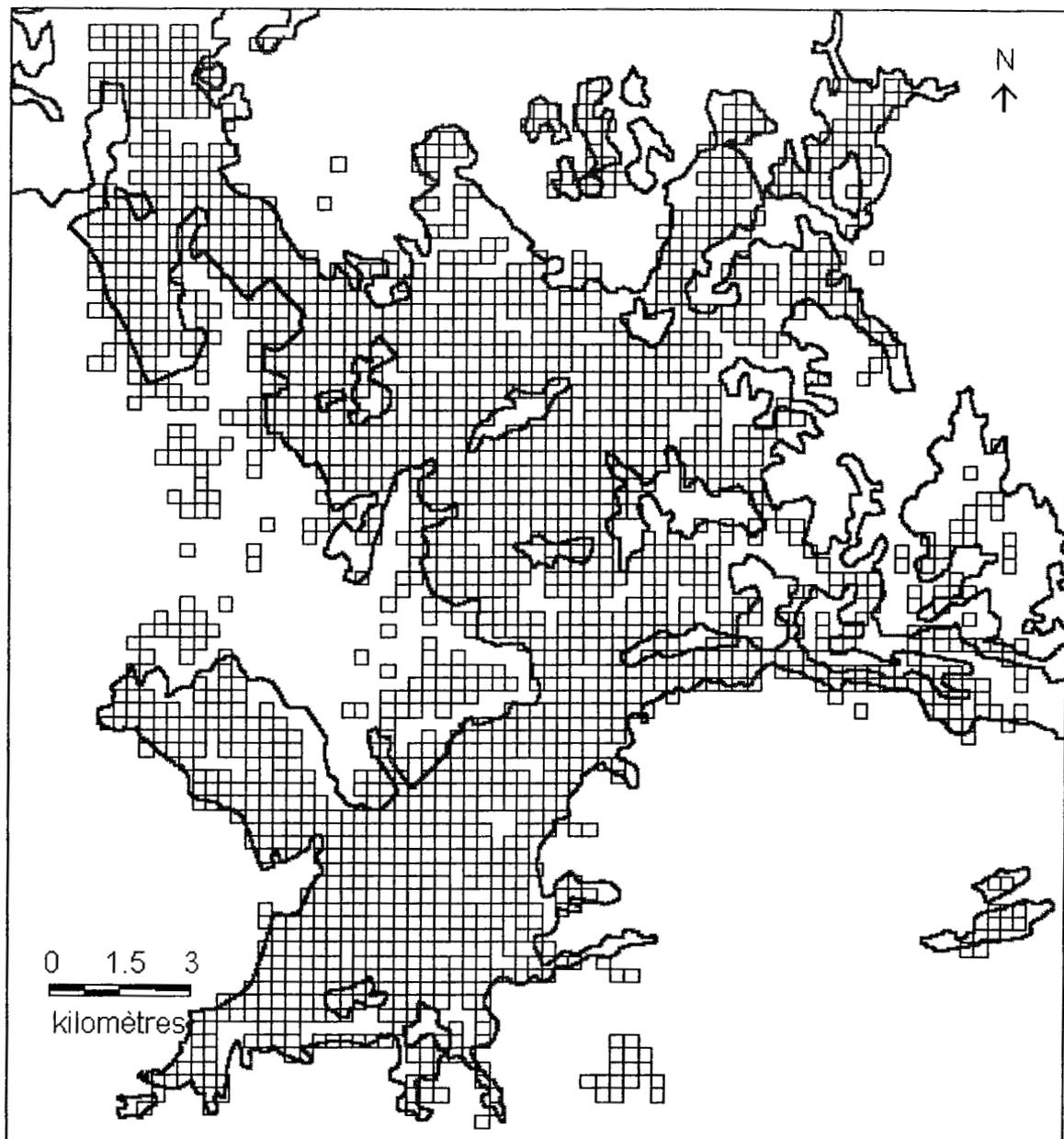


Carte 4-8 : Quartiers spécifiques utilisés pour la comparaison des résultats entre l'analyse de la BDTopo et celle des images SPOT



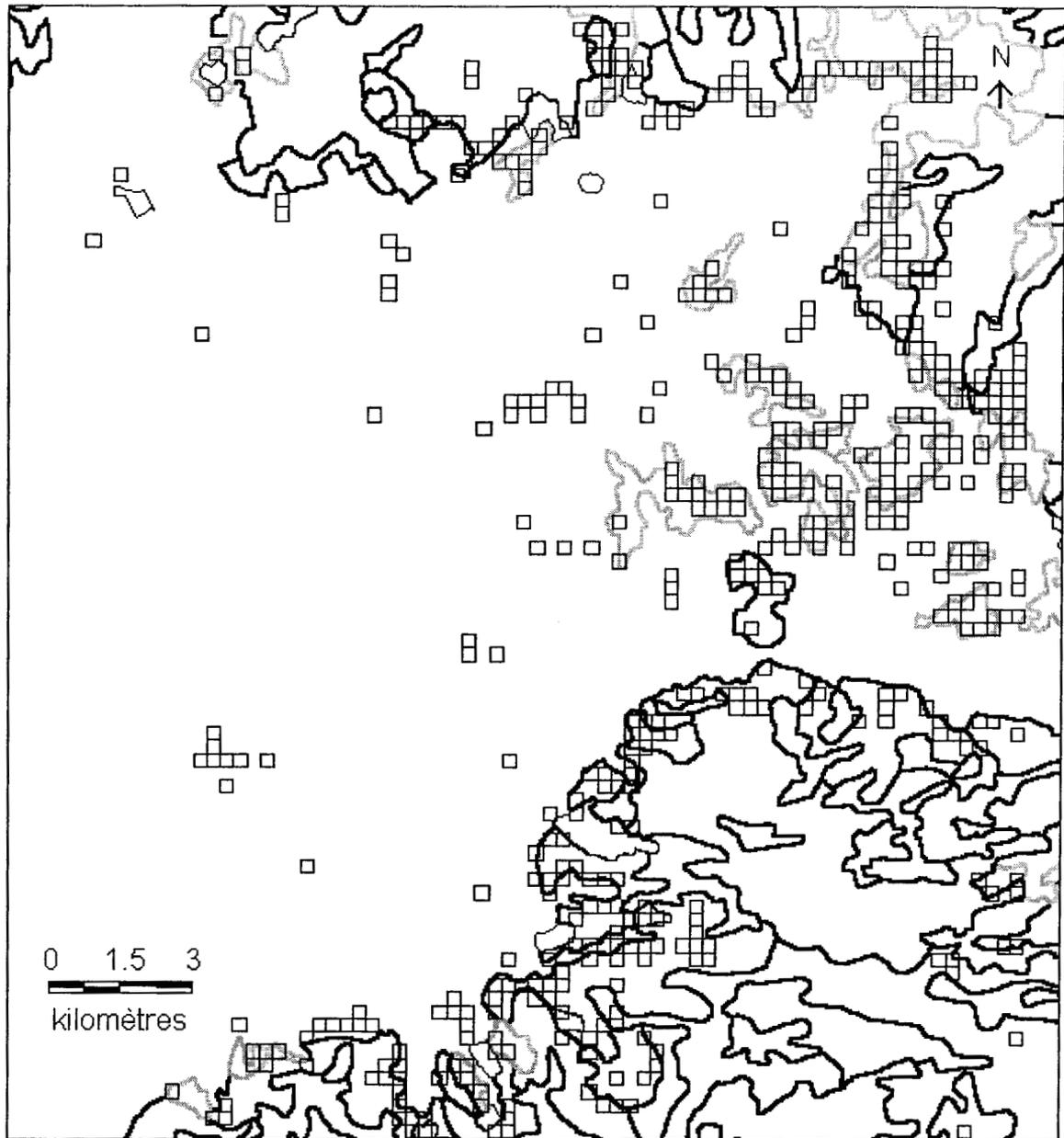
-  Cellules de la classe 1
-  Contour de la classe tissu urbain continu

Carte 4-9 : Tissu urbain continu de CORINE Land Cover et la classe 1 de la classification en 6 classes du tissu urbain de Marseille.



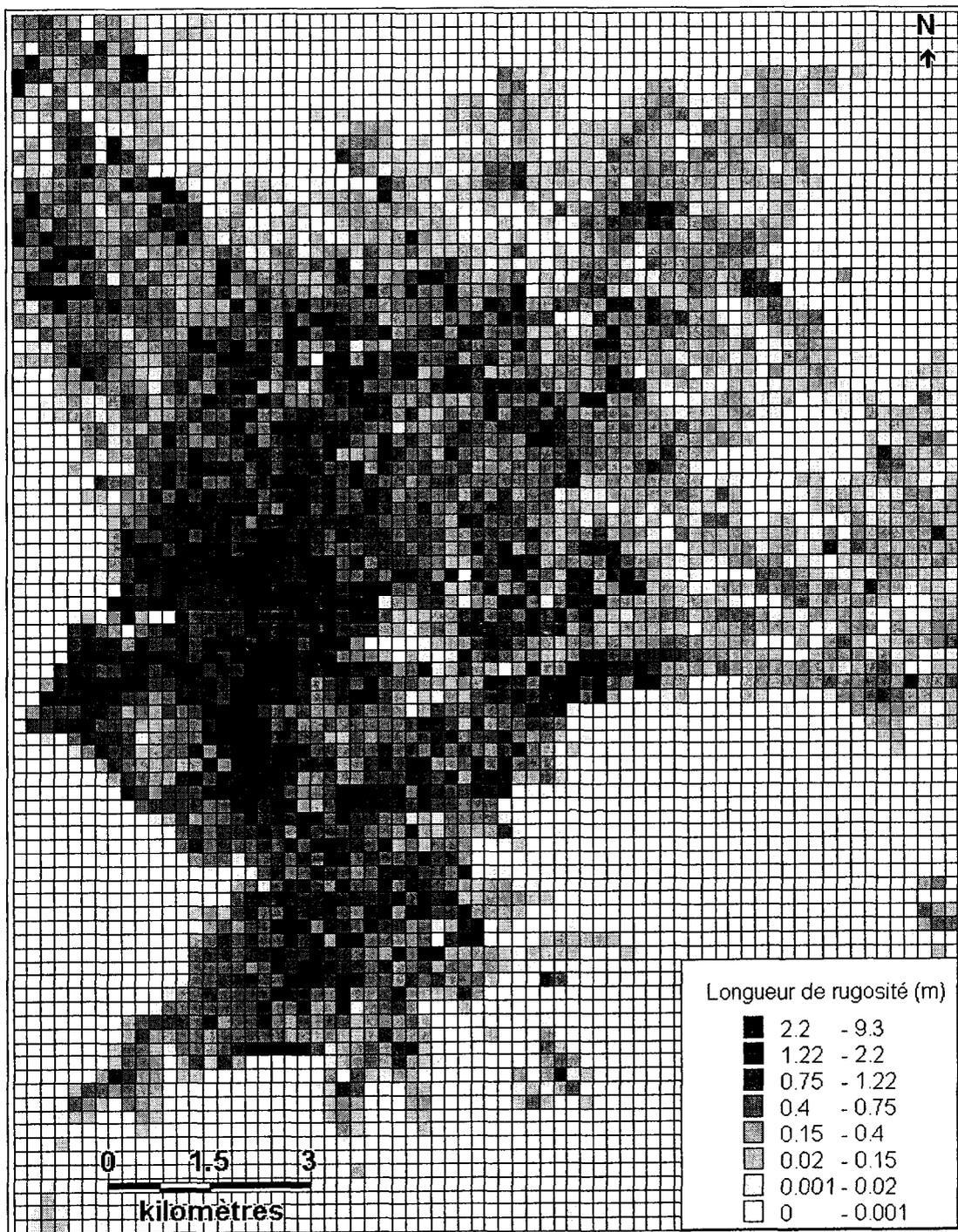
-  Cellules des classes 2 et 5
-  Contour de la classe tissu urbain discontinu

Carte 4-10 : Tissu urbain discontinu de CORINE Land Cover et les classes 2 et 5 de la classification en 6 classes du tissu urbain de Marseille.

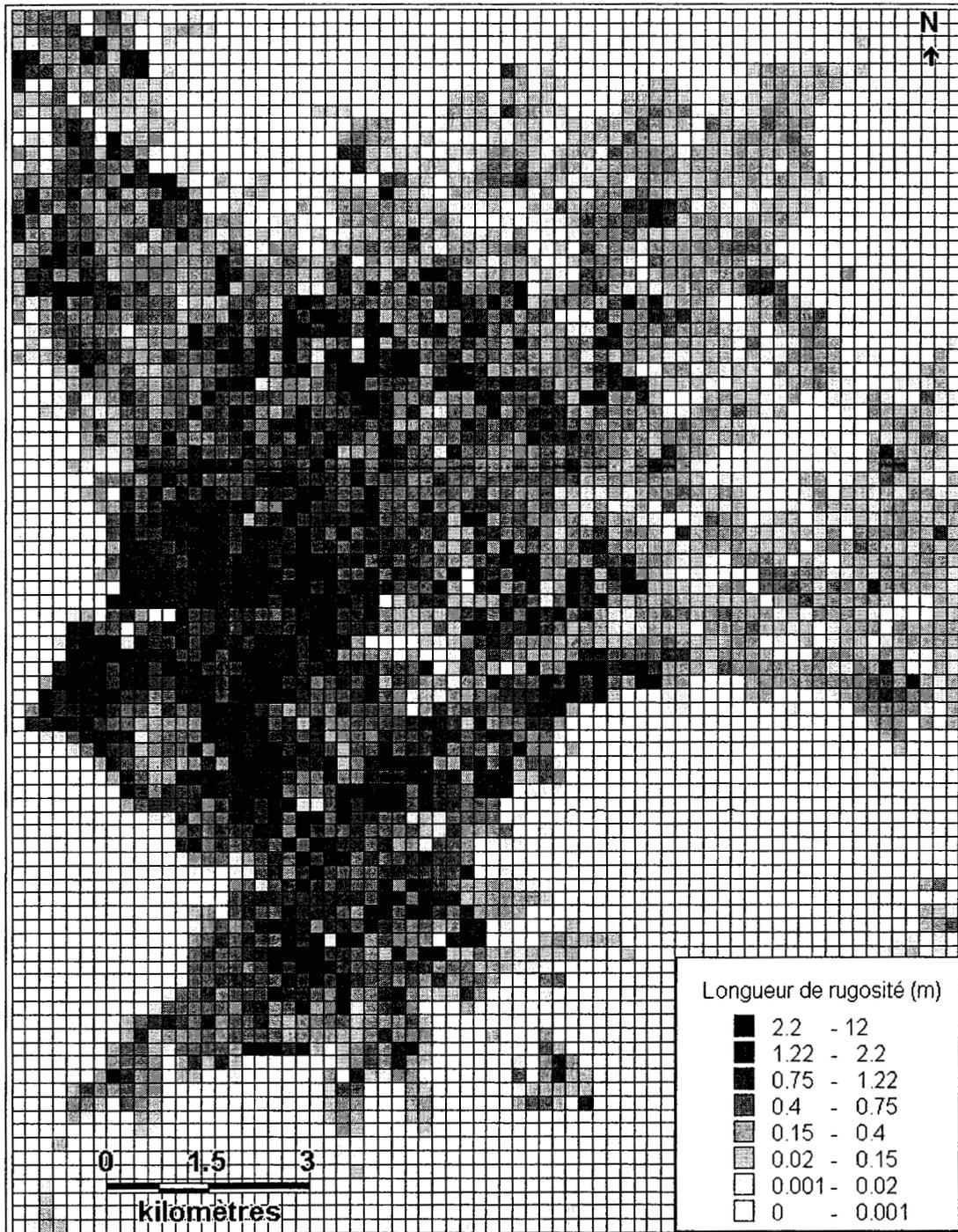


-  Cellules de la classe 3
-  Contour de la classe forêt
-  Contour de la classe Broussaille

Carte 4-11 : Forêts et broussailles de CORINE Land Cover et la classe 3 de la classification en 6 classes du tissu urbain de Marseille.



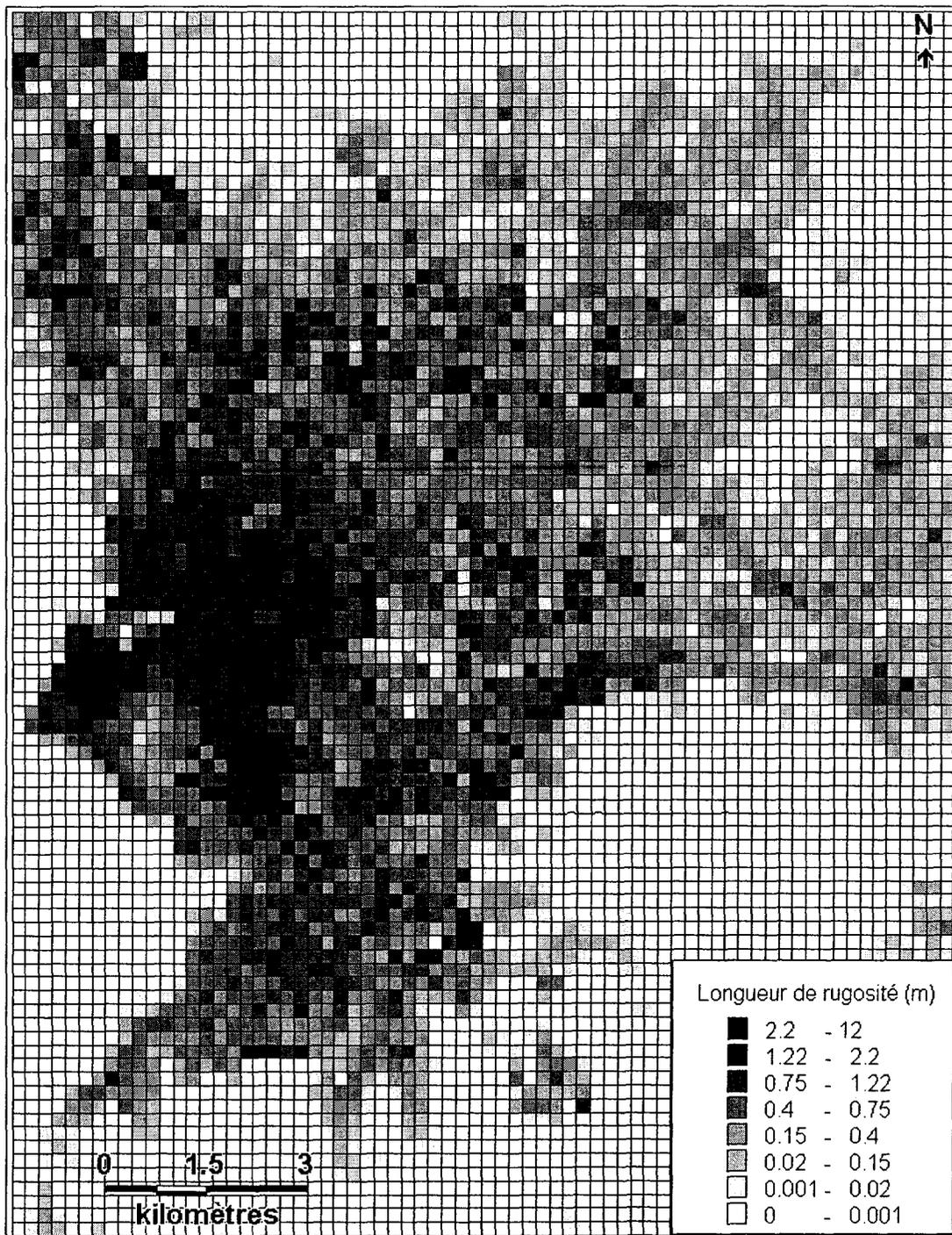
Carte 4-12 : Longueur de rugosité pour un vent de nord d'après le modèle de Bottema



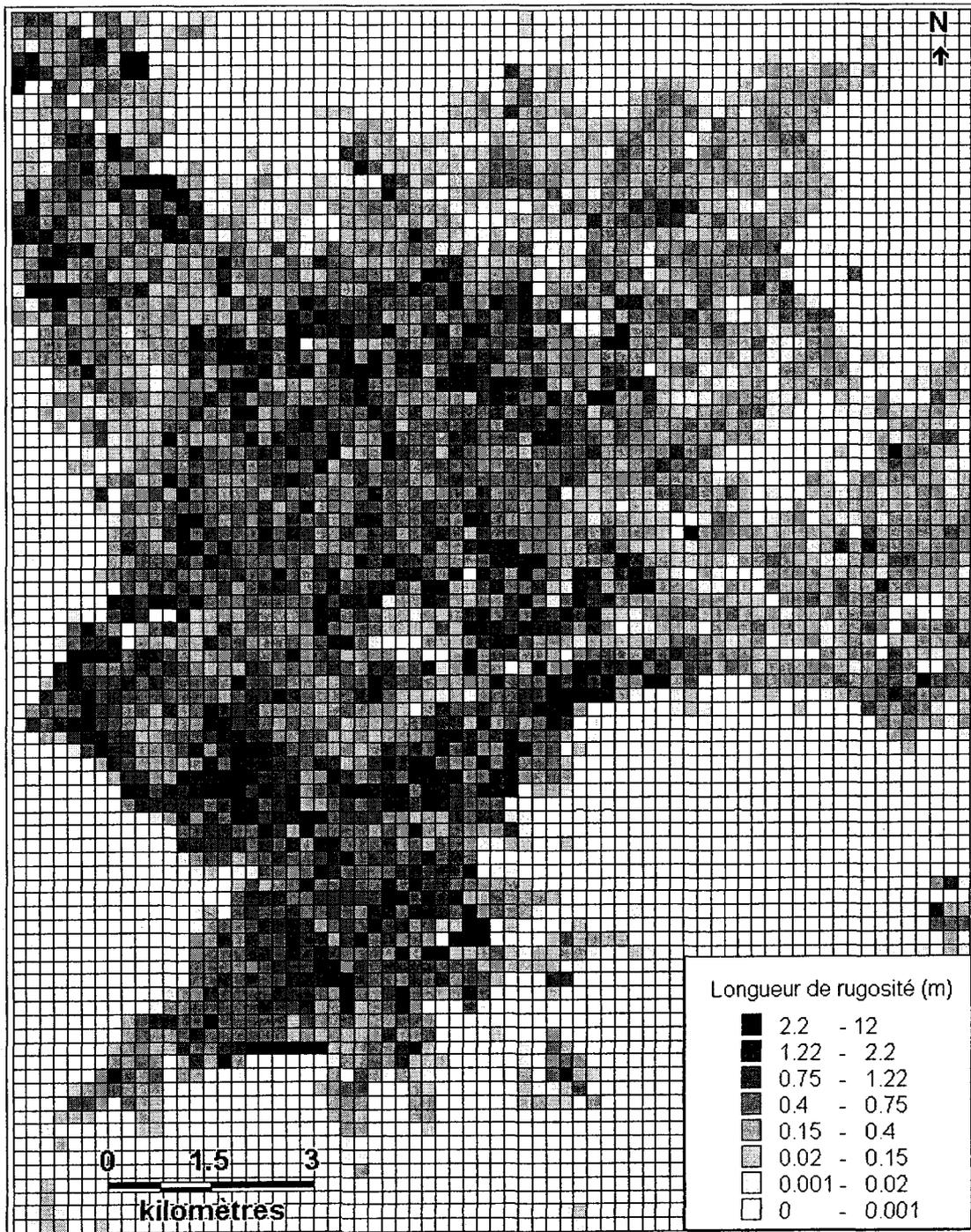
Carte 4-13 : Longueur de rugosité pour un vent d'ouest d'après le modèle de Bottema



Carte 4-14: Longueur de rugosité pour un vent de nord d'après le modèle de Raupach



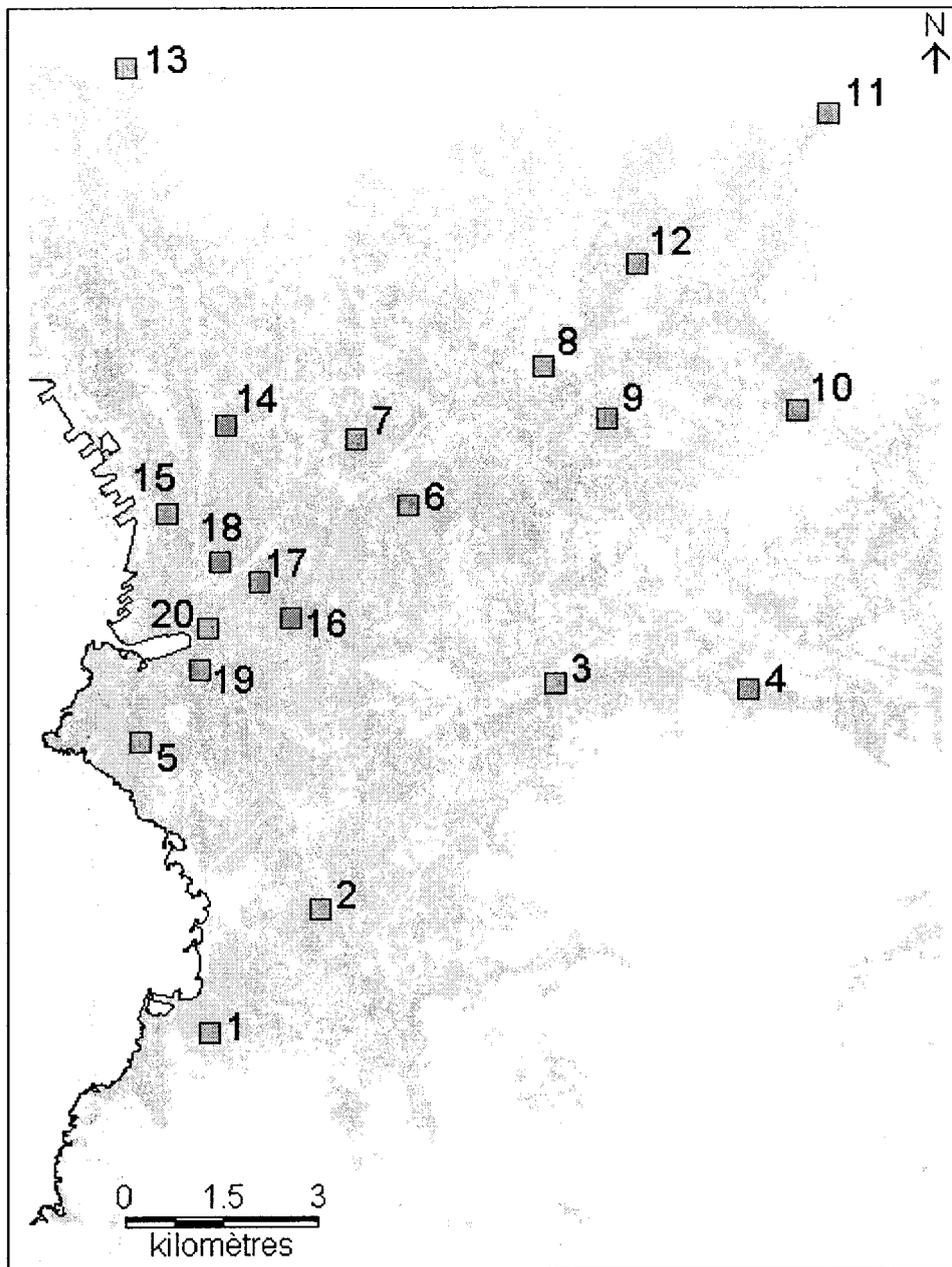
Carte 4-15 : Longueur de rugosité pour un vent d'ouest d'après le modèle de Raupach



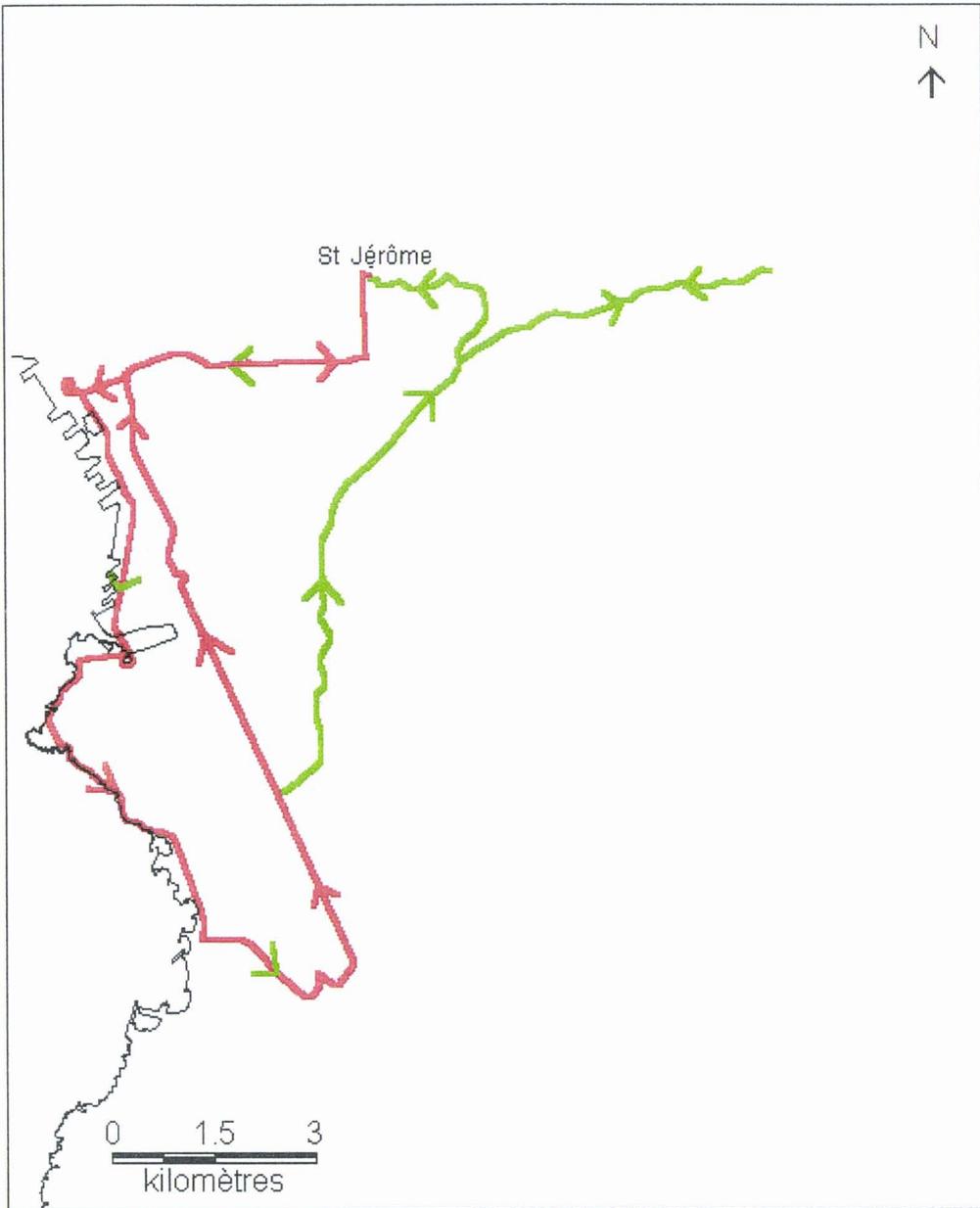
Carte 4-16 : Longueur de rugosité pour un vent de nord d'après le modèle de Macdonald



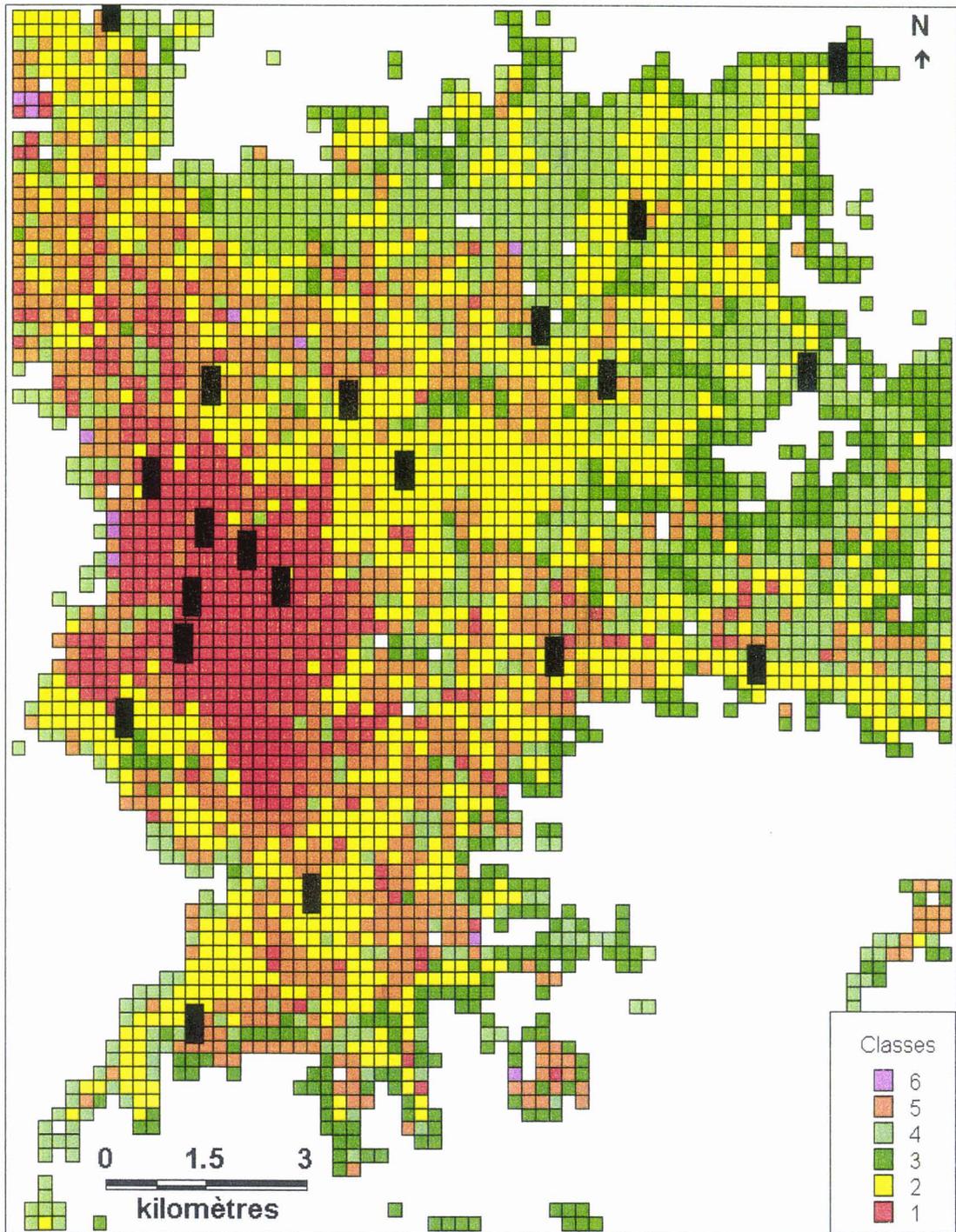
Carte 4-17 : Longueur de rugosité pour un vent d'ouest d'après le modèle de Macdonald



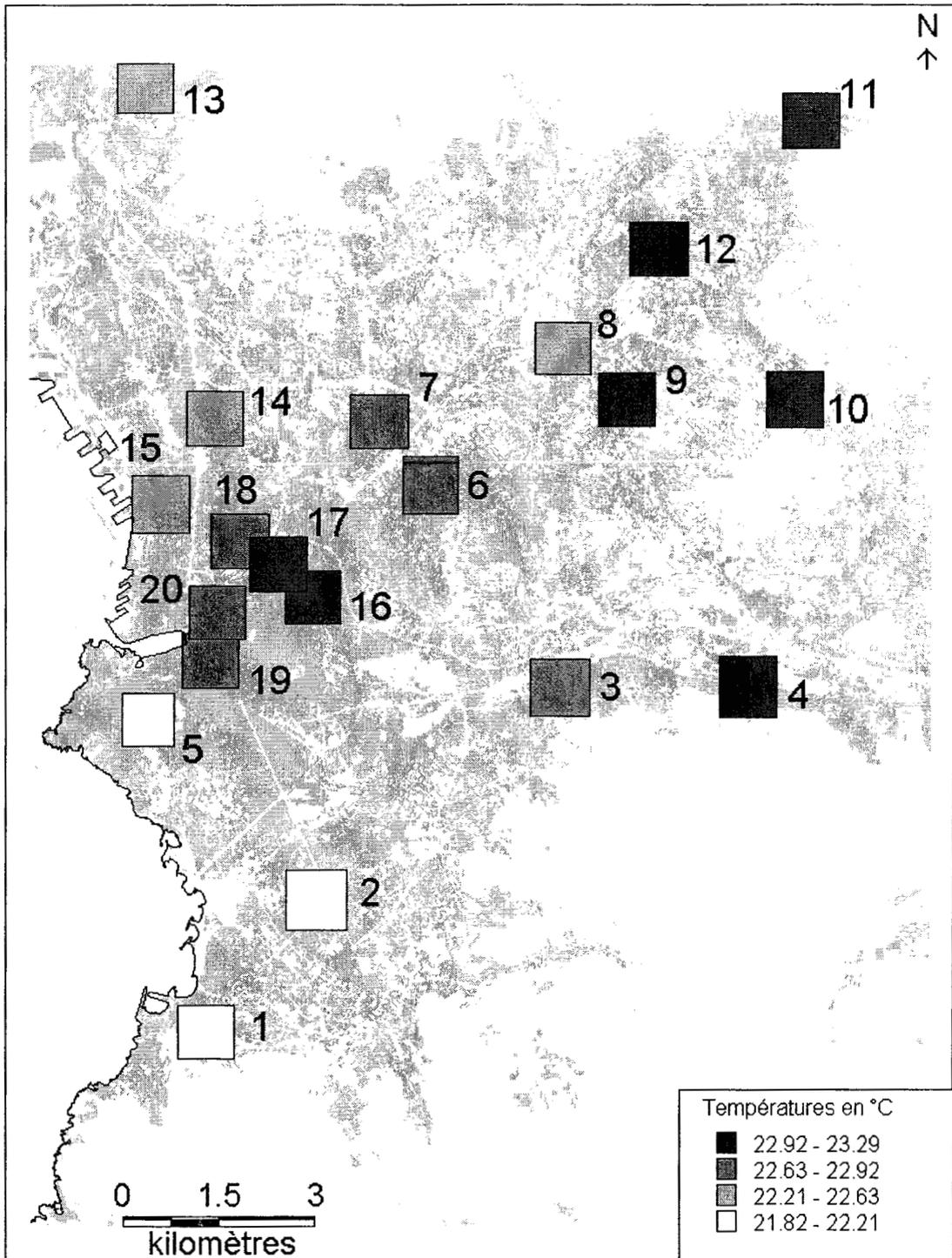
Carte 5-1 : Les capteurs du réseau Pigeon



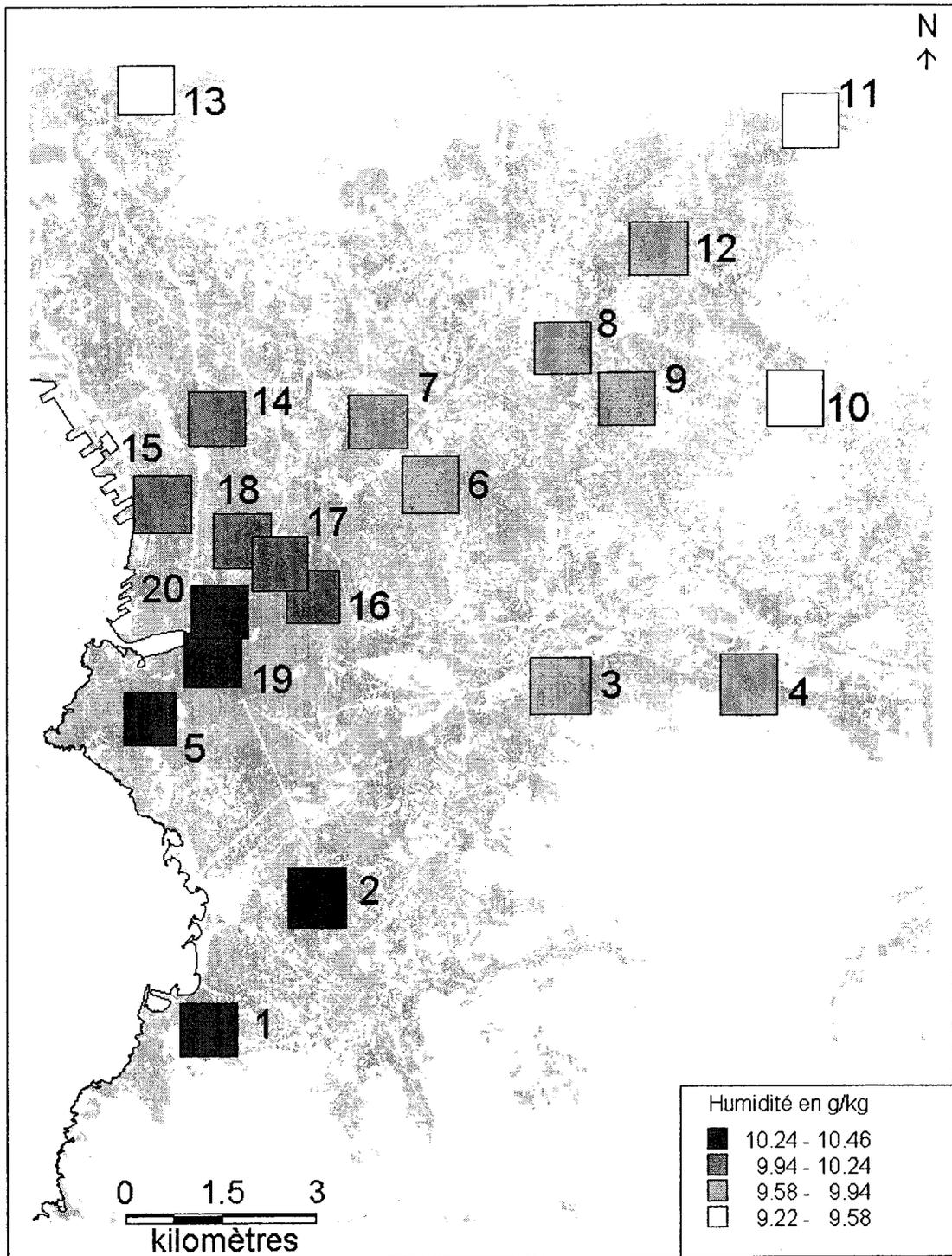
Carte 5-2 : Les trajets parcourus par la voiture à travers Marseille (trajet 1 en rouge, trajet 2 en vert)



Carte 5-3 : Classification en six classes du tissu urbain et les 20 capteurs du réseau Pigeon



Carte 5-4 : Moyennes des températures mesurées par le réseau Pigeon (en fond, les bâtiments en gris clair, le numéro correspond au numéro du capteur)



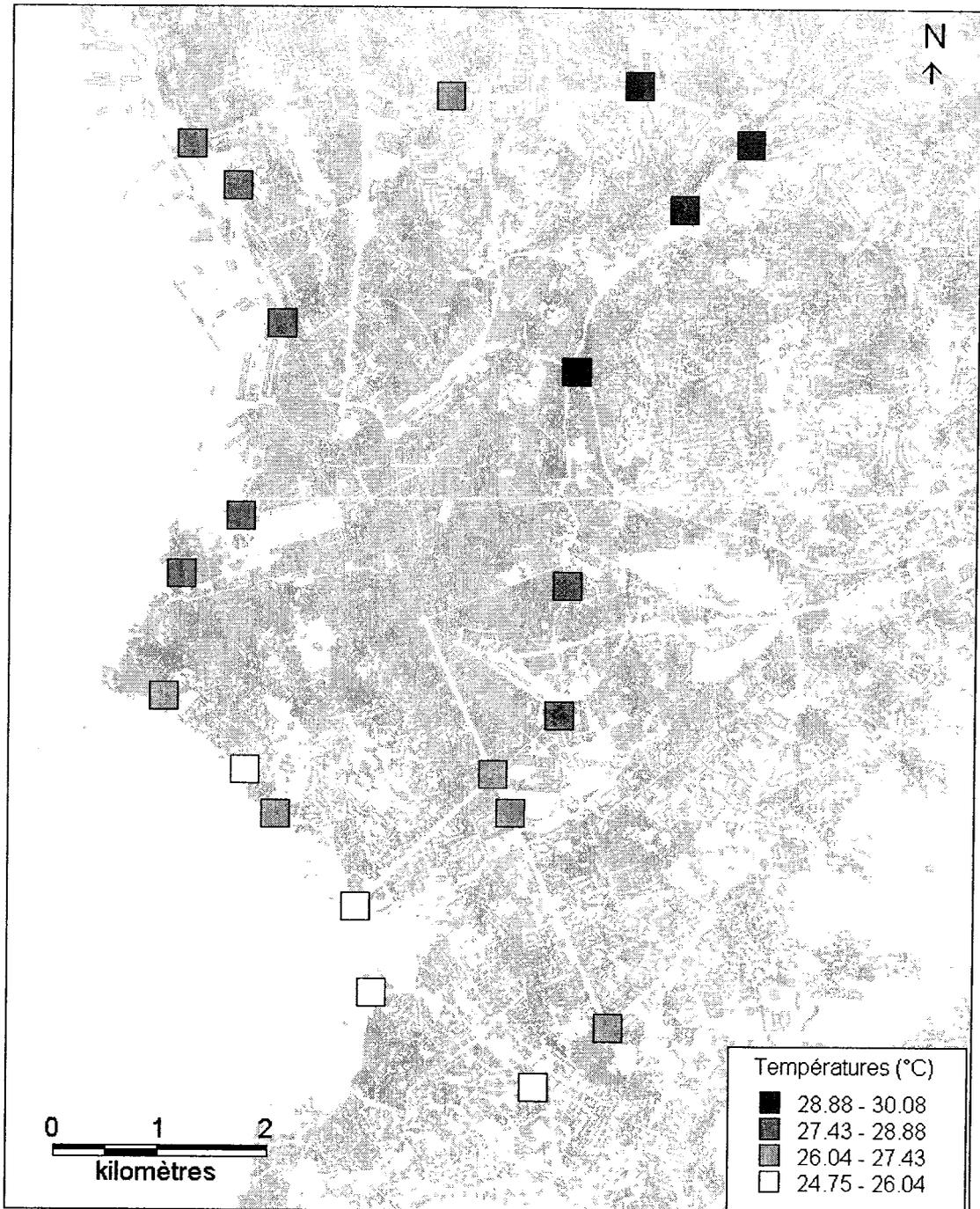
Carte 5-5 : Moyennes de l'humidité mesurées par le réseau Pigeon (en fond, les bâtiments en gris clair, le numéro correspond au numéro du capteur)



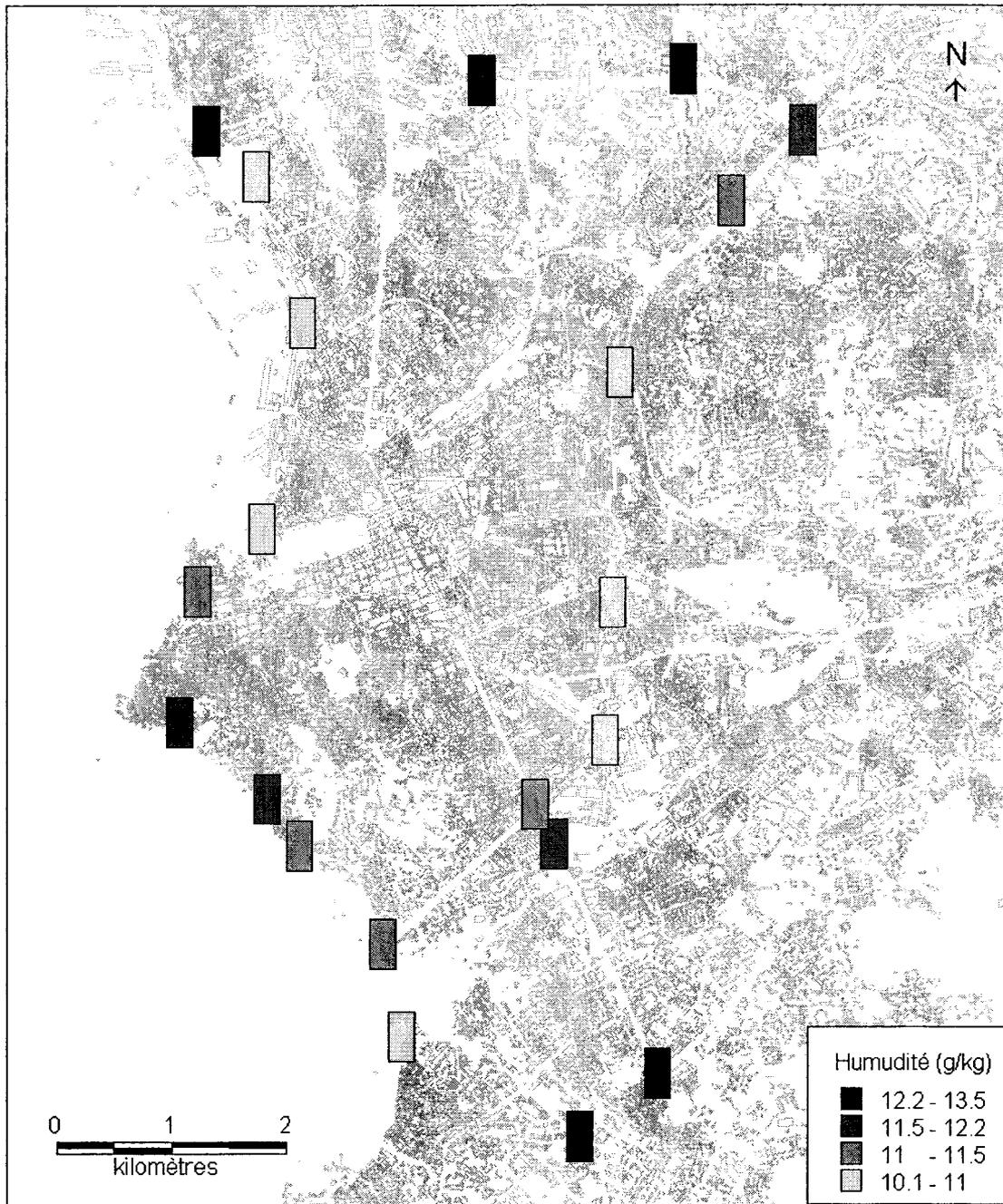
Carte 5-6 : Températures mesurées sur le trajet 1, parcouru le 26 juin



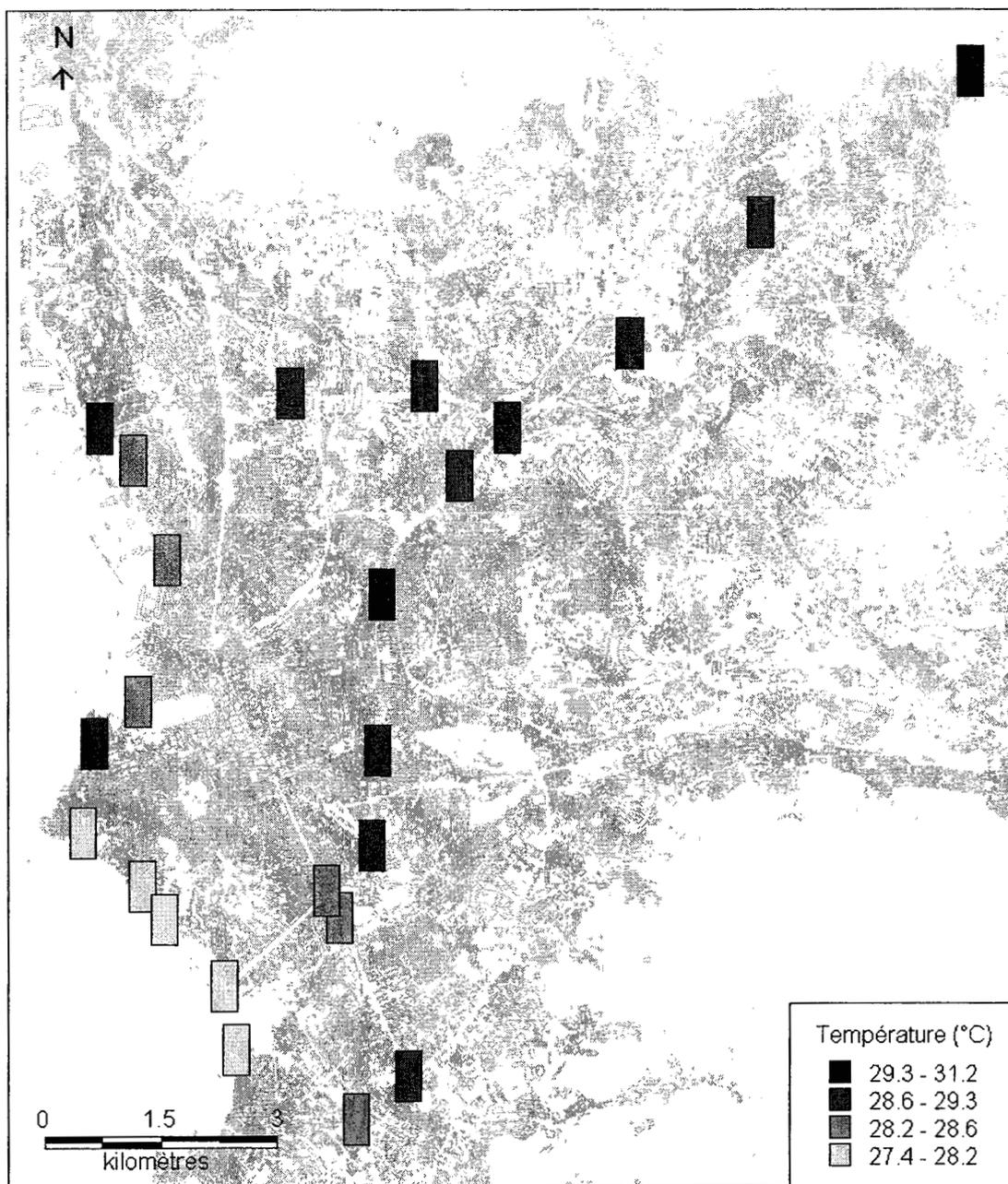
Carte 5-7 : Humidités mesurées sur le trajet 1, parcouru le 26 juin



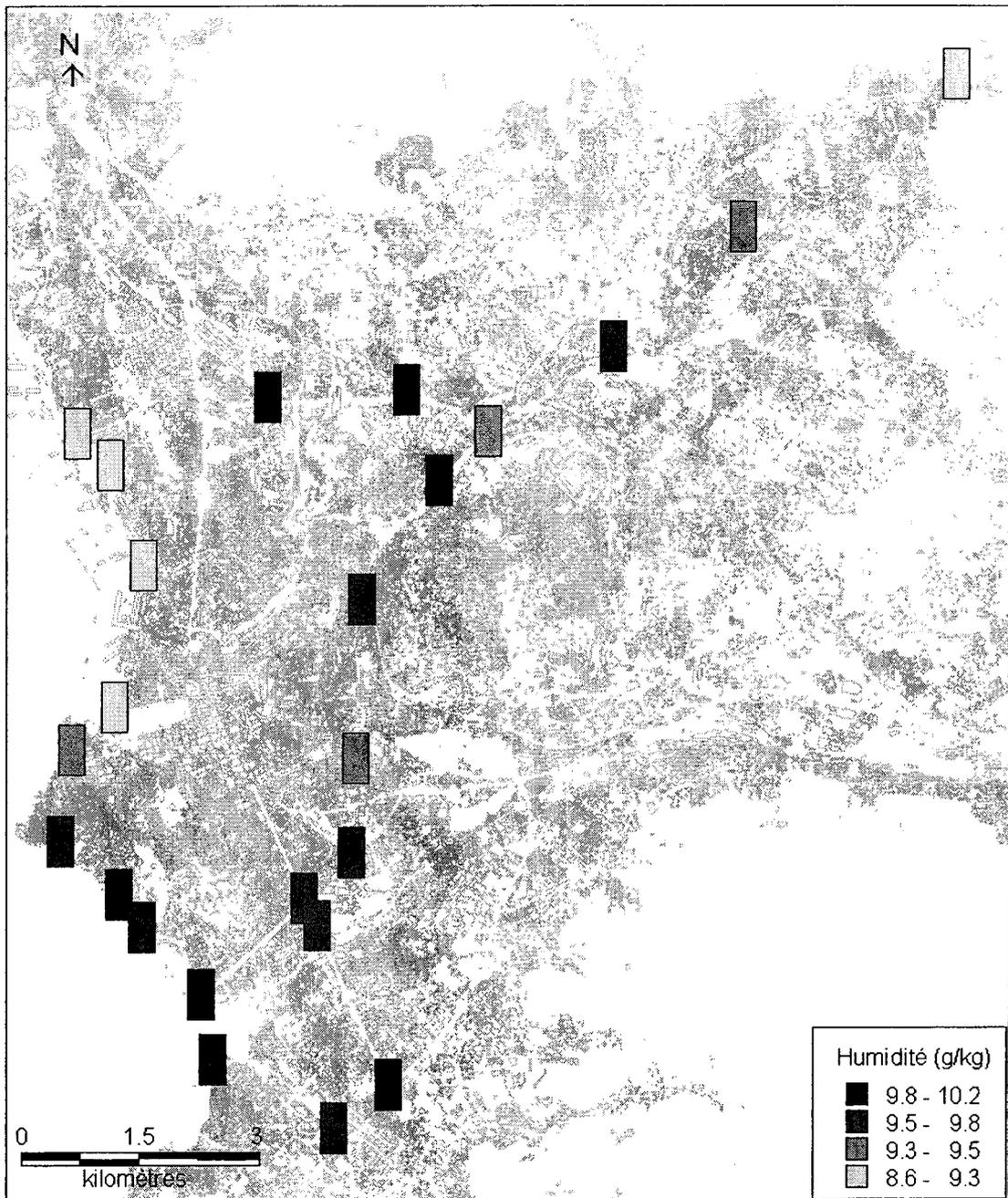
Carte 5-8 : Températures mesurées sur le trajet 2 le 26 juin



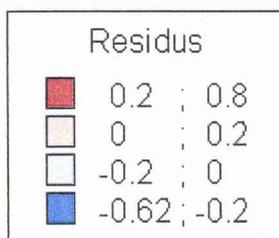
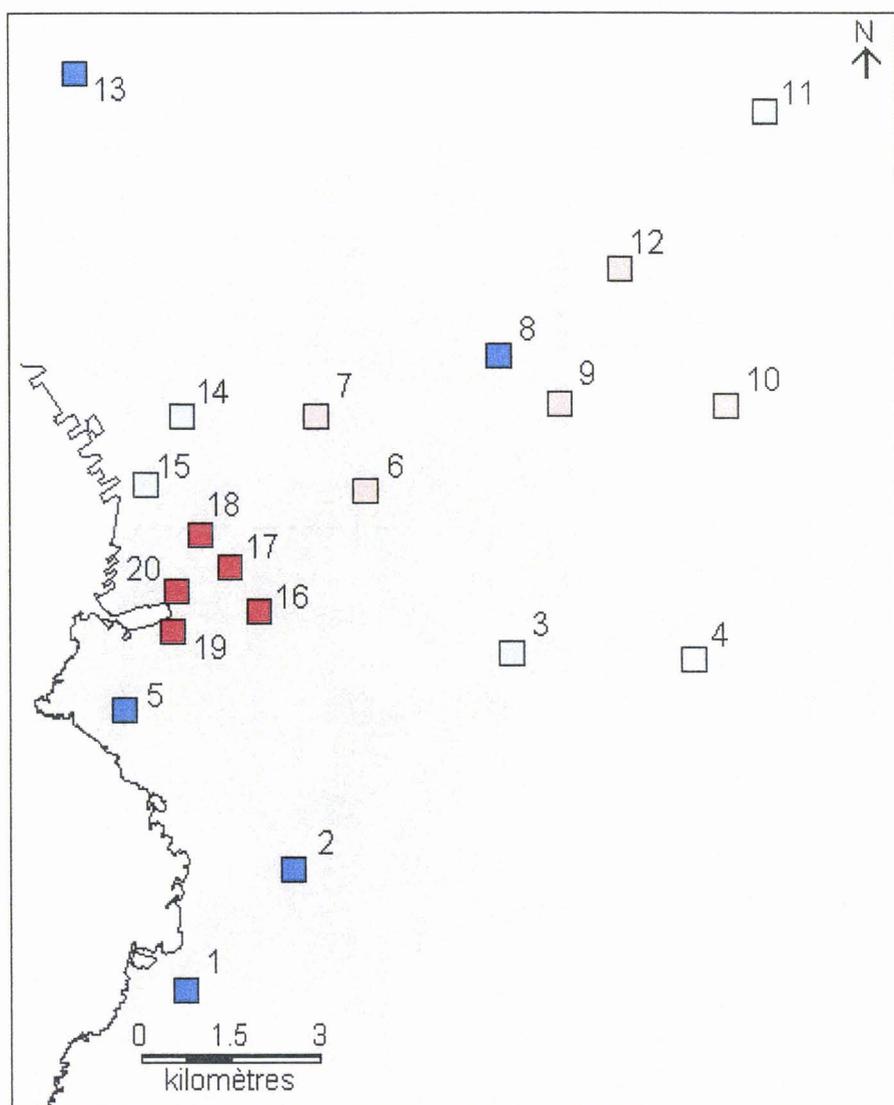
Carte 5-9 : Humidités mesurées sur le circuit 2 le 26 juin



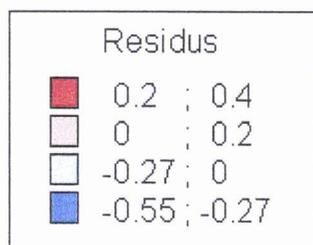
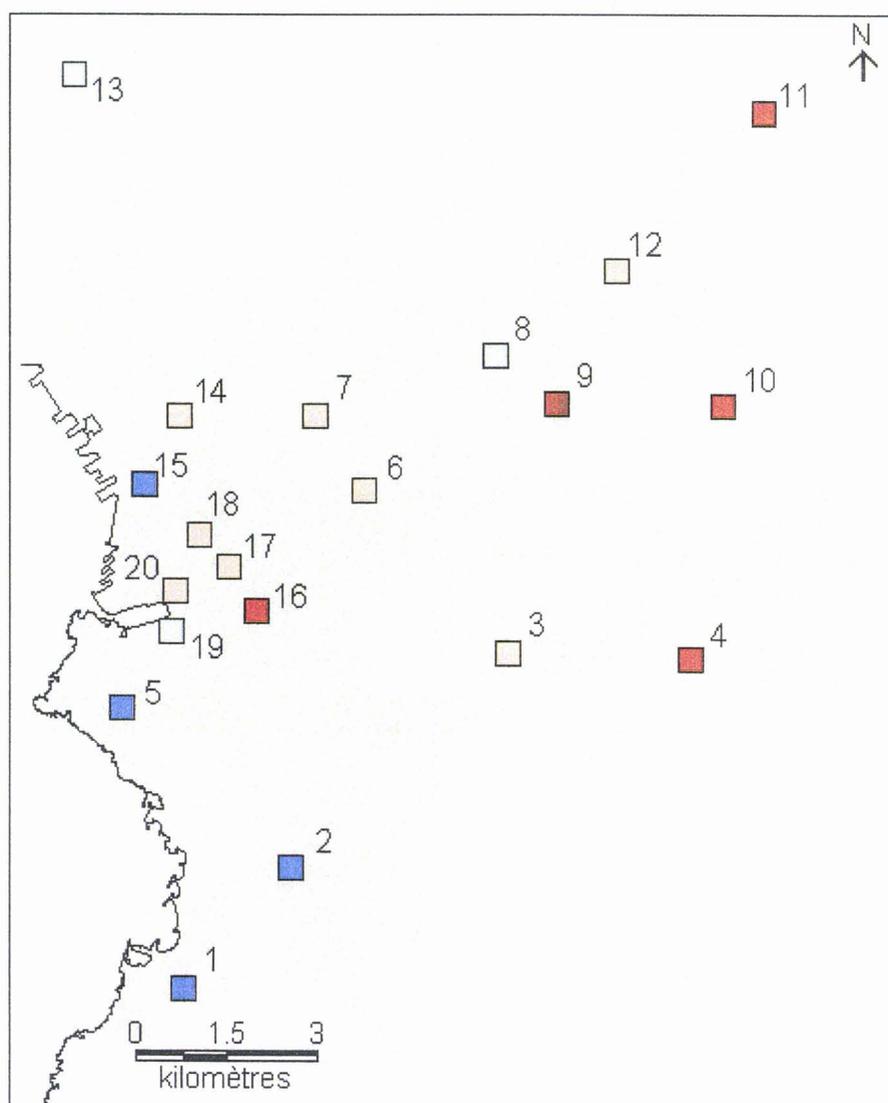
Carte 5-10 : Températures mesurées sur le circuit 2 le 5 juillet



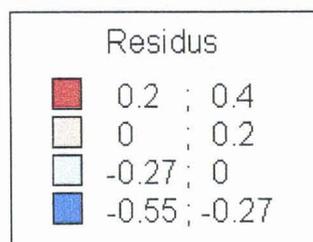
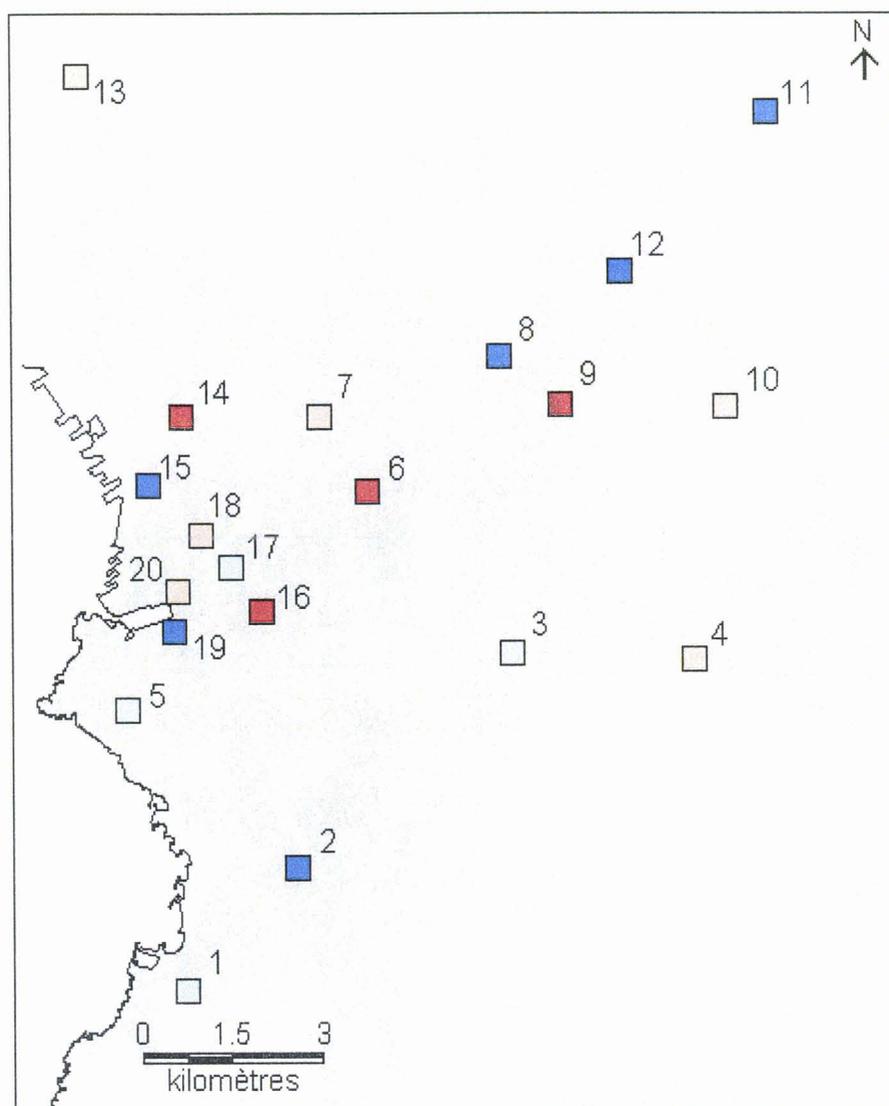
Carte 5-11 : Humidités mesurées sur le trajet 2 le 5 juillet



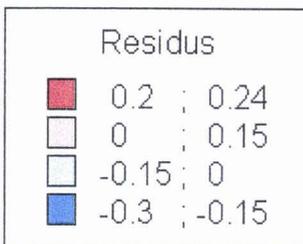
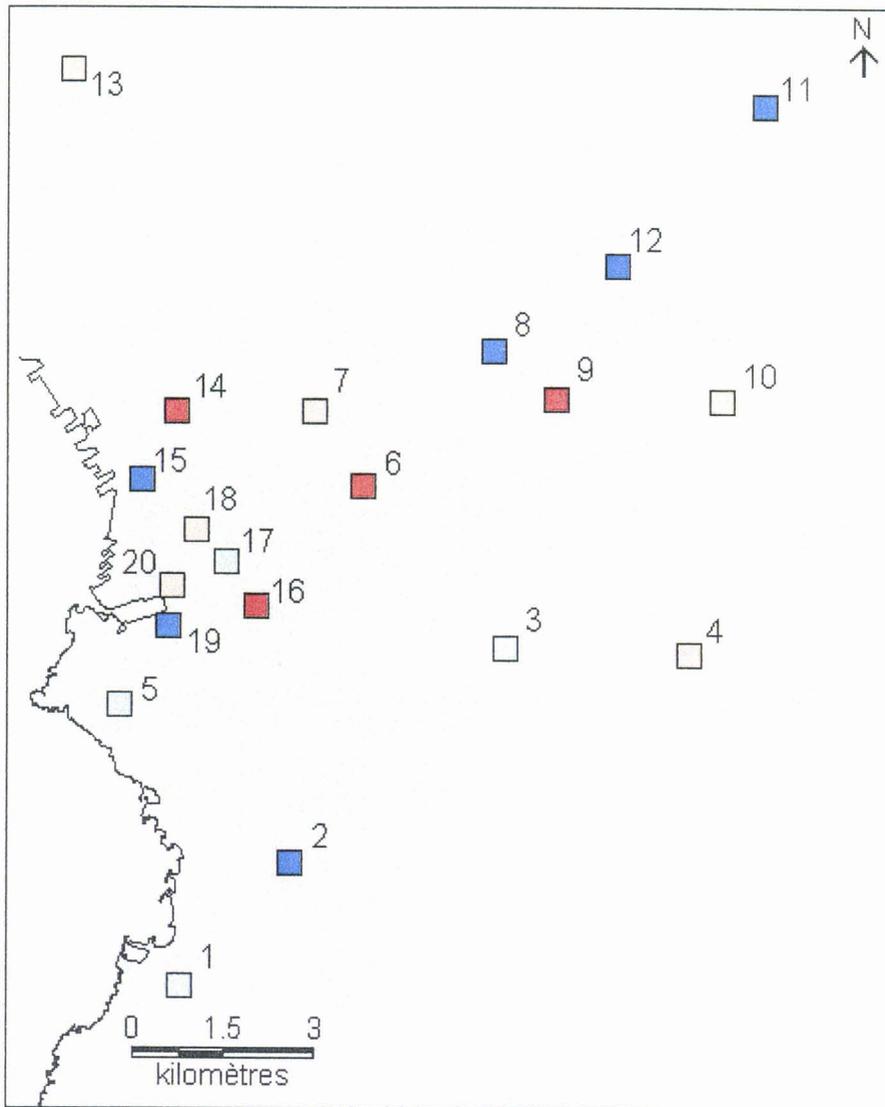
Carte 5-12 : Résidus de la régression 1



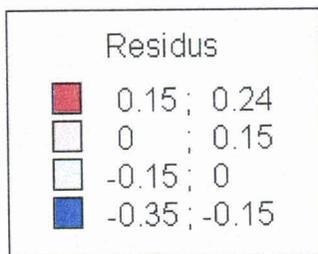
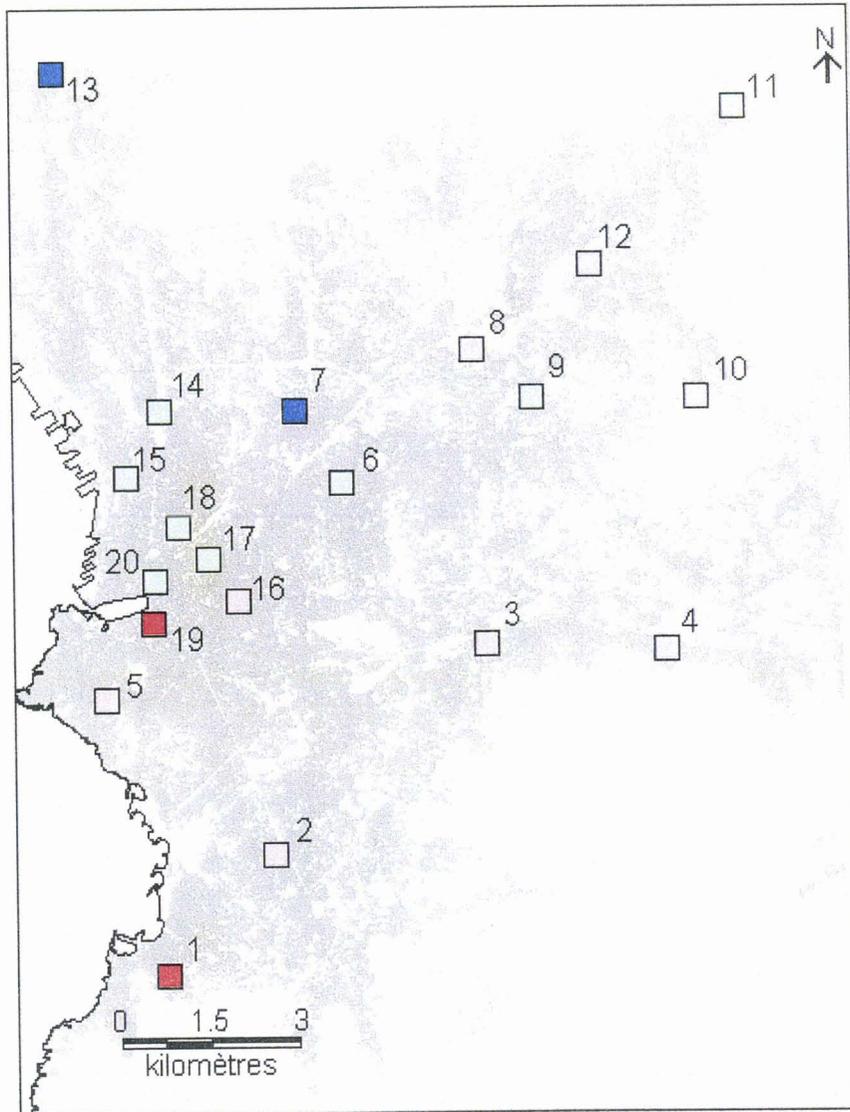
Carte 5-13 : Résidus de la régression 2



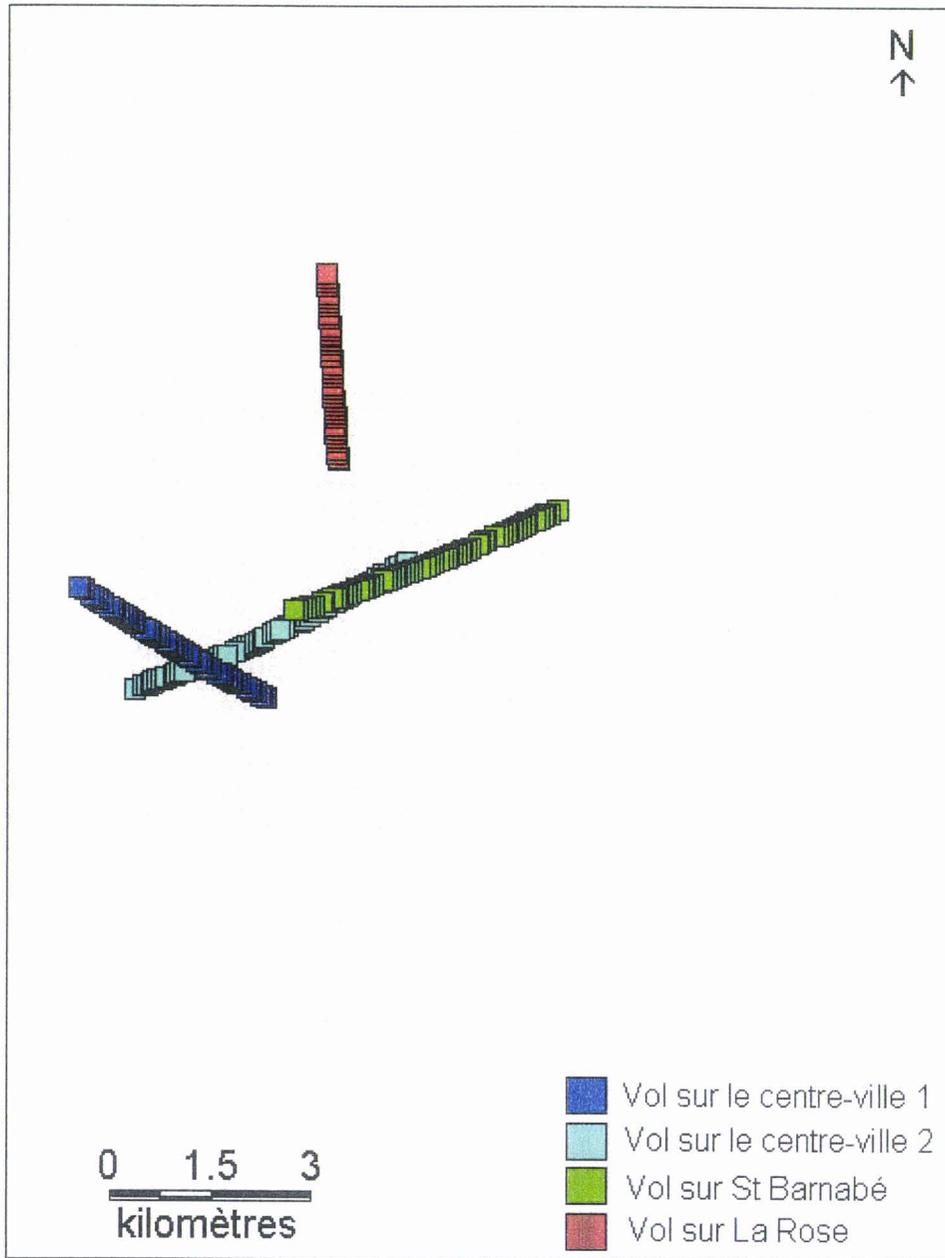
Carte 5-14 : Résidus de la régression 3



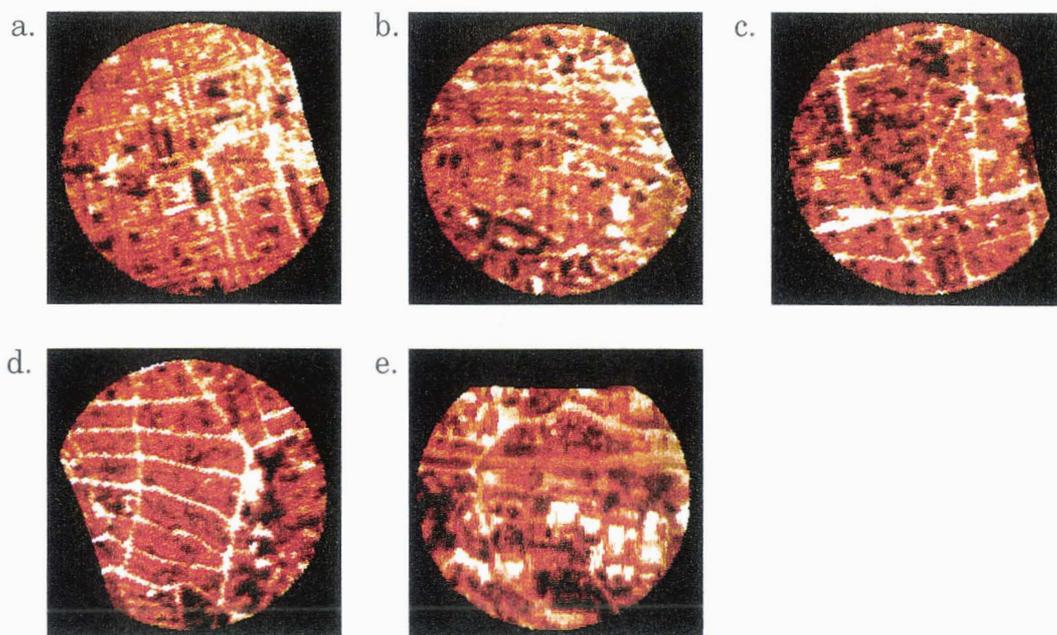
Carte 5-15 : Résidus de la régression 4



Carte 5-16 : Résidus de la régression 5



Carte 5-17 : Les différents vols réalisés sur Marseille



Carte 5-18 : Les températures de surface du centre-ville 1 (a), du centre-ville 2 (b), de St Barnabé 1 (c), de St Barnabé 2 (d) et de La Rose (e).

Annexes

Annexe A

1. La longueur de rugosité

Rappelons que la longueur de rugosité, z_0 , se définit comme une échelle de longueur caractéristique du frottement du vent sur des obstacles micro- ou macroscopiques.

Lorsqu'une couche limite se développe sur un sol plan en conditions stationnaires et spatialement homogènes, sa structure correspond à celle d'une couche à flux constant dans laquelle le flux de quantité de mouvement à une altitude z donnée est égal au flux de quantité de mouvement entre l'air et le sol, appelé frottement.

$$-\rho_a \overline{u'w'}(z) + \rho_a \nu \partial \overline{U}(z) / \partial z = \tau_s \quad (\text{Eq. A1})$$

Le premier terme est le flux turbulent de quantité de mouvement dans la direction verticale, le second est le flux moléculaire, τ_s est le frottement à la surface ; le flux horizontal est nul du fait de l'hypothèse d'homogénéité. ρ_a est la masse volumique de l'air, u' et w' les fluctuations des composantes verticale et horizontale de la vitesse du vent, $\overline{U}(z)$ sa moyenne horizontale à l'altitude z donnée, ν la viscosité cinématique de l'air. Le frottement τ_s dépend seulement de la structure du sol ; le flux total de quantité de mouvement est donc ainsi constant avec l'altitude. L'hypothèse de Boussinesq exprime le flux turbulent de quantité de mouvement sous une forme analogue à celle du flux moléculaire :

$$\overline{\rho u'w'} = \nu_t(z) \partial \overline{U}(z) / \partial z \quad (\text{Eq. A2})$$

dans laquelle ν_t , la viscosité de la turbulence, n'est pas une constante.

Dans la couche de surface atmosphérique, la théorie de similitude de Monin-Obukhov permet de l'écrire sous la forme :

$$v_t(z) = \kappa u_* z \quad (\text{Eq. A3})$$

dans laquelle κ est la constante de von Karman ($\kappa = 0.4$) et u_* est la vitesse de frottement définie par :

$$u_* = (\tau_s / \rho_a)^{1/2} \quad (\text{Eq. A4})$$

Dès que z dépasse quelques centimètres, il apparaît que $v_t(z)$ est supérieur d'un ou deux ordres de grandeur à v et le flux moléculaire négligeable devant le flux turbulent. Il s'ensuit que :

$$-\rho_a \overline{u'w'} = \rho_a v_t(z) \partial \bar{U}(z) / \partial z \equiv \tau_s = \text{constant} \quad (\text{Eq. A5})$$

ou

$$\kappa u_* z \partial \bar{U}(z) / \partial z = u_*^2 \quad (\text{Eq. A6})$$

$$\partial \bar{U}(z) / \partial z = u_* / \kappa z \quad (\text{Eq. A7})$$

ce qui s'intègre pour donner le « profil logarithmique » :

$$U(z) = (u_* / \kappa) \text{Ln}(z/z_0) \quad (\text{Eq. A8})$$

dans lequel z_0 est une constante d'intégration. Il apparaît expérimentalement que z_0 dépend de l'état de surface, de la hauteur et de la structure des éléments de rugosité, mais ne dépend généralement pas de la vitesse du vent. z_0 est l'altitude à laquelle la vitesse du vent s'annulerait si le profil logarithmique était vérifié très près du sol.

La longueur de rugosité peut également être considérée comme une échelle de longueur représentative du frottement au sol. En effet, le coefficient de frottement est défini par :

$$C_D = \bar{U}(z) / u_* \quad (\text{Eq. A9})$$

d'où

$$C_D(z) = \kappa^{-1} \text{Ln}(z/z_0) \quad (\text{Eq. A10})$$

soit

$$z/z_0 = \exp(\kappa C_D(z)) \quad (\text{Eq. A11})$$

ou

$$z_0 = z \exp(-\kappa C_D(z)) \quad (\text{Eq. A12})$$

De nombreux scientifiques se sont basés sur les modèles de Lettau (1969) et de Counihan (1971) pour établir leur propre modèle.

Lettau (1969) a effectué des recherches sur les éléments de rugosité à prendre en compte pour calculer la longueur de rugosité. Il a mené en parallèle des mesures sur site qu'il a ensuite comparé aux résultats de son modèle. Il estime la longueur de rugosité par l'équation :

$$z_0 = 0.5h * \lambda_f \quad (\text{Eq. A13})$$

avec h la hauteur moyenne des éléments de rugosité et λ_f leur densité frontale.

Counihan (1971) a également cherché à estimer la longueur de rugosité d'après des expériences en soufflerie où il modifiait la distribution des éléments de rugosité (modification de la densité surfacique des éléments). L'équation de calcul de la longueur de rugosité est :

$$\frac{z_0}{h} \approx 8.2 \frac{h}{f} + 1.08 \frac{A_R}{A} - 0.08 \quad (\text{Eq. A14})$$

où h représente la hauteur de l'élément de rugosité, f , le fetch, $\frac{A_R}{A}$, la densité surfacique des éléments de rugosité. Pour des conditions à l'équilibre, le rapport $\frac{h}{f}$ est nul.

Quelques longueurs de rugosité peuvent être indiquées (Stull, 1988) :

- sur de la neige, sur une surface d'eau calme ou sur de la glace, la longueur de rugosité est inférieure à 0.002 m ;
- sur de l'herbe rase, elle est de 0.006 m ;
- sur une surface avec des arbres isolés, elle est de 0.02 m ;
- pour une banlieue ou un centre-ville d'une petite ville, elle est comprise entre 0.2 et 1 m ;
- pour un centre-ville d'une grande ville, elle est de 1m ;
- elle reste inférieure à 3 m pour les centre-villes avec de très hauts immeubles ;
- elle varie de 40 à 70 m pour les Montagnes Rocheuses (USA) en considérant les montagnes comme des éléments de rugosité sur un sol plat.

2. La hauteur de déplacement

De la même manière rappelons que la hauteur de déplacement est le plancher « ressenti » par l'écoulement.

Elle apparaît dans le profil logarithmique de la vitesse du vent qui s'écrit en réalité

$$U(z) = (u_* / \kappa) \operatorname{Ln} \left(\frac{z - z_d}{z_0} \right) \quad (\text{Eq. A15})$$

lorsque la hauteur des éléments de rugosité est beaucoup plus grande que Z_0 .

Dans le cas d'une ville, le plancher correspond à environ 1/3 de la hauteur des bâtiments et dans le cas d'une forêt dense à la hauteur du sommet des arbres. La hauteur de déplacement dépend essentiellement de la configuration géométrique des obstacles à la surface. Si la surface ne possède aucun obstacle, la hauteur de déplacement est nulle, au contraire si les obstacles sont denses z_d sera à peu près égale à leur hauteur.

3. Les méthodes de calcul

Il existe deux méthodes pour quantifier ces deux paramètres aérodynamiques :

- la méthode morphométrique ou géométrique qui utilisent des algorithmes reliant les paramètres aérodynamiques à des mesures de morphologie de la surface ;
- la méthode micro-météorologique ou anémométrique qui utilise l'observation des champs de vent ou de turbulence pour calculer des paramètres aérodynamiques à l'aide des relations théoriques dérivées du profil du vent logarithmique.

Cette dernière méthode nécessite donc des mesures sur sites qu'il est très difficile et coûteux d'obtenir. De plus, des conditions doivent être vérifiées pour que cette méthode soit valable, comme l'homogénéité horizontale du sol ; il faut également qu'il soit plat. D'autres précautions doivent être également prises dans la réalisation des mesures. Il est très difficile d'avoir toutes ces conditions en même temps à un endroit précis. La première méthode semble donc moins difficile à mettre en pratique car il existe des bases de données décrivant la morphométrie des surfaces. Cependant, cette dernière se base sur des mesures effectuées dans des souffleries, par exemple sur des cubes de taille uniforme et disposés de manière toujours ordonnée, c'est-à-dire dans des conditions très différentes de celles d'une ville. L'influence de la direction du vent a également été peu analysée avec cette méthode alors que la méthode météorologique l'impose.

Annexe B

1. Le modèle de Bottema

Bottema (1995) base sa méthode sur des paramètres géométriques comme la densité surfacique frontale et la densité surfacique bâtie. La densité surfacique bâtie λ_b est définie comme la surface au sol occupée par le bâtiment A_p par rapport à la surface totale du sol A_T .

$$\lambda_b = \frac{A_p}{A_T} \quad (\text{Eq. B1})$$

La densité frontale λ_f est définie par le rapport entre la surface perpendiculaire à la direction du vent A_F et la surface totale du sol.

$$\lambda_f = \frac{A_F}{A_T} \quad (\text{Eq. B2})$$

La méthode tient compte des abris mutuels générés par les bâtiments en considérant qu'ils sont répartis dans l'espace de manière régulière, soit alignés, soit en quinconce.

Ainsi, l'équation de base du modèle est :

$$z_0 = (z_{ref} - z_d) \exp\left(\frac{\kappa}{\sqrt{0.5\lambda_f C_D}}\right) \quad (\text{Eq. B3})$$

où z_{ref} est la hauteur de référence, C_D le coefficient de frottement et κ la constante de Von Karman (0.4). Il existe une condition pour ce modèle : la densité surfacique des bâtiments doit être supérieure à 5%. Cependant avec une disposition régulière et très espacée des éléments de rugosité, z_d n'est plus une mesure satisfaisante. Elle est remplacée par $z_{d,pl}$ qui pondère le déplacement ascendant entre les rangées d'immeubles.

$$z_{d,pl} = \left(\frac{d_y}{w}\right) z_d \quad (\text{Eq. B4})$$

où d_y est la somme de la largeur du bâtiment et de l'espace le séparant du bâtiment voisin dans la direction perpendiculaire à celle du vent.

On a donc

$$z_0 = (h - z_{d,pl}) \exp\left(-\frac{\kappa}{\sqrt{0.5\lambda_f C_{dh}}}\right) \quad (\text{Eq. B5})$$

Pour le cas de bâtiments disposés en quinconce et en tenant compte des zones de recirculation entre les bâtiments, on a

$$\frac{z_{d,pl}}{h} = \frac{lx + 0.33(L_R + L_f)}{2d_x} \quad \text{pour les faibles densités} \quad (\text{Eq. B6})$$

$$\frac{z_{d,pl}}{h} = \frac{l_x + \left(2 - \frac{s_x + d_x}{L_r + L_f}\right)(s_x + d_x)}{2d_x} \quad \text{pour les fortes densités} \quad (\text{Eq. B7})$$

et donc

$$\frac{z_0}{h} = \frac{(h - z_{d,pl})}{h} \exp\left(-\frac{\kappa}{\sqrt{0.5\lambda_f C_{dh} \frac{s_y}{w}}}\right) \quad (\text{Eq. B8})$$

où L_R et L_F sont les longueurs des zones de sillages aval et frontal des bâtiments, s_x , s_y , et d_x les distances entre bâtiments.

2. Le modèle de Raupach

Raupach (1992) propose un modèle qui est valide pour les petites et moyennes densités surfaciques bâties et pour des dispositions aléatoires et uniformes des bâtiments. Elle est basée sur la répartition du frottement entre les obstacles et le sol. Elle considère surtout que la disposition dans l'espace des obstacles est aléatoire et utilise donc moins de paramètres géométriques que la formule de Bottema.

$$\frac{z_d}{h} = \frac{\tau_R}{\tau} \left(1 - C_{zd} \frac{u_*}{U_h} \sqrt{\frac{b}{h\lambda_B}}\right) \quad (\text{Eq. B9})$$

$$\frac{z_d}{h} = \frac{\beta\lambda_B}{1 + \beta\lambda_B} \left(1 - C_{zd} \frac{u_*}{U_h} \sqrt{\frac{b}{h\lambda_B}}\right) \quad \text{avec} \quad \beta = \frac{C_{dh}}{2C_s} \quad (\text{Eq. B10})$$

où τ_R est la contribution des bâtiment au frottement total τ , C_{zd} est une constante valant 0.6 (valeur proposée par Raupach, 1992).

La longueur de rugosité est ainsi calculée :

$$z_0 = (h - z_d) \exp(-\Psi_{RSL}) \exp\left(-\kappa \frac{U_h}{u_*}\right) \quad (\text{Eq. B11})$$

avec $\Psi_{RSL} = 0.07$ comme terme correcteur.

3. Le modèle de Macdonald

Enfin, Macdonald (1998), propose un modèle pour calculer la longueur de rugosité dont les coefficients ont été déterminés à partir de mesures en soufflerie. Il tient compte de la disposition des éléments de rugosité dans l'espace et de la densité frontale. Il propose enfin de rajouter à son équation un facteur de correction β qu'il évalue à 0.55 pour une disposition régulière des éléments de rugosité.

$$\frac{z_0}{h} = \left(1 - \frac{Z_d}{h}\right) \exp\left(-\left(0.5\beta \frac{C_D}{\kappa^2} (1 - Z_d/h)\lambda_f\right)^{-0.5}\right) \quad (\text{Eq. B12})$$

$$\text{où } \frac{Z_d}{h} = 1 + A^{-\lambda_B} (\lambda_B - 1) \quad (\text{Eq. B13})$$

avec A , une constante évaluée à 4.43 pour une disposition en décalé des éléments et 3.59 pour une disposition régulière carré et C_D , un coefficient de frottement de référence (Macdonald, 1998)

4. Le modèle de Bottema simplifié

A partir d'étude de sensibilité de son modèle complet, Bottema (1995) a proposé un modèle simplifié pour les zones urbaines homogènes mais peu régulières utilisant pour Z_0 l'Eq. B3 et pour Z_d l'équation « synthétique »

$$Z_d = \lambda_B^{0.6} \quad (\text{Eq. B14})$$

Annexe C



Photo 1 : Photo aérienne du centre-ville de Marseille



Photo 2 : Photo aérienne d'une zone d'habitat collectif de Marseille



Photo 3 : Photo aérienne d'une zone d'habitat individuel de Marseille



Photo 4 : Photo aérienne d'une zone industrielle de Marseille

Annexe D

	<i>cl1 - cl2</i>	<i>cl1 - cl3</i>	<i>cl1 - cl4</i>	<i>cl1 - cl5</i>	<i>cl1 - cl6</i>	<i>cl1 - cl7</i>
compacité	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
dens_bat	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
espace	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
hauteur	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
nb_bat	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
périmètre	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
volume	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
dens_rout	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
dens_veg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
dens_hydro	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.719
	<i>cl2 - cl3</i>	<i>cl2 - cl4</i>	<i>cl2 - cl5</i>	<i>cl2 - cl6</i>	<i>cl2 - cl7</i>	<i>cl3 - cl4</i>
compacité	0.022	0.000	0.000	0.824	0.000	0.000
dens_bat	0.000	0.000	0.000	0.159	0.000	0.000
espace	0.018	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
hauteur	0.249	0.000	0.000	0.375	0.000	0.000
nb_bat	0.087	0.000	0.000	0.055	0.000	0.000
périmètre	0.000	0.000	0.000	0.759	0.000	0.000
volume	0.013	0.000	0.000	0.539	0.000	0.000
dens_rout	0.000	0.000	0.000	0.783	0.000	0.000
dens_veg	0.000	0.008	0.030	0.000	0.000	0.000
dens_hydro	0.000	0.003	0.416	0.000	0.000	0.000
	<i>cl3 - cl5</i>	<i>cl3 - cl6</i>	<i>cl3 - cl7</i>	<i>cl4 - cl5</i>	<i>cl4 - cl6</i>	<i>cl4 - cl7</i>
compacité	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000	0.004
dens_bat	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
espace	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
hauteur	0.000	0.041	0.000	0.000	0.000	0.006
nb_bat	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
périmètre	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002
volume	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.270
dens_rout	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
dens_veg	0.000	0.000	0.000	0.797	0.000	0.000
dens_hydro	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	<i>cl5 - cl6</i>	<i>cl5 - cl7</i>	<i>cl6 - cl7</i>			
compacité	0.000	0.000	0.000			
dens_bat	0.000	0.000	0.000			
espace	0.000	0.000	0.000			
hauteur	0.000	0.000	0.000			
nb_bat	0.000	0.000	0.000			
périmètre	0.000	0.000	0.000			
volume	0.000	0.000	0.000			
dens_rout	0.000	0.000	0.000			
dens_veg	0.000	0.000	0.000			
dens_hydro	0.000	0.006	0.000			

Tableau D1 : Probabilités du test *t* de Student pour chaque variable des 7 classes de la classification de Marseille

	<i>cl1 - cl2</i>	<i>cl1 - cl3</i>	<i>cl1 - cl4</i>	<i>cl1 - cl5</i>	<i>cl1 - cl6</i>	<i>cl2 - cl3</i>
compacité	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.402
dens_bat	0.000	0.000	0.000	0.000	0.436	0.000
espace	0.000	0.000	0.000	0.000	0.304	0.000
hauteur	0.000	0.000	0.000	0.004	0.243	0.000
nb_bat	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
périmètre	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
volume	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
dens_rout	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
dens_veg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	<i>cl2 - cl4</i>	<i>cl2 - cl5</i>	<i>cl2 - cl6</i>	<i>cl3 - cl4</i>	<i>cl3 - cl5</i>	<i>cl3 - cl6</i>
compacité	0.879	0.000	0.000	0.550	0.000	0.000
dens_bat	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
espace	0.000	0.000	0.992	0.000	0.000	0.000
hauteur	0.000	0.000	0.000	0.036	0.000	0.000
nb_bat	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
périmètre	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
volume	0.000	0.000	0.000	0.189	0.000	0.000
dens_rout	0.000	0.000	0.894	0.000	0.000	0.000
dens_veg	0.000	0.888	0.000	0.000	0.000	0.185
	<i>cl4 - cl5</i>	<i>cl4 - cl6</i>	<i>cl5 - cl6</i>			
compacité	0.000	0.000	0.000			
dens_bat	0.000	0.000	0.000			
espace	0.000	0.000	0.002			
hauteur	0.000	0.000	0.090			
nb_bat	0.000	0.000	0.000			
périmètre	0.000	0.000	0.000			
volume	0.000	0.000	0.000			
dens_rout	0.403	0.337	0.392			
dens_veg	0.000	0.885	0.000			

Tableau D2 : Probabilités du test t de Student pour chaque variable des 6 classes de la classification du tissu urbain de Marseille

	<i>cl1 - cl2</i>	<i>cl1 - cl3</i>	<i>cl1 - cl4</i>	<i>cl1 - cl5</i>	<i>cl1 - cl6</i>	<i>cl1 - cl7</i>
compacité	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
dens_bat	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
espace	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
hauteur	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.014
nb_bat	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
périmètre	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
volume	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
dens_rout	0.622	0.000	0.000	0.000	0.000	0.155
dens_veg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.000
	<i>cl1 - cl8</i>	<i>cl1 - cl9</i>	<i>cl2 - cl3</i>	<i>cl2 - cl4</i>	<i>cl2 - cl5</i>	<i>cl2 - cl6</i>
compacité	0.000	0.532	0.176	0.000	0.000	0.000
dens_bat	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
espace	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
hauteur	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
nb_bat	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
périmètre	0.000	0.000	0.000	0.190	0.000	0.000
volume	0.000	0.000	0.033	0.105	0.000	0.000
dens_rout	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
dens_veg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.065	0.000
	<i>cl2 - cl7</i>	<i>cl2 - cl8</i>	<i>cl2 - cl9</i>	<i>cl3 - cl4</i>	<i>cl3 - cl5</i>	<i>cl3 - cl6</i>
compacité	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000
dens_bat	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
espace	0.000	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000
hauteur	0.000	0.000	0.000	0.066	0.000	0.000
nb_bat	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.000
périmètre	0.000	0.000	0.130	0.000	0.000	0.000
volume	0.000	0.000	0.000	0.009	0.000	0.000
dens_rout	0.192	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
dens_veg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	<i>cl3 - cl7</i>	<i>cl3 - cl8</i>	<i>cl3 - cl9</i>	<i>cl4 - cl5</i>	<i>cl4 - cl6</i>	<i>cl4 - cl7</i>
compacité	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
dens_bat	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
espace	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
hauteur	0.000	0.000	0.155	0.000	0.000	0.000
nb_bat	0.038	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
périmètre	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000
volume	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
dens_rout	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.032
dens_veg	0.452	0.000	0.000	0.000	0.000	0.085
	<i>cl4 - cl8</i>	<i>cl4 - cl9</i>	<i>cl5 - cl6</i>	<i>cl5 - cl7</i>	<i>cl5 - cl8</i>	<i>cl5 - cl9</i>
compacité	0.000	0.000	0.083	0.000	0.000	0.000
dens_bat	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
espace	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
hauteur	0.000	0.472	0.000	0.006	0.001	0.000
nb_bat	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
périmètre	0.000	0.421	0.000	0.000	0.000	0.000
volume	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000
dens_rout	0.000	0.000	0.000	0.036	0.000	0.000
dens_veg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

	<i>cl6 - cl7</i>	<i>cl6 - cl8</i>	<i>cl6 - cl9</i>	<i>cl7 - cl8</i>	<i>cl7 - cl9</i>	<i>cl8 - cl9</i>
compacité	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
dens_bat	0.017	0.000	0.000	0.997	0.000	0.000
espace	0.001	0.158	0.000	0.019	0.000	0.000
hauteur	0.083	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000
nb_bat	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
périmètre	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
volume	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
dens_rout	0.660	0.638	0.000	0.854	0.000	0.000
dens_veg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.619	0.000

Tableau D3 : Probabilités du test t de Student pour chaque variable des 9 classes de la classification du tissu urbain de Marseille

