

UNIVERSITÉ DE NANTES
Ecole polytechnique de l'Université de Nantes

ÉCOLE DOCTORALE
« Sciences pour l'ingénieur, Géosciences, Architecture »

Année 2010

N° attribué par la bibliothèque

E	D	4	9	8	-	1	2	7
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Caractérisation environnementale et comportementale des parcours piétonniers en milieu urbain

THÈSE DE DOCTORAT
Discipline : Sciences pour l'ingénieur
Spécialité : Architecture

*Présentée
et soutenue publiquement par*

Elyes ZEKRI

Le 7 octobre 2010, devant le jury ci-dessous

Présidente Mme Catherine SÉMIDOR, Professeure, École nationale supérieure d'architecture et de
paysage de Bordeaux

Rapporteurs M. Stéphane DONIKIAN, DR INRIA, IRISA
M. Jean-Christophe FOLTÊTE, Professeur, Université de Franche-Comté

Co-encadrant M. Alain LEGENDRE, CR CNRS, laboratoire ESO UMR 6590

Directeur de thèse :

M. Gérard HÉGRON, DR LCPC

ED 498

Résumé et mots clés

CARACTERISATION ENVIRONNEMENTALE ET COMPORTEMENTALE DES PARCOURS PIETONNIERS EN MILIEU URBAIN

Les professionnels de l'aménagement urbain semblent prendre de plus en plus conscience de l'influence des facteurs physiques de l'environnement sur le comportement piétonnier, et particulièrement sur la marche, dans les espaces publics. Toutefois, lors de la phase de conception, la prise en compte des aspects sensibles et notamment du caractère dynamique des stimuli perçus semble encore insuffisante.

Dans ce contexte, nous proposons une démarche méthodologique visant la caractérisation des parcours piétonniers du point de vue microclimatique et comportemental. Cette démarche se base sur le croisement des données microclimatiques urbaines avec les résultats d'observations et de suivis (enregistrements vidéo) du comportement des usagers.

Pour atteindre cet objectif, la première phase de notre démarche consiste à développer une méthode d'analyse des variables microclimatiques simulées et des indicateurs de confort le long de parcours piétonniers. Celle-ci débouche sur une classification de ces signaux microclimatiques prenant en compte leur dimension dynamique au cours cheminements. Dans une seconde phase, nous procédons à une analyse des parcours du point de vue comportemental (durée de déplacement, nombre et durée des arrêts...). Enfin, en nous appuyant sur des analyses statistiques, nous proposons une procédure devant permettre d'identifier les relations entre les données microclimatiques et les données comportementales.

La faisabilité et la pertinence de cette démarche méthodologique ont été éprouvées dans le cadre d'une étude de cas menée sur un site urbain nantais, le "cours Cambronne".

Mots clés: piéton, espace urbain, facteurs microclimatiques, confort, comportement piétonnier, analyse du signal.

ENVIRONMENTAL AND BEHAVIORAL CHARACTERIZATION OF PEDESTRIAN WALKWAYS IN URBAN ENVIRONMENTS

Urban designers seem to be increasingly concerned with the influence of physical factors of the environment on pedestrian behavior, and especially on walking in public spaces. However, we can notice that there is an insufficient recognition of sensitive issues including the dynamic nature of the perceived stimuli, during the design process.

In this context, we propose a methodological two-phase approach for describing characteristics of pedestrian paths in terms of microclimatic and behavioral factors. This approach is based on crossing urban micro climatic data with the results of observation and monitoring pedestrian behavior (video recordings).

The purpose of the first phase of our approach is to develop a method for analyzing simulated microclimatic variables and indicators of comfort along pedestrian paths. This leads to the classification of these micro climatic signals taking into account the dynamic aspects of the perceived signals. In a second phase, we conduct a behavioral analysis along pathways (path duration, number and duration of stops ...). Finally, relying on statistical analysis, we propose a procedure to assess the relationship between micro climatic data and behavioral data.

The feasibility and the relevance of this methodological approach has been tested through a case study in an urban site in the city of Nantes, the « cours Cambronne ».

Keywords: pedestrian, urban space, microclimatic factors, comfort, pedestrian behavior, signal analysis.

Merci...

À Monsieur Gérard Hégron, pour avoir rendu cette thèse possible, pour son encadrement, ses conseils, son encouragement, sa patience et sa confiance tout au long de la préparation de cette thèse.

À Monsieur Alain Legendre, pour son encadrement enrichissant.

À Monsieur Éric Languéno, qui m'a beaucoup aidé au début de cette thèse.

À Messieurs Stéphane Donikian et Jean-Christophe Foltête qui m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de ce travail et à Madame Catherine Sémidor pour avoir présidé le jury.

À tous les membres du laboratoire Cerma et particulièrement à Monsieur Pascal Joanne, à Madame Martine Chazelas, à Madame Nathalie Simonnot et aux doctorants pour les liens divers créés et qui furent aussi sympathiques qu'enrichissants.

À tous mes amis de Nantes et d'ailleurs qui m'ont toujours soutenu.

À toute ma famille et surtout à mes parents qui, je l'espère, sont fiers de moi.

À mon épouse sans qui je ne serais jamais parvenu au bout de ce travail.

Table des matières

LISTE DES FIGURES	V
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
NOMENCLATURE.....	1
INTRODUCTION GENERALE	3
PREMIÈRE PARTIE : ÉLÉMENTS DE LA RELATION INDIVIDU- ENVIRONNEMENT	
INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE.....	8
CHAPITRE 1. LES AMBIANCES ARCHITECTURALES ET URBAINES	9
1.1. Introduction	9
1.2. Les Ambiances architecturales et urbaines.....	9
1.2.1. Définition de la notion d’ambiance	9
1.2.2. L’ambiance comme objet de recherche scientifique.....	11
1.3. Les paramètres du microclimat	12
1.3.1. Les facteurs climatiques	13
1.3.1.1. Rayonnement solaire et température	13
1.3.1.2. Le vent.....	14
1.3.2. Les facteurs liés à la morphologie urbaine	15
1.4. Les Méthodes de recueil et d’analyse des données	16
1.4.1. Recueil et analyse des données physiques.....	16
1.4.1.1. La mesure.....	16
1.4.1.2. La simulation.....	17
1.4.1.3. Analyse « statique » des facteurs physiques	20
1.4.1.4. Analyse « dynamique » des facteurs physiques	23
1.4.2. Recueil et analyse des données sensibles et qualitatives.....	27
1.5. Synthèse intermédiaire	29
1.6. Références bibliographiques	29
CHAPITRE 2. LA PRISE D’INFORMATION – LA SENSATION ET LA PERCEPTION	33
2.1. Introduction	33
2.2. Définition de la perception.....	33
2.2.1. La distinction sensation–perception.....	34

2.3. La sensation : détection des stimuli.....	34
2.3.1. Evaluation de la sensibilité des sens (mesure de l'expérience subjective).....	34
2.3.2. Autres aspects sensoriels.....	36
2.4. La perception : traitement de l'information sensorielle.....	37
2.4.1. L'organisation perceptive	37
2.4.2. La perception subliminale.....	40
2.5. Perception des facteurs climatiques	41
2.5.1. La sensation thermique	41
2.5.2. La perception du vent.....	41
2.6. Synthèse intermédiaire	42
2.7. Références bibliographiques	43
CHAPITRE 3. LE CONFORT DANS LES ESPACES URBAINS EXTERIEURS.....	45
3.1. Introduction	45
3.2. Le confort aéraulique	45
3.2.1. Les effets du vent sur le confort du piéton.....	46
3.2.2. Les critères du confort aéraulique.....	47
3.3. Le confort thermique.....	48
3.3.1. Les paramètres du confort thermique.....	48
3.3.1.1. Paramètres relatifs à l'environnement	49
3.3.1.2. Paramètres relatifs à l'individu	49
3.3.2. Les modèles du confort thermique.....	51
3.3.2.1. Les modèles de l'approche physique et physiologique	51
3.3.2.2. Les modèles de l'approche psychologique	54
3.4. Le confort visuel	57
3.4.1. Niveaux d'éclairage et éblouissement dans les espaces ouverts urbains.....	58
3.4.2. Appréciation du champ lumineux par les usagers.....	58
3.5. Synthèse intermédiaire	59
3.6. Références bibliographiques	60
CHAPITRE 4. LE COMPORTEMENT	63
4.1. Introduction	63
4.2. Définitions.....	63
4.3. L'étude du comportement.....	64
4.3.1. Le recueil des données comportementales.....	65
4.3.1.1. L'observation du comportement	65
4.3.1.2. L'étude des processus décisionnels	66
4.3.2. La modélisation du comportement	68
4.4. Impact des facteurs personnels et environnementaux sur le comportement piétonnier.....	69
4.4.1. Les facteurs personnels	69
4.4.2. Les facteurs environnementaux	70
4.4.2.1. Impact des facteurs microclimatiques sur la fréquentation et les activités	73

4.4.2.2.	Impact des facteurs microclimatiques sur la mobilité	75
4.5.	Synthèse intermédiaire	75
4.6.	Références bibliographiques	76
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE.....		79
 DEUXIÈME PARTIE : VERS UNE MÉTHODE POUR L'ÉVALUATION DE L'INFLUENCE DE FACTEURS MICROCLIMATIQUES SUR LA MOBILITÉ PIÉTONNE		
INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE		84
CHAPITRE 5. CARACTERISATION MICROCLIMATIQUE DES PARCOURS.....		85
5.1.	Introduction	85
5.2.	Modélisation des stimuli microclimatiques	86
5.2.1.	Discrétisation des parcours	87
5.2.2.	Extraction des données le long des parcours	89
5.2.2.1.	L'approche d'extraction barycentrique	89
5.2.2.2.	L'approche d'extraction surfacique	90
5.3.	Méthode de caractérisation microclimatique des parcours	91
5.3.1.	La segmentation du signal	91
5.3.1.1.	La Transformée en Ondelettes Discrète (<i>TOD</i>)	91
5.3.1.2.	La méthode de segmentation	92
5.3.2.	Les indicateurs caractéristiques du signal	94
5.3.2.1.	L'indicateur « sens de variation » (<i>SV</i>)	94
5.3.2.2.	L'indicateur « intensité moyenne » (<i>Imoy</i>)	94
5.3.2.3.	L'indicateur « fréquence de dépassement » (<i>Freq_dep</i>)	95
5.3.3.	Classification des parcours	96
5.3.3.1.	La classification microclimatique des parcours.....	96
5.3.3.2.	Qualification des classes	104
5.4.	Synthèse intermédiaire	106
5.5.	Références bibliographiques	107
CHAPITRE 6. CARACTERISATION COMPORTEMENTALE DES PARCOURS		109
.....		
6.1.	Introduction	109
6.2.	L'observation des parcours.....	109
6.3.	Retranscription des trajectoires	110
6.4.	Caractérisation comportementale des parcours	111
6.4.1.	Évaluation des longueurs de parcours et des portions de parcours.....	111
6.4.2.	Evaluation des vitesses moyennes de déplacement	112
6.4.3.	Nombre et durée des arrêts	113

6.4.4.	Exemple de caractérisation comportementale des portions de parcours	113
6.5.	Synthèse intermédiaire	115
CHAPITRE 7. MISE EN ŒUVRE DE LA METHODE D'ANALYSE – ETUDE DE CAS : LE COURS CAMBRONNE (NANTES).....		117
7.1.	Introduction	117
7.2.	Présentation du site de l'étude : le cours Cambronne	117
7.2.1.	Description du site	117
7.2.2.	Particularités du site	119
7.3.	Le recueil des données	120
7.3.1.	Les données météorologiques.....	120
7.3.1.	Les données relatives au parcours.....	120
7.4.	La simulation des données microclimatiques	123
7.4.1.	Le modèle urbain 3D du site	123
7.4.2.	La simulation de la « vitesse du vent » et du <i>PMV</i>	124
7.5.	La caractérisation des portions de parcours	126
7.5.1.	Caractérisation des portions de parcours en fonction de la « vitesse du vent ».....	126
7.5.2.	Caractérisation des portions de parcours en fonction de l'indicateur de confort <i>PMV</i>	127
7.6.	La classification microclimatique des portions de parcours	128
7.6.1.	Classification des portions de parcours relativement à la « vitesse du vent »	128
7.6.2.	Classification des portions de parcours relativement à l'indicateur de confort <i>PMV</i>	130
7.7.	Mise en correspondance entre données microclimatiques et données comportementales... 132	132
7.7.1.	Analyse corrélationnelle	133
7.7.2.	Analyse des classes de portions de parcours.....	134
7.7.2.1.	Analyse de classes relativement à la « vitesse du vent ».....	134
7.7.2.2.	Analyse de classes relativement à l'indicateur <i>PMV</i>	136
7.8.	Synthèse intermédiaire	137
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE		139
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES		141
ANNEXES		147

Liste des figures

Figure 1.	Approche systémique des ambiances (Tixier, 2001)	11
Figure 2.	Analyse interdisciplinaire d'un phénomène d'ambiance in situ (Augoyard, 1998).....	12
Figure 3.	Les phénomènes aéraulique aux alentours des bâtiments (Gandemer et Guyot, 1976)....	14
Figure 4.	Un dispositif portable pour la mesure des facteurs physiques des ambiances (Ahmed-Ouameur & Potvin,2007)	17
Figure 5.	Processus de simulation des facteurs physiques	18
Figure 6.	(a) Modèle urbain 3D (Square Fleuriot, Nantes) avec discrétisation du plan piéton (1,5m) (b) Simulation de l'éclairément (lux) au niveau du plan du piéton (Zekri et al., 2007).....	19
Figure 7.	Simulation FLUENT de la vitesse du vent (m/s)(Cours Cambronnes, Nantes)	19
Figure 8.	Simulation de la température moyenne radiante (T_{mr}) et du confort(PMV) (Robitu, 2005).	21
Figure 9.	Simulation de la température et de l'écoulement d'air sur N3S (Vinet, 2000).....	21
Figure 10.	Analyse effectuée sur un SIG – visualisation des points ayant un facteur de visibilité du ciel > 50% (Pham et al., 2007).....	22
Figure 11.	Analyse des variables : température, humidité et vitesse du vent (a) le long d'un parcours urbain « mixte » (b) (Nagara et al.,1996)	24
Figure 12.	Signaux physiques mesurés le long d'un parcours (Ahmad-Ouameur & Potvin, 2007) ..	25
Figure 13.	Parcours virtuel et signaux de températures correspondants (Bruse, 2007) – Les couleurs au niveau du parcours sont relatives aux valeurs de la température de la peau (T_{skin}).....	26
Figure 14.	Synoptique de la méthode des « parcours commentés » (Thibaud, 2001).....	28
Figure 15.	Seuil physiologique, seuil perceptif et l'hypothèse de la zone subliminale (Godefroid, 2008) – Des stimuli peuvent dépasser le seuil physiologique mais sans atteindre le seuil de reconnaissance. Ils restent dans ce que Dixon (1971) appelle la zone subliminale	35
Figure 16.	Le cycle perceptif (Neisser, 1967) – les schémas en mémoire dirigent l'exploration de l'objet, afin d'en extraire les informations pertinentes qui, à leur tour, modifient les schémas et entraînent la réorientation éventuelle de l'exploration	38
Figure 17.	Schéma de circulation de l'information (flow chart) (Solso, 1991).....	39
Figure 18.	Relation entre le PMV et le PPD (%) (Fanger, 1972).....	52
Figure 19.	Ecart entre (a) PMV et ASV et entre (b) PPD et APD (Nokolopoulou, 2001)	56
Figure 20.	Processus des préférences révélés (en rouge) et des préférences déclarées (en rouge et bleu) (Piombini, 2006)	67
Figure 21.	Sélection d'un parcours au niveau du plan virtuel du piéton et construction du signal représentant l'évolution de la vitesse de l'air le long de ce parcours	87
Figure 22.	Discrétisation du parcours en blocs rectangulaires	88
Figure 23.	Méthodes d'extraction des données le long d'un parcours - (a) approche barycentrique, (b) approche surfacique	89
Figure 24.	Algorithme de la méthode barycentrique.....	90

Figure 25. Algorithme de la méthode surfacique.....	90
Figure 26. Analyse d'un signal par une transformée en ondelettes discrète à 3 niveaux de décomposition	92
Figure 27. Segmentation d'un signal et segmentation du parcours correspondant	93
Figure 28. Calcul de l'indicateur « sens de variation » (SV) pour chaque portion du signal.....	94
Figure 29. Calcul de le l'indicateur Intensité Moyenne (<i>Imoy</i>) pour chaque portion d'un signal représentant la variable « vitesse de l'air »	95
Figure 30. Calcul de le l'indicateur <i>Freq_dep5</i> + pour des portions d'un signal représentant la variable « vitesse de l'air ».....	96
Figure 31. Algorithme de la CAH.....	98
Figure 32. Ensemble des portions de parcours à classifier relativement à la variable « vitesse de l'air » - Environnement urbain 3D représentant le « Square Fleuriot à Nantes »	99
Figure 33. Dendogramme de la CAH (XLSTAT®).....	101
Figure 34. Visualisation du résultat de la classification (CAH) des parcours relativement à la variable « vitesse de l'air ».....	103
Figure 35. Observation d'une trajectoire réelle (cours Cambronne, Nantes).....	110
Figure 36. Retranscription de la trajectoire observée au niveau de l'outil d'analyse des parcours (cours Cambronne, Nantes).....	111
Figure 37. Représentation géométrique du parcours.....	112
Figure 38. Visualisation des données comportementales (issues des observations) par l'outil d'analyse des parcours – Pour chaque parcours segmenté, correspond une vitesse moyenne de déplacement V- Environnement 3D représentant le square Fleuriot (Nantes).....	114
Figure 39. Vue aérienne sur le cours Cambronne (Nantes).....	118
Figure 40. Le cours Cambronne (Nantes)	118
Figure 41. Les symétries longitudinale et transversale du cours Cambronne	119
Figure 42. Localisation de l'observateur.....	121
Figure 43. Vue sur le cours Cambronne à partir du point d'observation	121
Figure 44. Ensemble des parcours observés (dans les deux sens) d'un bout à l'autre du cours Cambronne	122
Figure 45. Les modèles urbains 3D SOLENE (à gauche) et ENVI-MET (à droite).....	124
Figure 46. Simulation de la vitesse du vent au niveau du plan du piéton selon les conditions climatiques du 09/08/2008 à 14h (cours Cambronne).....	125
Figure 47. Simulation de l'indicateur de confort PMV au niveau du plan du piéton selon les conditions climatiques du 09/08/2008 à 14h (cours Cambronne).....	126
Figure 48. Visualisation des portions de parcours « éléments centraux » des classes (classification relative à la vitesse du vent)	130
Figure 49. Visualisation des portions de parcours « éléments centraux » des classes (classification relative au PMV)	132

Liste des tableaux

Tableau 1.	Température perçue (°C) en fonction de la vitesse du vent (m/s) (Bell et al., 2005).....	42
Tableau 2.	Echelle de Beaufort (Lawson & Penwarden ,1975).....	46
Tableau 3.	Exemple d'un critère simple basé sur une probabilité de dépassement de 20% (ASCE, 2004).....	47
Tableau 4.	Exemple d'un critère détaillé basé sur deux probabilités de dépassement : 5% et 20% (ASCE, 2004).....	48
Tableau 5.	Production d'énergie métabolique (AFNOR, 1995).....	50
Tableau 6.	Calcul des indicateurs PMV et PPD (Fanger, 1972).....	53
Tableau 7.	Le modèle de prédiction Sensation Thermique (TS) (Givoni et al., 2003).....	55
Tableau 8.	Le modèle de prédiction « Avis de Sensation effective – Actual Sensation Vote » (ASV) (RUROS, 2004).....	55
Tableau 9.	Facteurs environnementaux ayant un impact sur la marche.....	72
Tableau 10.	Calcul des indicateurs caractéristiques quantitatifs (tableau à gauche) et leur normalisation par centrage-réduction (tableau à droite).....	101
Tableau 11.	Description de la composition des classes.....	102
Tableau 12.	Les éléments centraux représentant les classes.....	102
Tableau 13.	Qualification des intervalles de valeurs de $I_{moy}(V_a)$	105
Tableau 14.	Qualification des intervalles de valeurs de $Freq_dep_{5+}(V_a)$	105
Tableau 15.	Qualification des intervalles de valeurs de $SV(V_a)$	105
Tableau 16.	Qualification des intervalles de valeurs de $I_{moy}(PMV)$	105
Tableau 17.	Qualification des intervalles de valeurs de $Freq_dep_{1+}(PMV)$	105
Tableau 18.	Qualification des intervalles de valeurs de $SV(PMV)$	106
Tableau 19.	Exemple de qualification de classes relativement à la vitesse de l'air.....	106
Tableau 20.	Calcul des variables caractéristiques comportementales pour chaque portion $Pi-j$ (i désigne le numéro du parcours et j sa $j^{ème}$ portion).....	115
Tableau 21.	Données météorologiques mesurées in situ et observés au début de la session d'observation.....	120
Tableau 22.	Les données comportementales relatives aux parcours observés.....	123
Tableau 23.	Description des données des segments de parcours relativement à la vitesse du vent.....	127
Tableau 24.	Description des données des segments de parcours relativement au PMV.....	128
Tableau 25.	Composition des classes relatives à la vitesse du vent.....	129
Tableau 26.	Interprétation des classes de portions de parcours sur la base de leurs éléments centraux (classification relative à la vitesse du vent).....	129
Tableau 27.	Composition des classes relatives au PMV.....	131
Tableau 28.	Interprétation des classes de portions de parcours sur la base de leurs éléments centraux (classification relative au PMV).....	131

Tableau 29. Matrice de corrélation (Pearson) mettant en correspondance les indicateurs des signaux de la vitesse du vent et les variables comportementales- Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$	133
Tableau 30. Matrice de corrélation (Pearson) mettant en correspondance les indicateurs des signaux du PMV et les variables comportementales- Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$	134
Tableau 31. Mise en correspondance entre les classes liées à la vitesse du vent et les données comportementales	135
Tableau 32. Mise en correspondance entre les classes liées à l'indicateur de confort PMV et les données comportementales.....	137

Nomenclature

Symbole	Description	unité
C_p	Perte de chaleur par convection au niveau de la peau	W/m ²
C_{res}	Perte de chaleur par convection due à la respiration	W/m ²
DMA	Durée moyenne des arrêts le long d'un parcours	s
E_p	Perte de chaleur par évaporation au niveau de la peau	W/m ²
E_{res}	Perte de chaleur par évaporation due à la respiration	W/m ²
Freq_dep _{seuil±}	Fréquence de dépassement d'un seuil par le signal	
I_{cl}	Résistance thermique globale	clo
I_{moy}	Intensité moyenne du signal	
M	Energie métabolique	W/m ² ou met
M_{th}	Composante thermique de M	W/m ²
Q_{cp}	Flux de chaleur passant du corps à la peau	W/m ²
Ray	Rayonnement solaire	W/m ²
RH	Humidité relative	%
R_p	Perte de chaleur par rayonnement au niveau de la peau	W/m ²
S_c	Chaleur stockée au niveau du corps	W/m ²
S_p	Chaleur stockée au niveau de la peau	W/m ²
SV	Sens de variation du signal	
T_a	Température de l'air	°C
T_{mr}	Température moyenne radiante	°C
T_s	Température du sol	°C
T_{skin}	Température de la peau	°C
u	Intensité de la fluctuation du vent	m/s
U (ou V_a)	Vitesse instantanée du vent	m/s
W	Composante mécanique de M	W/m ²
\bar{U}	Vitesse moyenne du vent	m/s
\hat{U}	valeur maximale des rafales de vent	m/s
σ_u	Écart-type de la fluctuation du vent	m/s

Acronyme	Signification
APD	Actual Dissatisfied Percentage (%)
ASV	Actual Sensation Vote
CAH	Classification Ascendante Hiérarchique
ET*	Effective Temperature (°C)
LSV	Luminous Sensation Vote
MEMI	Munich Energy Balance Model for Individuals
PET	Physiological Equivalent Temperature (°C)
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage Dissatisfied (%)
SIG	Système d'Information Géographique
TOD	Transformée en Ondelettes Discrète
TS	Thermal Sensation

Introduction générale

Ce travail de thèse s'inscrit dans la problématique générale de l'influence des facteurs environnementaux sur la mobilité des piétons. Il a été initié au laboratoire CERMA¹ (UMR CNRS/MCC 1563) de l'école d'Architecture de Nantes, un laboratoire pluridisciplinaire, où architectes, urbanistes, physiciens, géomaticiens et informaticiens travaillent autour de la thématique des ambiances et leur intégration dans la pratique de la conception architecturale et urbaine. Dans ce travail, nous nous intéressons plus spécifiquement à l'influence des facteurs microclimatiques et des conditions de confort thermique et aéraulique sur le comportement piétonnier.

Récemment, devant la montée en puissance des modes de déplacement motorisés, des travaux s'intéressant à l'influence des facteurs environnementaux sur la pratique de la marche ont commencé à voir le jour (Cervero & Radish, 1996 ; Burden, 1999 ; Black et al., 2001 ; Piombini, 2006, etc.). Ils ont notamment cherché à identifier quels facteurs pourraient favoriser la pratique de marche en milieu urbain comme mode de déplacement alternatif, ce mode présentant par rapport aux autres modes de déplacement l'avantage d'être non polluant et de surcroît bénéfique pour la santé. Ces travaux sont pour la plupart issus des domaines de la santé publique, de l'écologie, de la géographie, et de la sécurité routière.

Par ailleurs, dans le domaine de l'aménagement urbain, les concepteurs accordent une attention accrue à l'influence des propriétés morphologiques, esthétiques, fonctionnelles de l'environnement construit sur le confort et sur la nature des activités piétonnes dans les espaces publics (Li, 1994 ; Westerberg, 1994 ; Zacharias et al., 2001 ; Boussoualim, 2001, Nokolopouou, 2001). Certains de ces travaux plaident en faveur de la nécessité d'ajuster les aménagements urbains aux besoins spatiaux et environnementaux des piétons, ils insistent sur le fait qu'un espace urbain devrait être en cohérence avec les attentes des piétons.

Toutefois, il se trouve que les concepteurs ne maîtrisent pas toujours ces attentes, ce qui mène parfois à des décalages entre les caractéristiques des espaces produits et le ressenti des usagers. A notre sens, ces décalages résultent du fait que les aspects sensibles caractérisant la relation entre l'homme et son environnement sont insuffisamment pris en considération lors de la phase de conception de projets.

Les travaux de recherche ayant abordé la problématique de l'influence des facteurs environnementaux sur le comportement piétonnier ont surtout analysé des facteurs liés à des aspect spatiaux et morphologiques (Hillier et Iida, 2005 ; Baran et al., 2008), esthétiques (Burden, 1999 ; Piombini, 2006) et fonctionnels (Humpel et al., 2004) de l'espace urbain.

La problématique de l'influence des phénomènes microclimatiques et du confort sur le comportement piétonnier n'a jusqu'à présent été que rarement abordée. Elle a essentiellement fait l'objet d'études portant sur une analyse « statique » des facteurs microclimatiques et de leur impact sur l'occupation de l'espace et à la nature des activités exercées par les usagers. Cependant, à en juger par le nombre des publications récentes, on constate que dans le cadre

¹ Centre de recherche méthodologique d'architecture

de disciplines telles que la climatologie urbaine et le confort dans les milieux extérieurs les travaux abordant cette problématique sont actuellement en plein essor. Par ailleurs, de nouvelles pistes de recherche émergent, à l'image de celles concernant la prise en compte des facteurs psychologiques dans l'évaluation de la sensation de confort thermique (Nikolopoulou, 2001, 2004 ; Thorsson, 2007). Ces nouvelles pistes devraient contribuer à une meilleure compréhension de la relation complexe qui relie l'individu à son environnement.

Le principal objectif de notre travail est de proposer une méthode destinée à analyser les facteurs microclimatiques en tenant compte du caractère dynamique de la perception des stimuli physiques le long des parcours piétonniers en milieu urbain. Nous proposons, ensuite, d'étudier l'influence de ces facteurs sur les comportements piétonniers.

Cette méthode consiste à croiser des données microclimatiques urbaines avec les résultats d'observations et de suivis du comportement des usagers. Il s'agit d'un travail exploratoire visant à mettre en place une démarche permettant de coordonner les approches liées aux analyses des caractéristiques microclimatiques à celles liées aux analyses des comportements des usagers.

Cette approche exploratoire n'a pas la prétention de quantifier de manière déterministe l'influence des facteurs microclimatiques sur le comportement piétonnier. Notre perspective, dans un contexte d'aménagement ou de réaménagement des espaces urbains, est de proposer des pistes méthodologiques pouvant contribuer, à terme, à alimenter le corpus des connaissances liées à l'influence de la qualité de l'environnement urbain sur les perceptions et les usages des piétons.

La méthode que nous proposons se déploie selon trois étapes :

- Une caractérisation des parcours piétonniers observés du point de vue de l'évolution du facteur microclimatique « vitesse du vent » et de l'indicateur de confort thermique « *PMV* » le long de ces parcours. Nous nous basons, pour cela, sur des techniques de simulation, d'analyse du signal et sur des procédures de classification ;
- Une caractérisation du point de vue comportemental de ces mêmes parcours, se basant sur l'observation in situ des comportements prenant en compte la vitesse moyenne de déplacement ainsi que le nombre et la durée des arrêts effectués par les piétons ;
- Le couplage et la mise en correspondance entre les données microclimatiques et les données comportementales.

Afin de vérifier la faisabilité et la pertinence de notre méthode, celle-ci a été mise en œuvre dans une étude de cas menée sur le cours Cambronne à Nantes.

Ce manuscrit est organisé en deux parties de façon à séparer la synthèse des connaissances issues de l'analyse bibliographique de notre propre contribution.

La première partie propose un état de l'art non exhaustif des connaissances concernant la relation entre l'homme et son environnement et plus particulièrement entre le piéton et l'espace urbain. Cette partie permet de mieux cerner et construire notre problématique et de faire émerger la complexité de la question posée.

Dans cette partie, nous abordons la notion d'Ambiance architecturale et urbaine qui regroupe aussi bien les aspects objectifs (les facteurs physiques) que des aspects subjectifs (formes perçues) caractérisant la relation Homme-Environnement (*Chapitre 1*). Nous présentons, ensuite, le processus de prise d'information et d'interprétation des informations perçues à travers les différentes théories de la perception (*Chapitre 2*). Nous présentons également les différents modèles théoriques dédiés à l'évaluation du confort aéraulique, thermique et visuel en mettant en évidence certaines limites de ces modèles (*Chapitre 3*). Nous abordons enfin la thématique du comportement et de la prise de décision ainsi que les différentes tentatives portant sur l'étude de l'influence des facteurs environnementaux (en nous focalisant sur les facteurs microclimatiques) sur le comportement piétonnier (en mettant l'accent sur la mobilité).

La deuxième partie présente notre propre proposition et notre démarche empirique. Dans cette partie, nous présentons, d'abord, la méthode de caractérisation des parcours du point de vue de leurs propriétés microclimatiques (*Chapitre 5*). Pour ce faire nous nous appuyons sur la simulation numérique des données microclimatiques, sur l'analyse du signal et sur la classification automatique des données. Nous abordons, ensuite, la méthode de caractérisation des parcours du point de vue comportemental basée sur l'observation (enregistrement vidéo) et le suivi des piétons se déplaçant dans un espace urbain (*Chapitre 6*). Nous présentons, enfin, un exemple de mise en œuvre de notre méthode analytique dans le cas d'un espace urbain réel (Le cours Cambronne à Nantes) (*Chapitre 7*).

PREMIÈRE PARTIE

Éléments de la relation Individu-Environnement

Introduction de la première partie

L'objectif de notre recherche est de proposer une méthode permettant l'analyse de l'impact du microclimat sur des comportements liés à la mobilité des piétons dans les espaces publics extérieurs. Afin de mener à bien cette recherche, il nous a semblé essentiel de revenir aux aspects fondamentaux de la relation entre l'homme et son environnement. Ainsi, nous avons mené en amont des recherches bibliographiques que nous exposons dans cette première partie du manuscrit. Il sera notamment question de présenter les aspects sensibles et perceptifs de la relation Homme-Environnement ainsi que des aspects liés à l'évaluation subjective de la sensation de bien-être (confort) thermique, aéraulique, visuelle... pour enfin terminer avec les notions de prise de décision et de comportement.

Plus précisément, le premier chapitre de cette partie aura pour objectif de présenter la notion d'Ambiances architecturales et urbaines, une notion pluridisciplinaire impliquant à la fois des aspects objectifs (facteurs physiques de l'environnement) et subjectifs (représentations, perceptions sensibles).

Ensuite, le deuxième chapitre traite des processus de prise d'information. Nous y présentons la façon avec laquelle les sens captent l'information de l'environnement ainsi que la façon avec laquelle le cerveau interprète et organise cette information pour en tirer une représentation cohérente du monde qui l'entoure.

Le troisième chapitre expose les différents modèles de confort destinés à évaluer et à prédire le confort dans les espaces extérieurs en se basant soit sur une approche physique et physiologique basée sur l'équilibre énergétique entre l'organisme et l'environnement, soit sur une approche psychologique s'appuyant sur le recueil des appréciations subjectives des usagers par rapport au confort perçu.

Enfin, dans le quatrième et dernier chapitre, nous présentons les méthodes ayant pour objectif d'étudier le comportement (de l'observation à la modélisation). Il s'agira notamment d'exposer les différentes approches relatives à l'étude des processus décisionnels particulièrement lors dans un contexte de mobilité en milieu urbain ainsi que les approches pour l'identification des relations entre les facteurs environnementaux (et particulièrement microclimatique) et le comportement piétonnier.

Chapitre 1. Les ambiances architecturales et urbaines

1.1. Introduction

L'environnement dans lequel évolue le citoyen par nécessité, par plaisir ou par hasard est un mélange complexe de phénomènes physiques, sensibles, esthétiques, sociaux...qui se présentent à sa perception par ce que nous appelons les phénomènes d'ambiances architecturales et urbaines.

L'objet de ce chapitre est de présenter la notion d'ambiance qui régit la relation entre l'individu et l'environnement urbain par l'intermédiaire des mécanismes de la perception sensible. Cette notion est caractérisée par sa double complexité du fait des aspects inter-sensoriels (elle compose simultanément avec l'ensemble des modalités sensorielles) et interdisciplinaires (elle fait appel à différents domaines d'expertise) qu'elle implique.

En outre, nous exposerons les différentes approches de l'étude de la notion d'ambiance en tant qu'objet de recherche scientifique ainsi que les méthodes de recueil et d'analyse des données physiques (objectives et quantitatives) et des données sensibles (subjectives et qualitatives) liées à cette notion.

1.2. Les Ambiances architecturales et urbaines

L'environnement urbain ne se résume pas uniquement à un ensemble de formes bâties imposantes, c'est aussi un amalgame de phénomènes physiques comme le vent, la lumière, le son, etc., qui interagissent avec la forme construite, les usages des espaces architecturaux et urbains, la perception de l'usager et ses différentes représentations. Ces phénomènes et l'interaction entre eux font émerger un phénomène complexe et une expérience partagée par tous mais qui est difficilement communicable qu'on appelle les ambiances architecturales et urbaines.

1.2.1. Définition de la notion d'ambiance

A propos de la définition de la notion d'ambiance, Amphoux (2003) évoque le fait que l'ambiance est une notion transversale et interdisciplinaire désignant « une situation d'interaction sensible (sensorielle et signifiante) entre le réel (architectural ou urbain) et sa représentation (technique, sociale et/ou esthétique) ».

Dans une autre tentative de définition de cette même notion, Péneau (2000) présente l'ambiance, qu'il considère comme le « nouveau paradigme de l'intelligibilité des pratiques de l'espace urbain », comme étant à la croisée : (1) d'un phénomène physique, dûment repéré par les instruments habituels de métrologie ; (2) d'une expérience usagère à dominantes sensible de l'espace urbain et (3) d'une dimension esthétique.

D'après Péneau (2000), dans les opérations relevant de « l'analyse conjointe des caractéristiques objectives et des pratiques collectives et individuelles de l'espace urbain, la notion d'ambiance ne peut prendre sa consistance qu'à la condition que les connaissances

liées aux trois domaines constitutifs de cette notion soient fusionnées ». Cette fusion pourrait, selon lui, être réalisée par « la constitution de nouvelles entités associant : grandeurs physiques, caractérisation sensible d'usage et attendus esthétiques ».

Toujours concernant la signification de la notion d'ambiance, Augoyard (1998) considère qu'un ensemble de phénomènes localisés peut exister comme ambiance lorsqu'il répond à quatre conditions :

- Les signaux physiques de la situation sont repérables et décomposables ;
- Ces signaux interagissent avec :
 - La perception et l'action des sujets ;
 - Les représentations sociales et culturelles ;
- Ces phénomènes composent une organisation spatiale construite (construction architectonique et/ou construction perceptives);
- Le complexe [signaux/percepts²/représentations] est exprimable (possibilité d'accéder à la représentation experte ou usagère).

Il apparaît ressortir de ces définitions c'est, d'une part, le fait que la seule approche des dimensions physiques ne suffit pas à rendre compte du phénomène complexe des ambiances. En effet, l'individu y occupe un rôle primordial dans la mesure où celui-ci est marqué par « la gamme des différenciateurs culturels, psychologiques et sociaux représentant autant de filtres à la perception des phénomènes ambiants » (Peneau, 2000). De ce point de vue, on pourrait considérer une ambiance comme étant « la synthèse, pour un individu et à un moment donné, des perceptions multiples que lui suggère le lieu qui l'entoure » (Adolphe, 1998), avec tout ce que cela implique comme mécanismes physiologiques et comme impact sur son confort.

D'autre part, on peut estimer que ces définitions se rejoignent toutes dans l'idée que la notion d'ambiance est, *a minima*, la résultante de l'interaction (1) des formes construites et physiques; (2) des formes perçues et (3) des formes représentées, qui nécessite une approche interdisciplinaire.

Ces définitions suscitent principalement deux lignes de recherche :

- le développement et l'approfondissement de secteurs d'analyse concernant des aspects où des processus impliqués dans le phénomène complexe d'ambiance : tels que la perception *in situ*, l'intersensorialité, les représentations sociales de l'ambiance, etc.
- Des recherches sur des modèles d'intelligibilité capables d'intégrer les diverses composantes physiques des ambiances (lumière, son, chaleur, odeur...) et d'articuler leurs mesures quantitatives et leurs évaluations qualitatives. Ces approches nécessitent l'élaboration de méthodologies interdisciplinaires.

Afin de représenter le concept des ambiances et l'interaction entre ses différentes composantes, Tixier (2001) propose le schéma présenté dans la Figure 1.

² Percepts : unités perceptives porteuses de sens, qui nous permettent de structurer l'environnement (Godefroid, 2008).

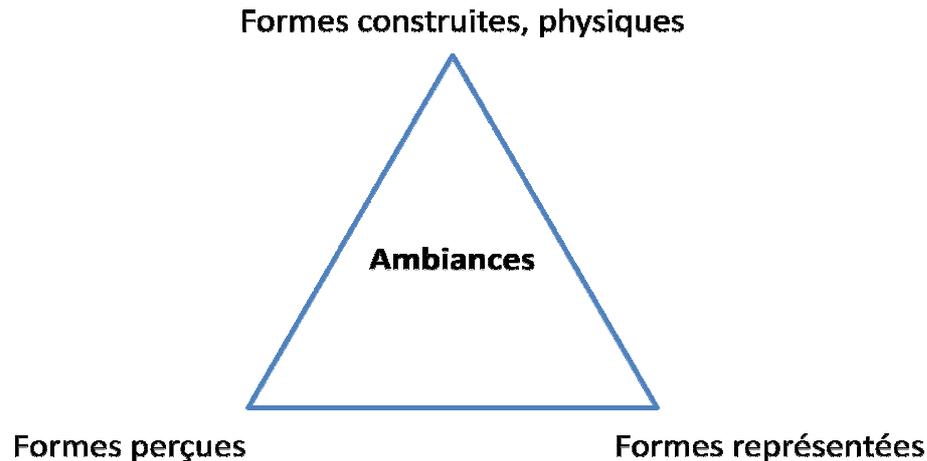


Figure 1. *Approche systémique des ambiances (Tixier, 2001)*

Qu'est-ce qui justifie le recours à cette notion d'ambiance ? Comment s'articulent les recherches et les études portant sur cette notion ? Nous tentons de répondre à ces questions dans le paragraphe qui suit.

1.2.2. L'ambiance comme objet de recherche scientifique

L'étude des ambiances urbaines comme objet de recherche scientifique est assez récente. Elle s'est surtout développée au cours des trois dernières décennies grâce, d'une part au développement des appareils de mesure (microclimatiques, sonores...) et à l'apparition d'outils de simulation numérique performants et, d'autre part à l'évolution des méthodes d'analyse et de qualification des relations entre l'homme et son environnement.

Les recherches engagées dans le domaine se sont focalisées sur ces deux champs complémentaires : le premier se concentrant davantage sur la maîtrise des flux ambiants (lumière, son, chaleur, aéralique, etc.) s'appuyant sur les sciences pour l'ingénieur et la connaissance des formes urbaines et architecturales, l'autre explorant l'expérience sensible *in situ* et mobilisant les savoirs sur les usages et les représentations. Ces deux champs constituent, respectivement, les thèmes de recherche des laboratoires CERMA (à l'école d'Architecture de Nantes) et CRESSON (à l'école d'Architecture de Grenoble) qui forment l'Unité Mixte de Recherche CNRS/MCC 1563.

Péneau (2000) qui a exploré les différentes manières d'intégrer la notion d'ambiances urbaines dans l'approche scientifique, notamment dans les champs de l'analyse urbaine et de la conception de projets. Il explique que le recours à cette notion peut s'expliquer par « l'insuffisance » des approches scientifiques habituelles à rendre compte des dimensions sensibles et plus précisément des perceptions multisensorielles, composantes principales de la relation entre le citadin et l'espace qui l'entoure. Insistant sur l'aspect multisensoriel de la perception il écrit « Le corpus des références communes aux auteurs de projet urbain est à coup sûr marqué par la prédominance du visuel. L'esthétique urbaine est régie par le contrôle de l'apparence et les autres composantes sensorielles, caractérisant l'expérience sensible de l'espace, restent en position subsidiaire dans les échelles de valeur de la conception urbaine » Péneau (2000, p352).

L'un des intérêts du développement de la problématique des ambiances consiste, de ce fait, à enrichir ce corpus de références communes aux concepteurs de projets en mettant l'accent sur l'interdisciplinarité et la collaboration entre spécialistes de différents secteurs : les spécialistes des phénomènes physiques pour effectuer les opérations de mesure et/ou de simulation, les architectes et les urbanistes pour sélectionner les exemples et les analyser et les psycho-sociologues pour apprécier les qualités d'usage des fragments d'espace urbain.

Augoyard (1998) a proposé un schéma de cette approche interdisciplinaire (Figure 2). Ce schéma met l'accent sur l'interdépendance des trois domaines de recherche : sciences expérimentales, sciences humaines et sociales et conception architecturale dans l'étude du phénomène d'ambiance lié à un site.

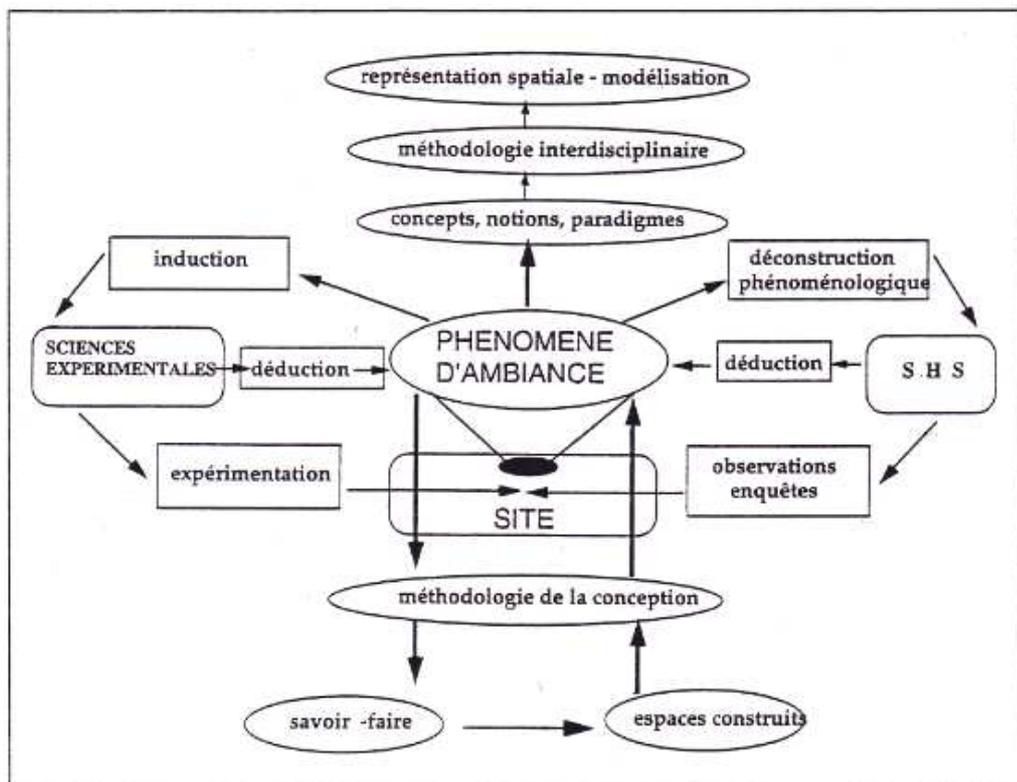


Figure 2. Analyse interdisciplinaire d'un phénomène d'ambiance in situ (Augoyard, 1998)

Le paragraphe suivant traite de la dimension physique et objective des ambiances et plus particulièrement des facteurs microclimatiques.

1.3. Les paramètres du microclimat

L'interaction entre le climat et le milieu urbain fait émerger un ensemble de phénomènes locaux au niveau de l'échelle climatique la plus réduite (la micro-échelle), qui s'étend sur quelques dizaines de mètres. L'étude du climat à cette échelle renvoie à l'étude des facteurs microclimatiques. Dans notre étude, c'est cette catégorie de facteurs physiques des ambiances qui retiendra plus particulièrement notre attention, dans la mesure où elle implique des phénomènes se déroulant à l'échelle du piéton.

Par ailleurs, à cette échelle, les variations de la vitesse et de la direction du vent, ainsi que celles du rayonnement solaire, des températures et de l'humidité peuvent être constatées entre différents points au sein d'un même espace. Ces variations sont dues à l'action : de la texture et des propriétés optiques et thermiques des matériaux, de la position géographique de ces points, du type de végétation et de la proportion de surface qu'elle occupe, de l'orientation des surfaces des bâtiments environnants, etc.

Dans le contexte de notre étude, nous avons retenu les paramètres les plus significatifs pouvant être à l'origine de variations et de contrastes microclimatiques entre différentes zones d'un même espace urbain. Ces facteurs se déclinent en deux sous-catégories : les facteurs climatiques et les facteurs liés à la morphologie urbaine.

1.3.1. Les facteurs climatiques

1.3.1.1. Rayonnement solaire et température

La température de l'air est étroitement liée à la distribution du rayonnement solaire. En outre, la projection des rayonnements solaires sur les supports physiques de l'espace urbain définit une partition visuelle et sensible de l'espace. L'ensoleillement fait intervenir deux modalités sensorielles :

- le sens visuel qui peut être évoqué comme un paramètre climatique spécifique (intensité de la lumière émise, du niveau de l'éclairage ou de la lumière réfléchie, du niveau de la luminance).
- la sensibilité thermique, traduite par la température « opérative » et l'effet de rayonnement perçu indépendamment de la température de l'air (Boussoulim, 2001).

La température a plusieurs origines : la température de l'air, la température d'une paroi liée à la nature de la texture des matériaux, la température moyenne radiante, la température opérative ou équivalente, etc.

Nous rappellerons succinctement certaines définitions liées à la température de l'air et à la température moyenne radiante.

- **Température sèche / température humide de l'air**

La température de l'air mesurée avec un thermomètre normal est nommée couramment la température sèche. Cependant, si on mesure la température de l'air avec un thermomètre dont le bulbe est enrobé d'un coton imbibé d'eau, après stabilisation, on obtient la température humide. Cette température est toujours inférieure à la température sèche, sauf lorsque l'air est à saturation, ces deux températures étant alors égales. Les deux paramètres, température sèche et humide de l'air, suffisent pour définir l'état de l'air sans qu'il soit nécessaire de passer par la mesure de l'humidité (Boussoulim, 2001).

- **La température moyenne radiante (T_{mr})**

Elle est caractéristique des échanges par rayonnement. La température moyenne radiante (T_{mr}) correspond à la température moyenne pondérée par rapport aux surfaces de tous les objets qui entourent le corps (Vinet, 2000).

Elle se mesure par un thermomètre globe; c'est-à-dire un thermomètre sec inséré dans une sphère de cuivre peinte en noir, qui est supposée représenter la capacité thermique d'un individu moyen.

1.3.1.2. Le vent

L'environnement éolien est difficile à prévoir puisqu'il est influencé par un nombre de facteurs aussi bien à l'échelle globale, régionale, locale ou microclimatique. Le vent provient du fait que l'air se déplace des zones de hautes pressions vers des zones de basses pressions. Le vent peut donc, grossièrement, être défini par le mouvement horizontal de l'air qui tend à équilibrer les zones de pressions différentes dans l'atmosphère (Nikolopoulou, 2004).

La vitesse du vent ainsi que sa direction, générés par les systèmes météorologiques, sont modulés par la topographie régionale et locale. Sa fluctuation, est due à des turbulences au niveau de la couche atmosphérique la plus basse qui surviennent au cours de courtes périodes temporelles (de l'ordre de quelques secondes à quelques minutes) (ASCE, 2004). Aussi, il peut y avoir de grandes variations dans l'environnement éolien de différentes parties d'une même ville, de telles variations pouvant intervenir à une échelle réduite, d'une zone microclimatique à une autre. En effet, lorsqu'il atteint les bâtiments, le vent subit des modifications : les grands bâtiments ont tendance à intercepter les vents forts des couches supérieures de l'atmosphère et de les rediriger vers le bas jusqu'au niveau du sol où surviennent de fortes accélérations du vent.

Les principes des écoulements d'air en milieu urbain sont énoncés dans Gandemer & Guyot (1976). Les figures suivantes (Figure 3(a) ; Figure 3(b) ; Figure 3(c) ; Figure 3(d)) illustrent quelques uns des phénomènes les plus fréquemment rencontrés au alentours des bâtiments.

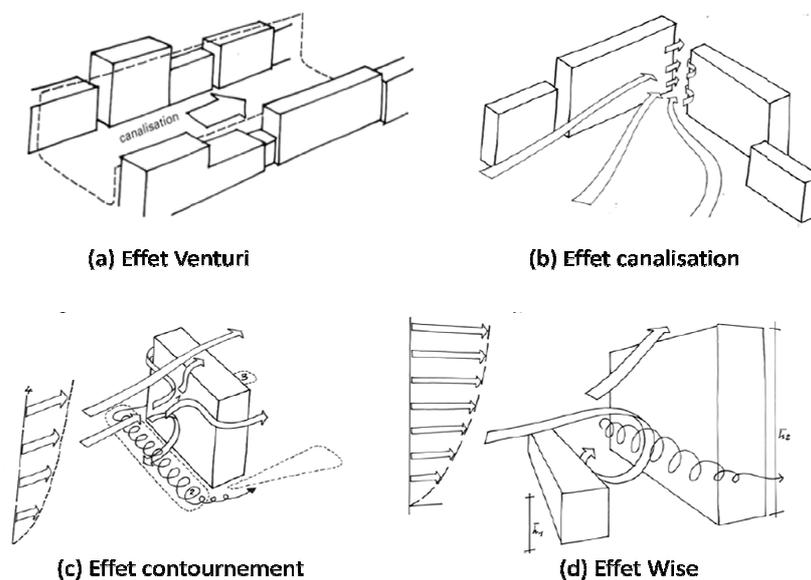


Figure 3. Les phénomènes aérodynamiques aux alentours des bâtiments (Gandemer et Guyot, 1976)

Le vent est défini par sa vitesse instantanée U qui peut être exprimée par la somme de la vitesse moyenne \bar{U} (calculée sur une période de dix minutes à une heure) et de l'intensité de la fluctuation (turbulence) u du vent :

$$U = \bar{U} + u$$

On parle de vitesse maximale \hat{U} des rafales de vent lorsque la fluctuation u atteint sa valeur maximale \hat{u} . Cette vitesse est donnée par la formule suivante :

$$\hat{U} = \bar{U} + \hat{u}$$

Généralement, la fluctuation maximale \hat{u} est exprimée comme un multiple de l'écart-type σ_u de la fluctuation, ce qui donne :

$$\hat{U} = \bar{U} + g\sigma_u$$

Lawson (1978) suggère que les valeurs du facteur multiplicatif g soient comprises entre 0 et 4, dépendamment de l'importance qu'on voudrait accorder aux fluctuations du vent dans un contexte d'évaluation de la perception humaine du vent (plus g est grand, plus l'effet de la fluctuation du vent est considéré comme important).

D'autre part, on associe souvent au vent une probabilité (ou fréquence) de dépassement d'une valeur « seuil ». Cette probabilité est très utile dans l'évaluation des critères de confort liés au vent (ASCE, 2004). Cette probabilité est exprimée en pourcentage ou en fraction du temps pendant lequel une valeur seuil (vitesse moyenne ou vitesse maximale des rafales) donnée est dépassée.

1.3.2. Les facteurs liés à la morphologie urbaine

Outre les éléments d'aménagement urbain tels que les surfaces d'eau (bassin, fontaine...) et la végétation (arbres, surfaces végétales...), qui peuvent influencer les caractéristiques microclimatiques d'un espace en créant des zones d'ombre et en modifiant l'humidité et la température, d'autres facteurs liés à la forme construite ont aussi un effet considérable sur les conditions microclimatiques.

- **Volumétrie du bâti et proportions de l'espace**

Dans un espace urbain, les distances entre surfaces interviennent dans la détermination des facteurs de forme et l'angle solide sous lequel le ciel est vu à partir d'un point dans cet espace. Il en résulte que les espaces larges connaissent des écarts de températures diurnes nettement plus importants que les espaces étroits (Boussoulim, 2001). L'orientation, la disposition verticale, horizontale ou inclinée des surfaces, le rapport hauteur largeur et la profondeur du bâti ont des influences certaines sur les effets thermiques (par exemple, l'effet de piégeage thermique) et lumineux (effet de masque et d'ombre portée), ainsi que sur les effets dynamiques d'écoulements de l'air.

- **Orientations cardinales de l'espace**

L'orientation du bâti par rapport à l'ensoleillement et aux vents détermine en grande partie les variations microclimatiques d'un lieu à un autre. L'orientation module également les effets de masques et d'ombres portées.

- **Types des matériaux**

Chaque matériau présente des caractéristiques propres : un albédo, une conduction, une absorption et une inertie thermique. Ces caractéristiques influencent fortement les échanges thermiques et énergétiques entre les surfaces. La nature des surfaces joue donc un rôle considérable dans la modification des facteurs climatiques.

Nous examinons dans ce qui suit les méthodes de recueil et d'analyse des données relatives aux phénomènes d'ambiance.

1.4. Les Méthodes de recueil et d'analyse des données

L'étude des phénomènes d'ambiance nécessite le recours à des méthodes permettant de recueillir les données physiques mesurables (quantitatives et objectives) relatives aux facteurs physiques des ambiances, et les données sensibles (qualitatives et subjectives) correspondant aux significations que prêtent les sujets, confrontés à une expérience sensible des espaces de la ville, à ces phénomènes.

1.4.1. Recueil et analyse des données physiques

La mesure et la simulation constituent les deux méthodes généralement adoptées par les expérimentateurs ayant pour objectif de collecter des données physiques de l'environnement.

1.4.1.1. La mesure

L'acquisition des données relatives aux facteurs physiques des ambiances peut être menée par l'intermédiaire des instruments habituels de métrologie : le sonomètre pour mesurer le niveau de pression sonore (dB) couramment utilisé dans les études des nuisances sonores ; le luxmètre permettant de mesurer l'éclairement réel (lux) et utilisé, entre autres, par les énergéticiens et les architectes pour optimiser le confort visuel ; le détecteur de polluants pour quantifier la concentration de particules polluantes dans l'air (particules/m³). Pour évaluer le confort thermique on a recours : au thermomètre pour mesurer la température ambiante (°C ou °F) ; au thermomètre globe pour mesurer la température radiante moyenne (°C ou °F) et à l'anémomètre pour mesurer la vitesse du vent (m/s).

Il existe aussi des dispositifs, communément appelés « stations microclimatiques », pouvant englober quelque uns, voire la totalité, des instruments de mesure précédemment énumérés. Par exemple, le dispositif utilisé par Ahmed-Ouameur & Potvin (2007) consiste en un casque appelé PAMPA (Portable Array for the Measurement of Physical Ambiances) pouvant être porté par un piéton et dont les différentes données mesurées sont stockées séquentiellement dans un module enregistreur (Figure 4).

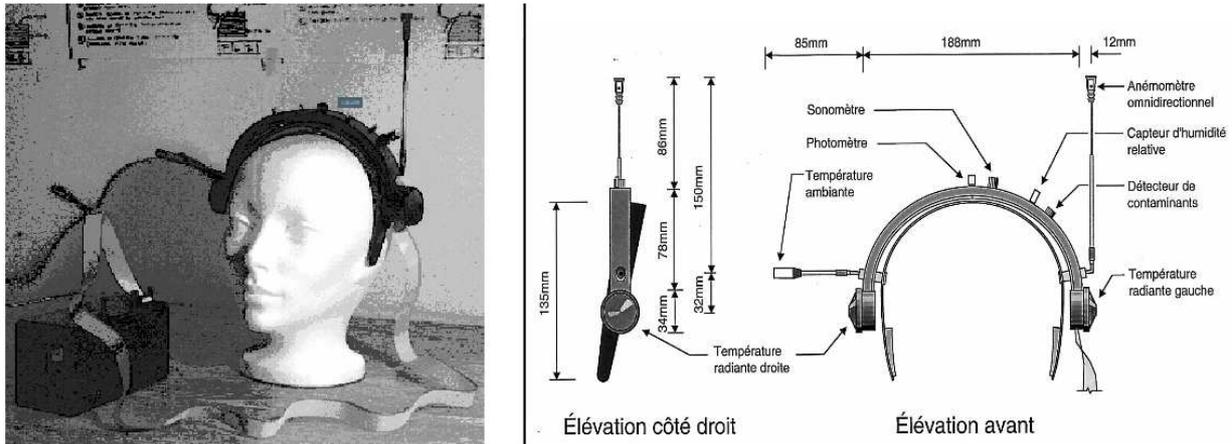


Figure 4. *Un dispositif portable pour la mesure des facteurs physiques des ambiances* (Ahmed-Ouameur & Potvin, 2007)

La technique de mesure par l'intermédiaire des instruments a l'avantage de fournir des données en adéquation avec la réalité physique à condition que ces instruments soient bien calibrés. Par contre, lorsqu'il s'agit de mener une campagne de mesure de plusieurs facteurs physiques, dans différents points spatiaux et à différent moments, l'expérimentateur peut se trouver confronté à des problèmes liés au coup onéreux du dispositif et à des difficultés logistiques et techniques tels que le placement adéquat des stations de mesures, la synchronisation entre différentes stations, la gestion des sauvegardes automatiques des mesures, etc.

1.4.1.2. La simulation

C'est pour remédier aux difficultés de mise en œuvre des campagnes de mesure que les chercheurs ont, de plus en plus, recours aux outils de simulation numérique basés sur des équations et des théories modélisant les phénomènes physiques (phénomènes énergétiques, radiatifs, aérauliques...). Ces modèles ont vu le jour au cours des vingt dernières années grâce au progrès technologique et à la montée en puissance des capacités des calculateurs.

La simulation numérique a l'avantage, par rapport aux instruments de mesure, de pouvoir fournir une quantité de données très importante, dans différentes configurations, en plusieurs points de l'espace et à différents instants. Cependant, le temps de calcul peut s'avérer être très long lors de simulations de phénomènes complexes tels que les multi-réflexions lumineuses. Par ailleurs, les résultats obtenus demeurent très dépendants de qualité de modélisation géométrique de l'environnement urbain ainsi que des conditions d'initialisation des logiciels de simulations. De ce fait, une technique de mesure hybride combinant, d'une part, les outils de simulation numérique et, d'autre part, les instruments habituels pourrait constituer un bon compromis; les échantillons de données mesurées servant à apprécier la précision des données simulées et à corriger d'éventuelles inexactitudes..

Le support numérique des outils de simulation des phénomènes physiques est un modèle urbain numérisé appelé "géométrie". Cette géométrie, généralement tridimensionnelle ou pseudo-tridimensionnelle (bidimensionnelle contenant l'information relative aux élévations), est discrétisée en "micro-entités" surfaciques (facettes) ou volumiques (polyèdres), selon le type de grandeurs à simuler (éclairage, vent...).

D'autre part, et avant de procéder aux simulations, il est nécessaire de définir les variables d'initialisation qui définissent le contexte des simulations. Parmi ces variables, dont la nature et le nombre dépendent du type des phénomènes à simuler, citons : la date, l'heure, les coordonnées géographiques du site, le facteur de rugosité³ du site, la vitesse et la direction des vents dominants, la température météo, l'humidité météo, la nébulosité du ciel...

A l'issue d'une simulation, chacune des micro-entités seront renseignées d'une ou de plusieurs valeurs relatives à des facteurs physiques calculées grâce au modèle urbain utilisé. On parle alors de modèle urbain informé.

La Figure 5 décrit le processus de simulation des phénomènes physiques en milieu urbain.

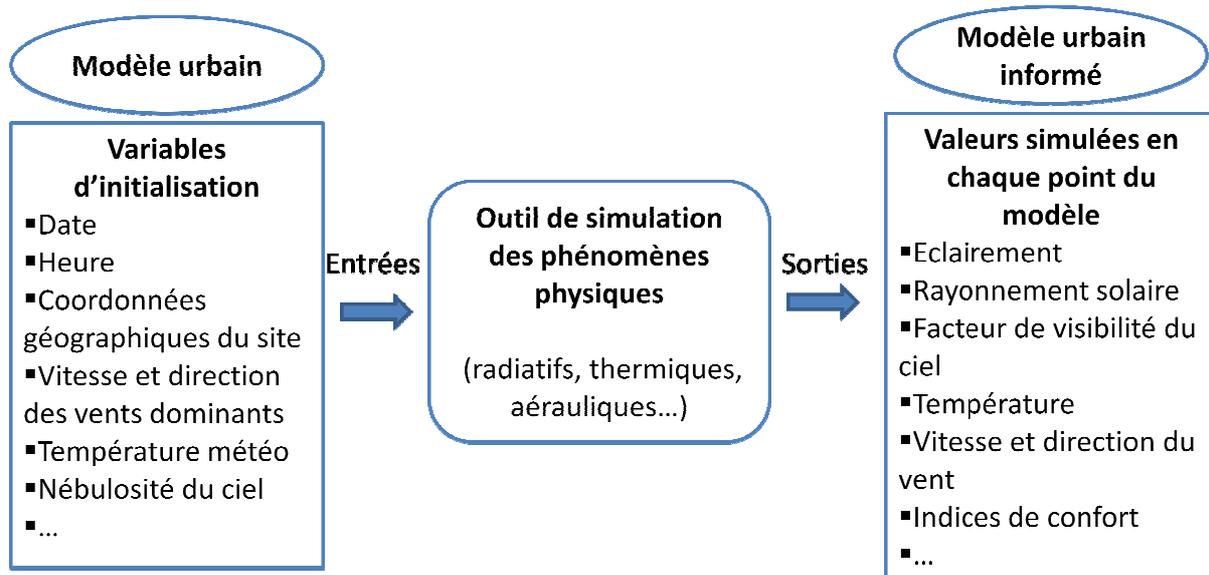


Figure 5. *Processus de simulation des facteurs physiques*

Actuellement, les principaux outils de simulation des phénomènes physiques en milieux urbains se déclinent en deux catégories : les outils de simulation des phénomènes solaires et radiatifs (ombres portées, éclairage, rayonnement solaire, températures des parois...) et les outils de simulation des phénomènes aérauliques (vitesse et direction du vent, intensité des turbulences...).

Pour simuler les phénomènes solaires, plusieurs travaux à l'instar de ceux de Vinet (2000) et de Robitu (2005) ont eu recours au logiciel SOLENE⁴ (Groleau & Marenne, 1992). Dans SOLENE, les valeurs simulées sont affectées aux facettes triangulaires au niveau d'un, ou de plusieurs plans de la géométrie. La Figure 6 représente la simulation dans SOLENE du facteur de l'éclairage (lux) au niveau d'un plan horizontal situé à 1,5 mètre du niveau du sol représentant le plan du piéton (Zekri et al., 2007).

³ La rugosité est définie par la topographie du sol. En règle générale, une rugosité forte (comme dans les grandes villes) freine considérablement la vitesse du vent.

⁴ SOLENE : Logiciel de simulation développé au laboratoire CERMA UMR CNRS/MCC 1563. <http://www.cerma.archi.fr/CERMA/Expertise/solene/>

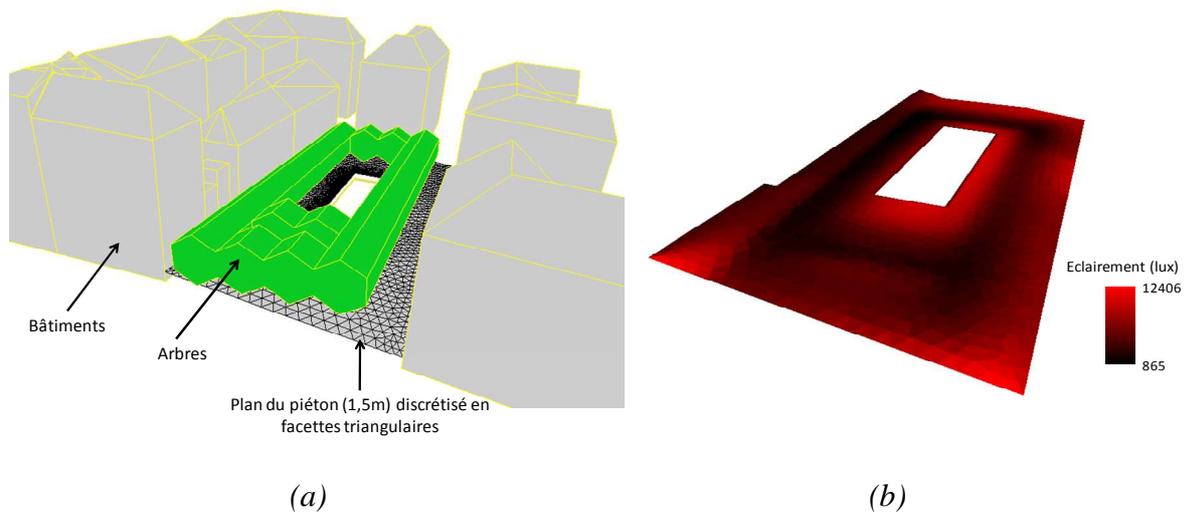


Figure 6. (a) *Modèle urbain 3D (Square Fleuriot, Nantes) avec discrétisation du plan piéton (1,5m)*
 (b) *Simulation de l'éclairage (lux) au niveau du plan du piéton (Zekri et al., 2007)*

Quant à la simulation des phénomènes aérauliques, elle est généralement réalisée par l'intermédiaire de logiciels de simulation de la mécanique des fluides tels que FLUENT⁵. Ce type de logiciels nécessite la discrétisation du volume global du modèle en petites entités volumiques qui contiendront, à l'issue des simulations, les valeurs relatives aux variables telles que la vitesse et la direction du vent. La Figure 7 illustre un exemple de simulation de la vitesse du vent dans un milieu urbain.

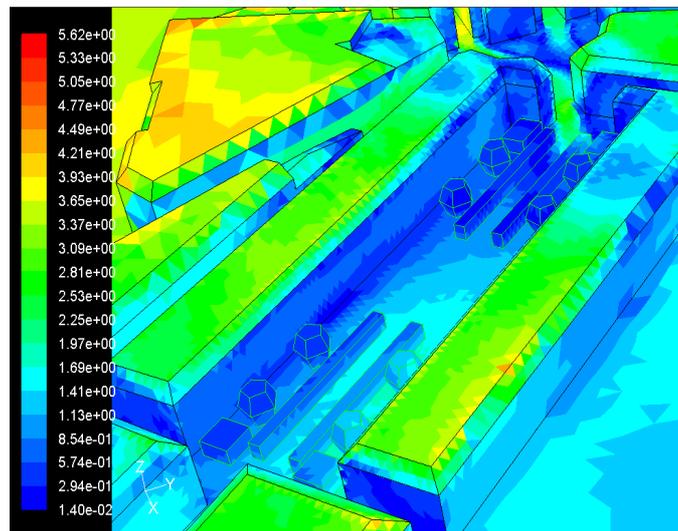


Figure 7. *Simulation FLUENT de la vitesse du vent (m/s)(Cours Cambronnes, Nantes)*

⁵ FLUENT : Logiciel commercial de mécanique des fluides numérique (Computational Fluid Dynamics – CFD) propriété de ANSYS.

Notons qu'il est possible d'avoir accès aux valeurs simulées au niveau d'un plan (plan au niveau du piéton par exemple). Pour cela, les valeurs tridimensionnelles sont projetées sur ce plan et interpolées à l'intérieurs des facettes le composant.

L'un des problèmes que pose le recours à plusieurs types d'outils dans un processus de simulation est la nécessité de faire appel à des méthodes dites de couplage pour le calcul de certaines variables. Par exemple, pour calculer les données liées à la variable de la température de l'air, il est impératif de disposer, en même temps, des valeurs des températures des parois et des valeurs de la vitesse du vent. Il faudrait, dans ce cas, faire appel à des méthodes de couplage thermo-aérauliques (Robitu, 2005 ; Bouyer, 2009), autrement dit, il faudrait combiner les résultats d'un outil de simulation de phénomènes solaires et les résultats d'un outil de simulation de phénomènes aérauliques, technique qui pourrait s'avérer compliqué à mettre en œuvre vu sa complexité et le nombre d'itérations nécessaires.

Certains logiciels permettent d'effectuer, à la fois, des simulations solaires, radiatives, thermiques et aérauliques. C'est, par exemple le cas du logiciel libre ENVI-MET⁶ (Bruse, 2007). Dans ce cas, les techniques de couplage sont déjà intégrées et n'ont pas à être développées par l'utilisateur puisque déjà intégrées dans le processus de simulation.

1.4.1.3. Analyse « statique » des facteurs physiques

Afin d'évaluer, de prédire ou de visualiser l'impact des environnements bâtis sur la qualité des ambiances physiques au niveau des espaces urbains, les chercheurs ont souvent recours à une analyse spatiale « statique » des données physiques. Cette analyse est dite « statique » dans le sens où les données sont présentées en étant figées dans le temps et dans l'espace. Autrement dit, cette analyse a pour support une « photographie » bidimensionnelle ou tridimensionnelle des données physiques, réalisée à un instant donné, sur une partie (ou sur la globalité) d'un espace urbain.

Parmi les études ayant eu recours à ce genre d'analyse, citons celle de Robitu (2005) dans laquelle elle propose une méthode d'analyse des facteurs microclimatiques et des conditions de confort dans un espace ouvert urbain. La Figure 8 représente une simulation de la température radiante moyenne et de l'indice de confort PMV^7 réalisé sur un plan situé à 1.50 mètre du niveau du sol. Afin de mener à bien ces simulations, Robitu (2005) a eu recours à une modélisation mathématique des bassins d'eau et de la végétation ainsi qu'à deux outils de simulation : SOLENE (Groleau & Marenne, 1992) pour les simulations thermo-radiatives et FLUENT® pour les simulations aérauliques.

⁶ ENVI-MET : Logiciel libre de simulation des facteurs microclimatiques et du confort (<http://www.envi-met.com/>).

⁷ PMV (Predicted Mean Vote) : indicateur de confort thermique théorique basé sur la notion d'équilibre métabolique (Fanger, 1972). Nous reviendrons sur les indicateurs de confort thermique dans le Chapitre 3.

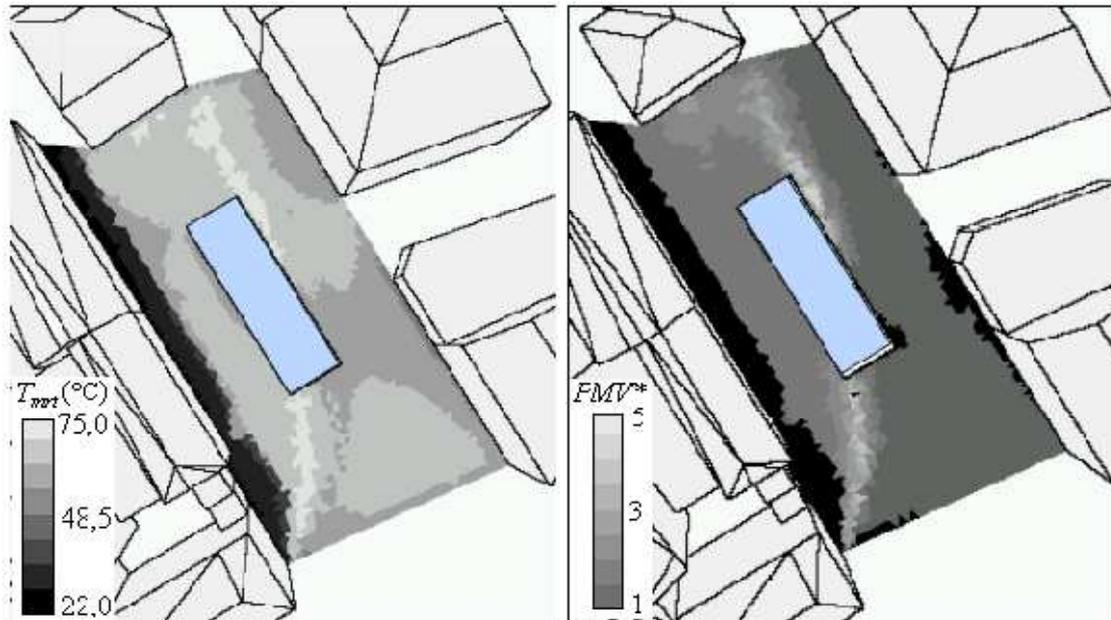


Figure 8. Simulation de la température moyenne radiante (T_{mr}) et du confort (PMV) (Robitu, 2005)

Dans la même logique, Vinet (2000), dans une approche de modélisation thermo-aérodynamique du microclimat urbain, présente les résultats d'une simulation de la température de l'air réalisée sur un modèle urbain tridimensionnel. Les simulations ont été réalisées grâce aux outils SOLENE et N3S® (logiciel de simulation aérodynamique) (voir Figure 9).

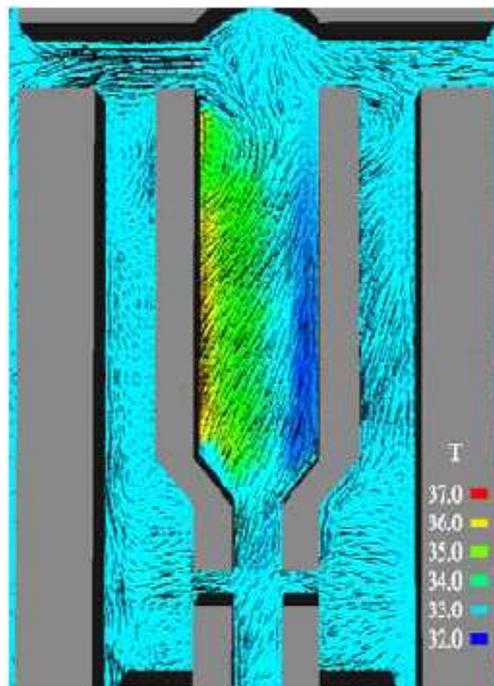


Figure 9. Simulation de la température et de l'écoulement d'air sur N3S (Vinet, 2000)

Une méthode d'analyse des facteurs microclimatiques dans une approche « statique » ne peut être considérée comme pertinente que lorsque les données sont interprétées afin d'identifier le rôle de certaines caractéristiques de l'environnement urbain. Cette étape d'interprétation et de caractérisation peut être réalisée en comparant, par exemple, les résultats de deux simulations réalisées à deux dates différentes ou bien dans deux situations d'aménagement différentes. C'est ce que propose Vinet (2000) qui compare les résultats de simulations réalisées en amont et en aval de la réalisation d'un projet urbain.

- **Les Systèmes d'Information Géographique (SIG)**

Les récentes évolutions des Systèmes d'Information Géographique (SIG) ont été d'un apport considérable dans les travaux de recherche portant sur l'analyse spatiale des paramètres physiques des ambiances. Ces outils constituent un moyen efficace pour agréger et croiser un ensemble de données variées et pour intégrer des données acquises *in situ*, ou produites par des techniques numériques. Ils permettent aussi, par l'intermédiaire de requêtes formulées par l'utilisateur, de visualiser et de restituer l'information de façon synthétique, compréhensible par la plupart des acteurs (décideurs, concepteurs, gestionnaires, usagers, ...) en la restituant dans son contexte géographique.

Le développement de SIG urbains intégrant les qualités environnementales et d'ambiance des milieux urbains a fait l'objet de quelques travaux menés au laboratoire CERMA parmi lesquels ceux de Siret et al. (2006) et ceux de Pham et al. (2007)

A titre d'exemple, les travaux de Pham et al. (2007) font appel au SIG ArcGIS®⁸ pour analyser les facteurs microclimatiques dans les espaces urbains ouverts. La Figure 10 présente un exemple de résultat d'une requête simple interrogeant le SIG sur les zones de l'espace urbain où le pourcentage de visibilité du ciel est supérieur à 50%.



Figure 10. *Analyse effectuée sur un SIG – visualisation des points ayant un facteur de visibilité du ciel > 50% (Pham et al., 2007)*

⁸ <http://www.arcgis.com/home/>

Ces approches analytiques statiques s'inscrivent, en général, dans le contexte global d'études portant sur : (1) La modélisation (identification et validation de modèles) ; (2) Le diagnostic (analyse de qualité environnementale et des ambiances d'un espace urbain) ; (3) L'aide à la décision (analyse de la qualité d'usage et des impacts sociaux, financiers et environnementaux de nouveaux projets d'aménagement urbain) ; (4) La sensibilisation (communication des résultats aux experts et aux non experts).

Si ces approches analytiques sont intéressantes, en particulier pour décrire des phénomènes statiques, elles sont toutefois insuffisantes pour rendre compte de phénomènes dynamiques. Or la plupart des problématiques impliquant les phénomènes d'ambiances sont caractérisées par une variabilité spatio-temporelle notamment lorsqu'il s'agit de problématiques de mobilité piétonnière faisant appel à une perception en mouvement.

1.4.1.4. Analyse « dynamique » des facteurs physiques

Une alternative pour analyser les facteurs physiques de l'environnement urbain à l'échelle du piéton consiste à analyser les variations des différents paramètres physiques le long de parcours piétonniers.

En réalité, le recours de certains chercheurs à cette méthode est justifié par le fait que la marche urbaine est une pratique usuelle au travers de laquelle les individus sont le plus à même de percevoir de façon multi-sensorielle les ambiances urbaines et d'avoir le temps de les évaluer. De ce fait, analyser l'espace urbain par l'intermédiaire des parcours piétonniers apporte la dimension humaine nécessaire à une approche analytique sur les ambiances urbaines. Par ailleurs, la variabilité de l'intensité des signaux physiques et les transitions, plus ou moins abruptes, qui surviennent le long des cheminements piétonniers en raison du caractère dynamique de la marche, peuvent constituer un objet d'étude intéressant non seulement d'un point de vue sensible et comportemental, mais également du point de vue de la description de la modification des paramètres physiques le long d'un parcours.

Dans cette perspective, Sarradin (2004) propose une méthode d'analyse de la forme de contour du ciel sur différentes positions qu'occupe le piéton le long d'un parcours urbain. Il se base, pour cela, sur une analyse morphologique (la squelettisation) de séquences d'images prises sur le parcours. Les variations de mesures caractéristiques de la proportion d'ouverture du ciel sont étudiées et analysées sous forme de courbes.

Nagara et al. (1996) ont tenté d'analyser les paramètres physiques mesurés par l'intermédiaire d'appareils de mesure disposés le long de parcours urbains. L'objectif de Nagara et al. (1996) est d'évaluer, dans différentes situations climatiques, l'environnement thermique d'un piéton effectuant un parcours « mixte » passant d'un environnement fermé (en sous-sol) à un environnement ouvert urbain (Figure 11). Les variables analysées sont la température, la vitesse du vent et l'humidité.

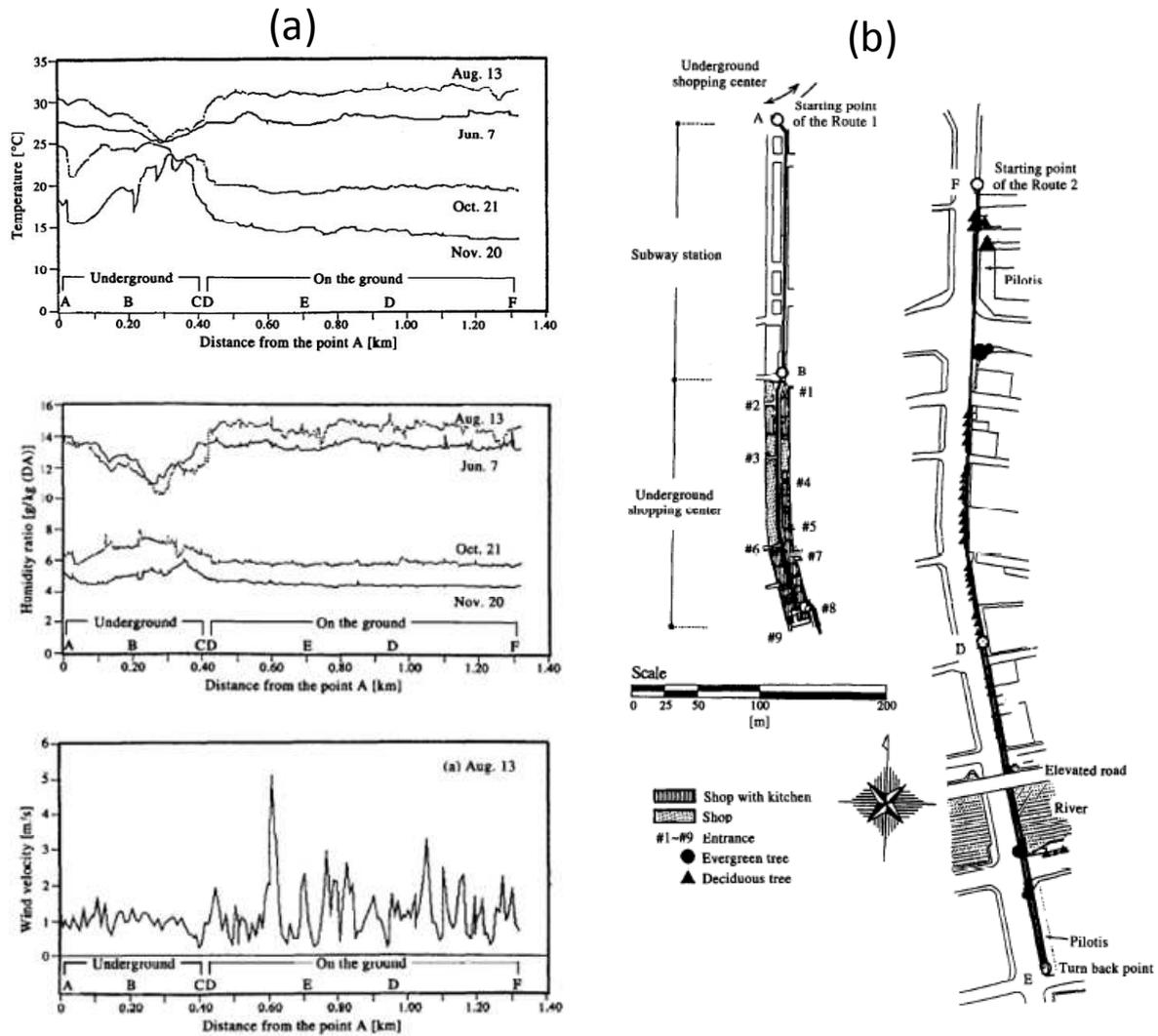


Figure 11. Analyse des variables : température, humidité et vitesse du vent (a) le long d'un parcours urbain « mixte » (b) (Nagara et al., 1996)

Ahmed-Ouameur & Potvin (2007) ont employé la même approche de mesure et d'analyse que Nagara (1996) mais avec l'avantage de disposer de l'appareil de mesure multifacteur (PAMPA) (cf. § 1.4.1.1) qui a été décrit précédemment (Figure 4). Des signaux sont obtenus sous forme de courbes représentant l'évolution des paramètres physiques en fonction du temps de parcours. La Figure 12 illustre ces courbes de mesures.

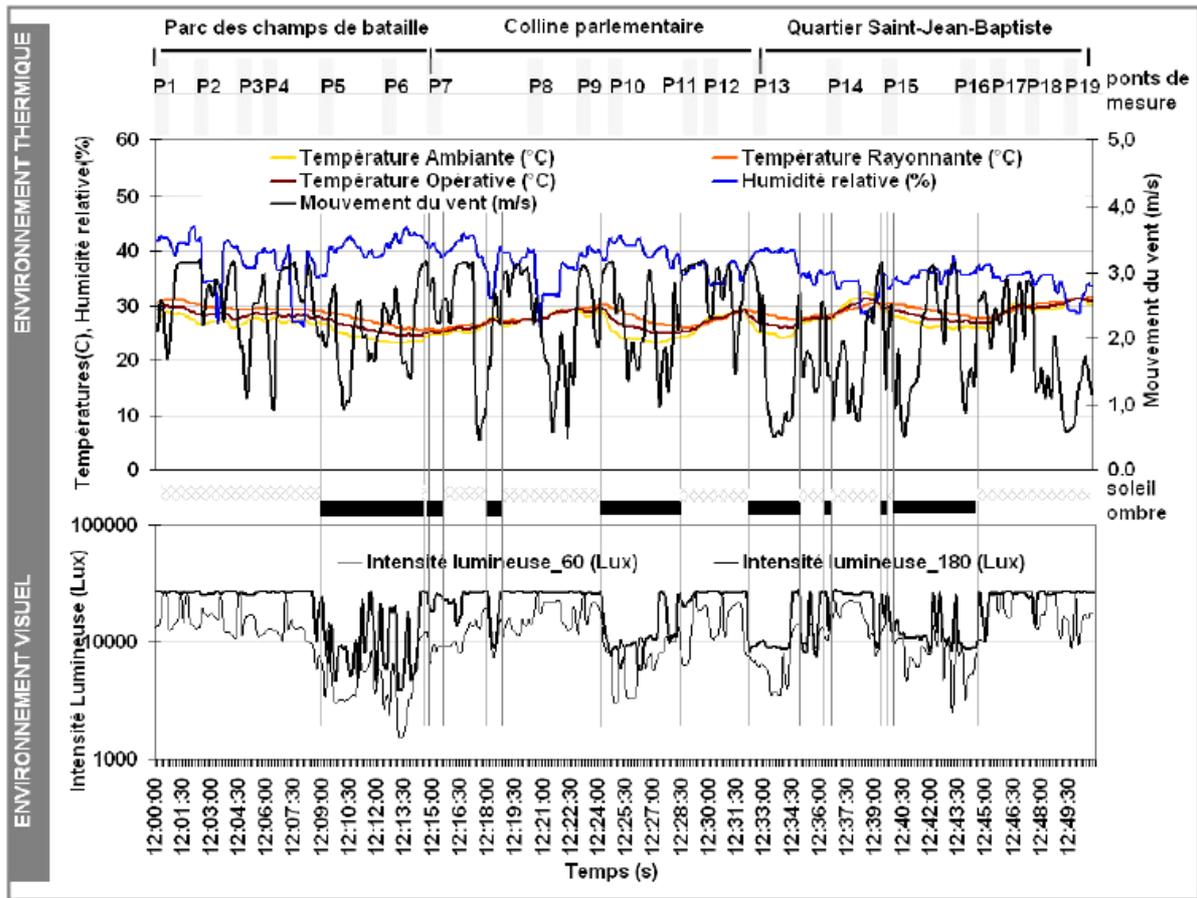


Figure 12. Signaux physiques mesurés le long d'un parcours (Ahmad-Ouameur & Potvin, 2007)

D'autres chercheurs se sont tournés vers la simulation des facteurs microclimatiques et du confort. C'est, par exemple, le cas de Bruse (2007) qui fait appel à l'outil de simulation des facteurs microclimatiques ENVI-MET afin de disposer des données physiques. Il analyse, ensuite, la variation de ces données le long de parcours virtuels. La figure 13 montre comment un parcours est d'abord sélectionné sur un modèle urbain numérique et comment le signal représentant la température le long du parcours est obtenu.

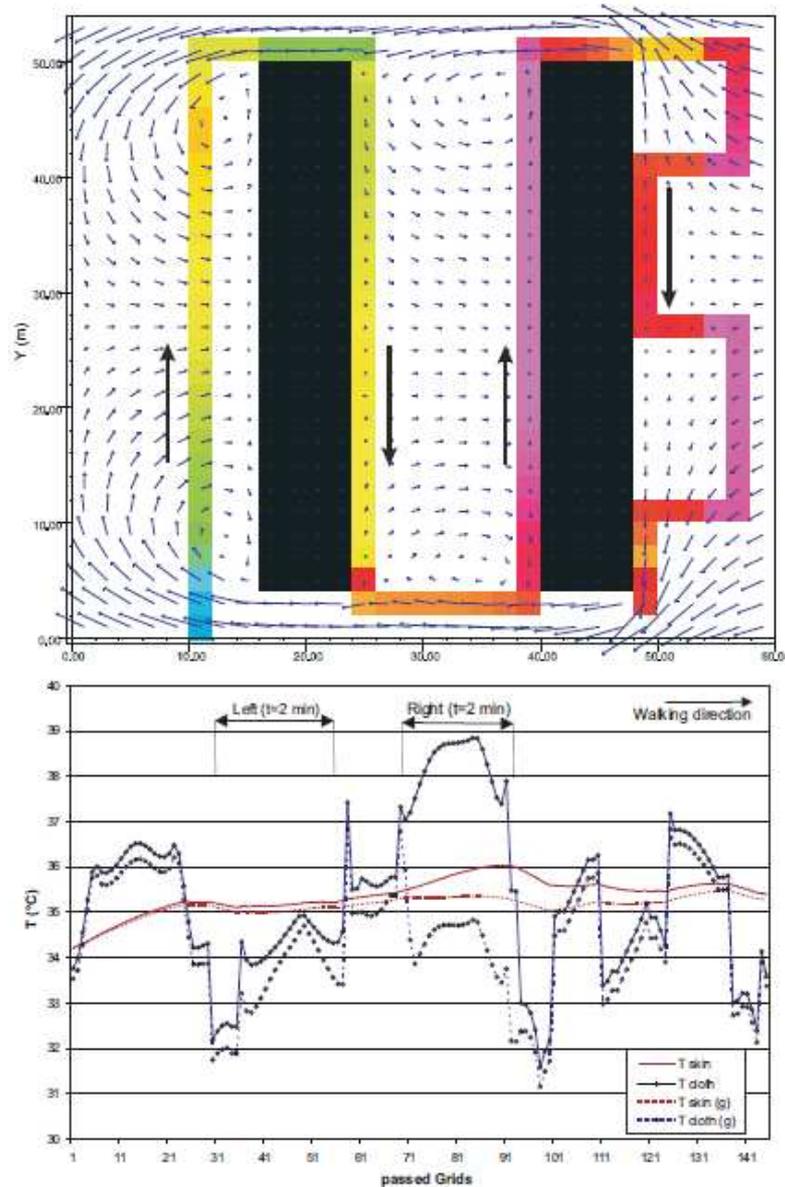


Figure 13. *Parcours virtuel et signaux de températures correspondants (Bruse, 2007) – Les couleurs au niveau du parcours sont relatives aux valeurs de la température de la peau (T_{skin})*

Ces méthodes d'analyse dynamique des facteurs physiques par l'intermédiaire de la construction de signaux représentant l'évolution de ces facteurs le long de parcours piétonniers rendent bien compte de la nature continue et irrégulière des stimuli présentés à la perception du piéton se déplaçant dans l'environnement urbain. Cependant les travaux ayant eu recours à cette approche n'ont pas suffisamment exploité les caractéristiques propres à ces stimuli (la forme générale, caractéristiques locales...) pouvant être utiles, à notre sens, afin de comparer ou de classer des parcours du point de vue de leurs spécificités physiques.

1.4.2. Recueil et analyse des données sensibles et qualitatives

Dans le but de saisir et de restituer les informations liées à la perception des phénomènes d'ambiances par l'individu, des méthodologies ont été proposées telles que les enquêtes sociologiques et psychosociologiques où les observations directes.

L'élaboration de telles méthodes d'investigation empirique doit tenir compte de certains problèmes liés à la nature même du phénomène des ambiances. Ces problèmes ont été notamment soulevés par Thibaud (1998) et concernent :

- (1) La **complexité** du phénomène des ambiances de part son caractère intersensoriel (il compose simultanément avec l'ensemble des modalités sensorielles) et interdisciplinaire (il implique différents registres d'analyse).
- (2) L'**objectivité** : difficulté de gérer à la fois des données objectives (mesurées) et des données subjectives liées à la perception et à l'expérience sensible.
- (3) La **réciprocité** entre les ressources de l'environnement construit et les usages dans le sens où l'on doit tenir compte du fait que l'environnement construit détermine l'usage et les pratiques sociales mais qu'en contre partie la présence humaine et la manière dont un espace est investi par les usagers affecte en retour les qualités sensibles du lieu. On parle dans ce cas de codétermination entre environnement construit et usage ou encore de « création continuée » (Thibaud, 1998).

Parmi les outils méthodologiques permettant de caractériser les modes d'appréhension des phénomènes d'ambiance, nous citons la technique des parcours commentés (Thibaud, 2001) qui se déroule en deux phases (Figure 14).

Le but dans la première phase est d'obtenir des « comptes-rendus » de perception en mouvement, toutes modalités sensibles confondues. Il est, en effet, demandé à des passants, usagers réguliers du lieu ou non, d'effectuer un cheminement en milieu urbain et de décrire, aussi précisément que possible, ce qu'ils perçoivent et ressentent au fur et à mesure du trajet. Les commentaires enregistrés sont analysés par l'identification de la redondance et de la récurrence des descriptions de mêmes natures provenant d'observateurs différents qui attestent d'une communauté de perceptions pour un site donné.

A l'issue de cette première phase, l'enquêteur doit être en mesure de classer les descriptions en fonction des lieux traversés et des conditions auxquelles elles se rapportent. Il disposera ainsi d'un ensemble d'informations et d'hypothèses sur les phénomènes sensibles relatifs aux différents sites.

Dans la seconde phase, les phénomènes identifiés au cours de la première phase servent de guide à une approche orientée du site : il s'agit lors de cette phase de relever les descriptions de ce qui est observable, enregistrable et mesurable sur place. L'objectif étant de préciser les conditions d'apparition des phénomènes perçus au travers d'observations ethnographiques (pratiques spatiales, comportements en public), de relevés architecturaux (formes, dimensions, matériaux, dispositifs techniques) ou de campagnes de mesures (acoustiques, lumineuses, thermo-aérauliques).

La synthèse finale de ces deux phases a pour objectif d'examiner dans quelle mesure et comment une configuration sensible émerge de l'interaction entre les données de l'environnement et les pratiques du public.

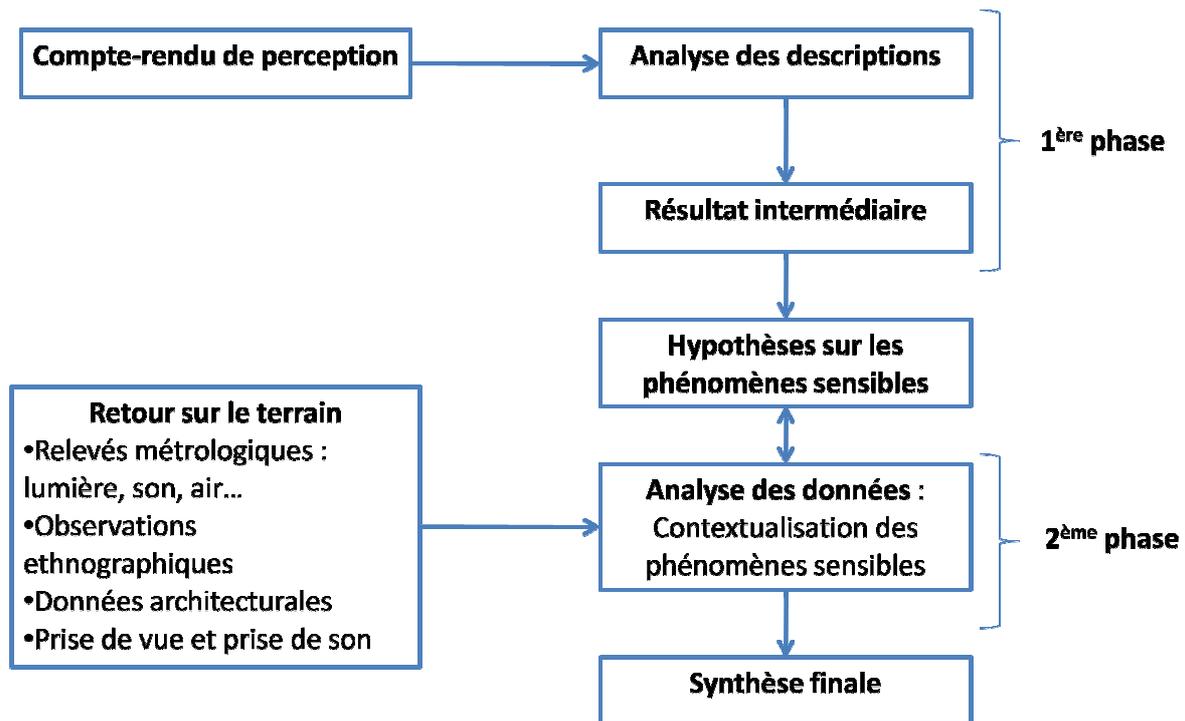


Figure 14. *Synoptique de la méthode des « parcours commentés » (Thibaud, 2001)*

La méthode des parcours commentés a été utilisée dans les travaux de Tahrani et al. (2006) pour rendre compte des perceptions liées aux ambiances lumineuses aux cours de cheminements urbains aussi bien dans un environnement réel que virtuel. Les informations recueillies grâce aux commentaires des sujets enquêtés ont, notamment, permis de mettre en évidence le recours du sujet à la description des ambiances dans leur dynamique spatiotemporelle en percevant les changements manifestes dans l'intensité lumineuse ou dans les variations de la qualité. Généralement, cette méthode permet aussi de révéler certains aspects comportementaux liés à la marche tels que le besoin du marcheur de s'arrêter à un endroit donné pour mieux observer ou pour apprécier un site ou, encore, le besoin d'accélérer pour atteindre plus rapidement un élément qui l'attire...

Toutefois, la méthode des parcours commentés présente aussi des limites. La première limite est liée à l'accumulation et à l'hétérogénéité des informations tant au niveau des discours recueillis lors de la première phase de la méthode, qu'au niveau des mesures et observations objectives effectuées lors de la seconde phase, ce qui rend difficile leur traitement, leur classement et leur interprétation.

La deuxième limite concerne la difficulté de la mise en correspondance entre les différentes données perceptives recueillies à partir des discours des différents sujets enquêtés sur un même parcours, mais également entre le corpus des données qualitatives (synthétisées à l'issue de la première phase) et l'ensemble des données objectives recueillies lors du retour sur le terrain. Il est, en effet, difficile de mettre en correspondance des phénomènes ayant eu lieu dans des configurations différentes du point de vue temporel, climatique, social... même si l'expérimentateur essaie de faire en sorte que les conditions de l'expérience soient semblables.

1.5. Synthèse intermédiaire

Nous avons abordé la notion d'ambiances architecturales et urbaines à travers les différentes significations que lui ont attribuées les auteurs ainsi qu'à travers les méthodes permettant de recueillir puis de restituer les données physiques et sensibles qui lui sont propres.

Il en ressort en particulier que cette notion est caractérisée par sa complexité tant au niveau des modalités sensibles auxquelles elle fait appel (intersensorialité), qu'au niveau des méthodes visant à l'étudier (interdisciplinarité).

Par ailleurs, la dualité entre objectivité et subjectivité y est omniprésente : les phénomènes d'ambiance impliquent à la fois des données physiques (quantitatives) et des données sensibles (qualitatives). Tout l'intérêt des méthodes d'analyse réside alors dans leur capacité à croiser ces deux catégories de données et à en extraire des connaissances pouvant contribuer à une meilleure compréhension des phénomènes d'ambiance.

Ce que nous retenons aussi de ce chapitre, c'est l'originalité des méthodes d'analyse dynamiques basées sur les parcours piétonniers comme moyen d'explorer l'espace urbain. Ces méthodes, qui rendent mieux compte de la nature des signaux physiques auxquels sont confrontés les piétons, nous ont inspirés dans notre démarche.

Enfin, les mécanismes et les processus de la prise d'information, qui font l'objet du prochain chapitre, jouent aussi un rôle primordial dans le concept d'ambiance. En effet, c'est par leur intermédiaire que l'individu fait l'expérience sensorielle de l'ambiance d'un lieu et peut se construire ses propres représentations cognitives de l'ambiance de ce lieu en rapport avec les représentations sociales des ambiances.

1.6. Références bibliographiques

Adolphe, L. (1998). *Eléments pour une théorie des ambiances architecturales et urbaines*. Les cahiers de la recherche architecturale. Vol 42/43. pp. 7-12.

Ahmed-Ouameur, F. & Potvin, A. (2007). *Microclimate and thermal comfort in outdoor pedestrian spaces - A dynamic approach assessing thermal transients and adaptability for the users*. in : American Solar Energy Society (ASES). 6 p.

Amphoux, P. (2003). *Dictionnaire de la géographie et des sciences de l'espace social* : Editions Belin , "Ambiance architecturale et urbaine". 1033 p.

ASCE (2004). *Outdoor human comfort and its assessment*. American Society of Civil Engineers (ASCE). 68 p.

Augoyard, J.-F. (1998). *Eléments pour une théorie des ambiances architecturales et urbaines*. Les cahiers de la recherche architecturale. vol 42/43. pp. 13-23.

Boussoualim, A. (2001). *Contribution à la caractérisation de l'impact et de l'incidence du microclimat sur l'usage et les activités en espace public extérieur*. Étude de cas à Blagnac. Thèse de doctorat. GRECO - Ecole d'Architecture de Toulouse. 256 p.

Bouyer, J. (2009). *Modélisation et simulation des microclimats urbains*. Impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. Thèse de doctorat. Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes. 324 p.

- Bruse, M.** (2007). Multi-Agent Systems - A new approach for assessing urban environmental conditions. Post-doctoral habilitation thesis at the Faculty of Geoscience, Ruhr-University. 197 p.
- Fanger, P.** (1972). Thermal comfort. Copenhagen, Denmark : Danish Technical Press.
- Gandemer, J. & Guyot, A.** (1976). Intégration du phénomène du vent dans la conception du milieu bâti, Guide méthodologique et conseils pratiques. Paris : Ministère de l'équipement. 130 p.
- Godefroid, J.** (2008). Psychologie: science humaines et cognitive. De Boeck Université. 1120 p.
- Groleau, D. & Marenne, C.** (1992). Simulation numérique de l'ensoleillement dans les projets urbains. in : Séminaire inter chercheur RRIA-1, RRIA-2. 13 p.
- Lawson, T. V.** (1978). The Wind Content of the Built Environment. Journal of Industrial Aerodynamics. Vol 3. pp. 93-105.
- Nagara, K., Shimoda, Y. & Mizuno, M.** (1996). Evaluation of the thermal environment in an outdoor pedestrian space. Atmospheric Environment. Vol 30, n° 3. pp. 497-505.
- Nikolopoulou, M.** (2004). Rediscovering the urban realm and open spaces (RUROS). Centre for Renewable Energy Sources, Department of Buildings, 5th Framework Program EU. 64 p.
- Péneau, J.-P.** (2000). Données Urbaines 3. Paris : Anthropos , "Les ambiances urbaines". pp. 375-386
- Pham, T., Musy, M., Zekri, E. & Teller, J.** (2007). Environmental data analysis in an environmental urban information system for urban planning. in: 10th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management (CUPUM). 15 p.
- Robitu, M.** (2005). Étude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain : influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Thèse de doctorat. Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes. 249 p.
- Sarradin, F.** (2004). Analyse morphologique des espaces ouverts urbains le long de parcours. Thèse de doctorat. Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes. 224 p.
- Siret, D., Musy, M., Ramos, F., Groleau, D. & Joanne, P.** (2006). Développement et mise en oeuvre d'un SIG 3D environnemental urbain. Revue Internationale de Géomatique. Vol 16, n° 1. pp. 71-91.
- Tahrani, S. & Moreau, G.** (2007). Analyzing urban daylighting ambiances by walking in a virtual city. Virtual Reality Conference, IEEE. pp. 227-230.
- Thibaud, J.-P.** (2001). L'espace urbain en méthodes, "La méthode des parcours commentés". Editions Parenthèses. 223 p.
- Thibaud, J.-P.** (1998). Eléments pour une théorie des ambiances architecturales et urbaines. Les cahiers de la recherche architecturale. Vol 42/43. pp. 77-90.
- Tixier, N.** (2001). Morphodynamique des ambiances construites. Thèse de doctorat. Ecole Polytechnique de l'université de Nantes. 391 p.
- Vinet, J.** (2000). Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain : caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Thèse de doctorat. Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes. 245 p.

Zekri, E., Hegron, G. & Legendre, A. (2007). Identification des liens entre comportements piétonniers et qualité environnementale des parcours. in : Le piéton et son environnement : quelles interactions? Quelles adaptations?. Les collections de l'INRETS. pp. 211-214.

Chapitre 2. La prise d'information – la sensation et la perception

2.1. Introduction

Étant intéressés dans cette thèse par l'étude des interactions qui pourraient exister entre les conditions microclimatiques et les comportements piétonniers, nous nous proposons, à ce stade, d'examiner l'ensemble des phénomènes qui surviennent en amont de la phase de prise de décision et qui concernent le processus de prise d'information.

L'homme a, en effet, besoin à tout moment de ses sens pour comprendre la réalité physique de l'environnement. En outre, il dispose de facultés d'adaptation lui permettant de réguler, plus ou moins consciemment, la quantité d'informations présentées à sa perception.

L'homme a également des motivations, des besoins et des attentes, fondées sur des expériences antérieures et sur des représentations cognitives, sociales et culturelles de son environnement. Ces motivations et représentations vont contribuer à filtrer les informations reçues par l'organisme, de sorte que seules les informations jugées « importantes » soient perçues et interprétées par le système nerveux central (SNC). Ceci est d'autant plus vrai dans le contexte d'un environnement urbain où le processus de prise d'information doit gérer de multiples stimuli provenant de différentes sources afin que ces stimuli soient traités et participent à la prise de décision.

Dans ce chapitre nous présentons la façon avec laquelle les sens captent l'information de l'environnement et la façon avec laquelle le cerveau interprète et organise cette information pour en tirer une représentation cohérente du monde qui l'entoure.

2.2. Définition de la perception

La définition de la perception telle que présentée dans le *Grand Dictionnaire de la Psychologie* (Larousse, 2002) est la suivante : « La perception est l'ensemble des mécanismes et des processus par lesquels l'organisme prend connaissance du monde et de son environnement sur la base des informations élaborées par les sens ».

Cette définition correspond au phénomène global de la prise d'information mettant en jeu deux catégories de processus fondamentaux : des processus physiologiques responsables du recueil de l'information et des processus mentaux chargés de la décoder. De ce fait, c'est une définition qui ne coïncide pas, et qui ne peut coïncider, avec toutes les théories de la perception, notamment la théorie écologique qui rejette la distinction entre la sensation et la perception.

Plusieurs théories de la perception ont été proposées depuis le début du XX^{ème} siècle. Ces théories s'organisent en fonction des réponses qu'elles apportent à trois grandes questions bipolaires : (1) la question de l'inné ou de l'acquis, (2) celle du rationalisme ou de l'empirisme et (3) celle du globalisme ou de l'élémentarisme.

2.2.1. La distinction sensation–perception

Selon les différentes théories et perspectives de la perception, il peut y avoir, ou pas, distinction entre la sensation (processus liés à l'excitation des capteurs sensoriels) et la perception (processus correspondant au traitement des informations provenant des capteurs sensoriels).

La théorie « écologique » de Gibson (1979), par exemple, rejette la distinction sensation–perception tout comme l'existence de processus de traitement. Pour Gibson, l'essentiel de l'information est dans le stimulus, et la tâche de l'organisme ne consiste qu'à saisir cette information. Alors que pour von Helmholtz (1989 [1867]), partisan de la perspective inférentielle, la distinction sensation–perception a tout son sens puisque, selon lui, les sensations constituent des « déclencheurs » pour la conscience, dont l'intelligence est chargée de comprendre le sens.

Dans le cadre de l'approche cognitive, la distinction sensation–perception a aussi une valeur importante, la sensation faisant référence aux traitements sensoriels des informations physiques indépendamment de leur signification et la perception étant plus directement concernée par les significations d'objet et donc par l'interprétation des informations sensorielles.

Il est clair, au vu de la complexité de ces processus mis en jeu, que la frontière entre la sensation et la perception n'est pas facile à tracer. Ces phénomènes surviennent, en effet, très rapidement et une organisation minimale de l'information sensorielle se produit avant même que les signaux atteignent le cerveau. Nous avons, tout de même, opté pour cette distinction sensation-perception pour développer la suite de ce chapitre.

2.3. La sensation : détection des stimuli

D'une façon générale, la sensation peut être définie par l'ensemble des processus permettant aussi bien la détection (par les récepteurs sensoriels) des changements physiques survenant dans l'environnement ou dans l'organisme, que la transmission de cette information au système nerveux central (Tavris & Wade 1999). Ainsi, en détectant les changements internes et externes à l'organisme et en acheminant au SNC des signaux afférents (sensations), les "sens" contribuent, par la diversité des perceptions qu'ils suscitent, à l'appréciation des propriétés de notre environnement immédiat et de notre état (bien être, malaise) par rapport à cet environnement.

Le trajet de toute sensation commence au niveau des récepteurs sensoriels: (la vue, l'ouïe, le toucher,...). Ceux-ci convertissent l'énergie provenant de la lumière, des ondes sonores, de la pression mécanique ou de molécules chimiques en impulsions électriques qui se propagent le long des nerfs sensitifs jusqu'au cerveau.

2.3.1. Evaluation de la sensibilité des sens (mesure de l'expérience subjective)

La psychophysique est la branche de la psychologie qui étudie le lien quantitatif entre les propriétés physiques des stimuli et la sensation. Afin d'évaluer (ou mesurer) la sensibilité des sens, les psychophysiciens ont proposé un certain nombre de concepts (sous forme de seuils) qui permettent de mieux cerner le lien entre le monde physique et la perception que nous en avons.

Selon Godefroid (2008), la prise d'information par l'organisme s'étage sur deux niveaux :

- 1) Au niveau inférieur, tout événement possédant les caractéristiques nécessaires et une énergie suffisante pour exciter un récepteur entraîne, de sa part, la production d'un message codé qui va être transmis au cerveau. On appelle « seuil physiologique », cette limite de sensibilité de chaque récepteur sensoriel sans laquelle l'excitation ne peut avoir lieu.
- 2) Au niveau supérieur, pour être perçue, l'information doit franchir un autre seuil, appelé « seuil perceptif », qui est celui de la reconnaissance consciente et qui est contrôlé par la formation réticulée⁹. Il a été montré par exemple, qu'un seul photon suffisait pour exciter la rétine, mais qu'il fallait cinq à huit de ces quanta d'énergie, pour que notre cerveau perçoive un point lumineux.

Si le seuil physiologique est déterminé génétiquement et n'est appelé à se modifier qu'avec l'âge ou d'autres facteurs physiologique, le seuil perceptif, lui, est beaucoup plus labile. Il dépend du niveau d'éveil du cerveau ainsi que l'attention portée par ce dernier à l'information qui a franchi le seuil physiologique.

La figure suivante (Figure 15) illustre à quels niveaux pourraient se situer les seuils physiologique et perceptif par rapport à l'intensité d'un stimulus.

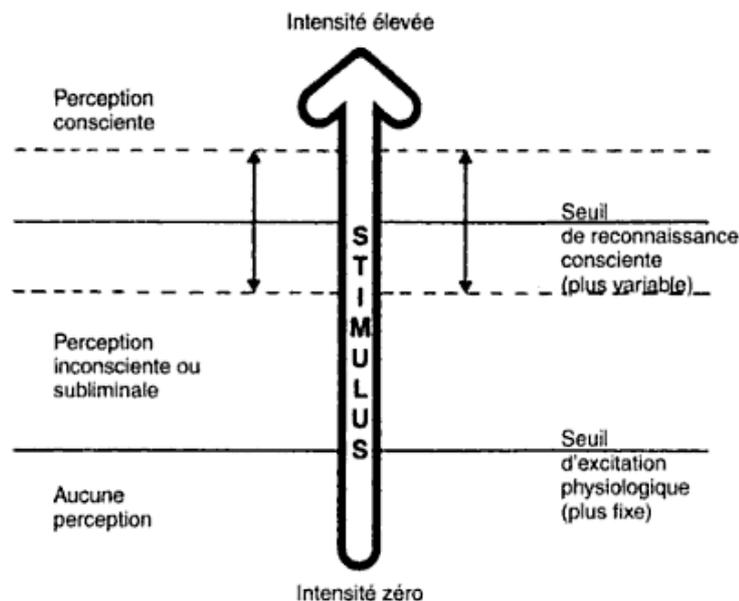


Figure 15. *Seuil physiologique, seuil perceptif et l'hypothèse de la zone subliminale (Godefroid, 2008) – Des stimuli peuvent dépasser le seuil physiologique mais sans atteindre le seuil de reconnaissance. Ils restent dans ce que Dixon (1971) appelle la zone subliminale*

⁹ La **formation réticulée** (ou **formation réticulaire**) est une structure nerveuse du tronc cérébral à l'interface des systèmes autonome, moteur et sensitif. Elle intervient dans la régulation de grandes fonctions vitales (comme les cycles veille-sommeil), le contrôle d'activités motrices réflexes ou stéréotypées, comme la marche ou le tonus postural et dans des fonctions cognitives telles que l'attention. De par son rôle central dans la régulation de la vigilance, les lésions de la formation réticulée entraînent souvent un coma.

Il existe donc une zone de sensibilité entre ces deux seuils, au niveau de laquelle certains messages en provenance des récepteurs ne sont pas enregistrés par la conscience. L'hypothèse émise par certains chercheurs et particulièrement Dixon (1971) est que cette zone sous le seuil de la conscience, qui constitue, de ce fait une zone subliminale, se situerait dans les centres inférieurs de notre cerveau. S'il en était ainsi, il existerait donc, à tout moment, des centaines d'informations dont nous ne prendrions pas conscience, mais qui seraient pourtant enregistrées à des niveaux plus primitifs.

Une telle hypothèse permet d'envisager l'explication de plusieurs phénomènes controversés : la défense perceptive et la perception subliminale sur lesquels nous reviendrons plus loin dans ce chapitre (cf. § 2.5.2).

Enfin pour finir, il est intéressant d'évoquer deux autres seuils de référence dans l'évaluation de la sensibilité perceptive : (1) le seuil absolu, qui correspond à la plus petite quantité d'énergie physique qu'une personne peut détecter d'une façon fiable et (2) le seuil différentiel qui consiste en la différence minimale d'amplitude nécessaire pour différencier deux stimuli. A propos du seuil différentiel, la loi de Weber¹⁰ stipule que le changement nécessaire pour produire une différence tout juste perceptible entre deux stimuli est une proportion constante du stimulus original.

2.3.2. Autres aspects sensoriels

Les récepteurs sensoriels sont conçus pour répondre aux contrastes de l'environnement, c'est pourquoi la variété dans la stimulation est essentielle pour le maintien de la sensation et l'attention. À l'inverse, il arrive que les sens se trouvent assaillis par un stimulus trop intense ou un flot de stimulations, au point que le cerveau responsable de leur traitement risque souvent d'être en état de « surcharge informationnelle » et se trouve dans l'incapacité de trier et d'organiser ces informations.

C'est pourquoi entrent en jeu des mécanismes régulateurs maintenant la quantité de stimuli à un niveau plus ou moins constant et acceptable pour l'organisme.

Le plus important de ces mécanismes est l'« adaptation sensorielle » (Godefroid, 2008), qui repose sur la tendance des systèmes sensoriels à réagir de moins en moins à l'exposition continue ou répétée à un stimulus.

Ainsi, dès qu'une stimulation devient constante et répétitive, le cerveau finit par l'ignorer, et cela, d'autant plus vite qu'elle est de faible intensité. Par contre, une stimulation trop puissante entraîne plus difficilement une adaptation. Une lumière trop vive, un froid ou une chaleur extrême, ou encore une odeur trop forte ou un son intense, demeurent le plus souvent capables de prolonger l'excitation du récepteur concerné. L'organisme doit alors entreprendre une démarche adaptative au plan comportementale pour éviter ou transformer cette situation à laquelle il ne peut s'adapter au plan perceptif.

Cette notion d'adaptation sensorielle est très présente dans certains travaux de recherches transversaux portant, par exemple, sur le confort, et plus précisément, sur la notion de confort adaptatif que nous évoquerons dans le Chapitre 3.

¹⁰ Cité dans Tavis & Wade (1999)

L'autre mécanisme mis en œuvre afin d'éviter une surcharge informationnelle, est l'« attention sélective » qui peut être considérée comme un filtre ou comme un modérateur de cette surcharge. C'est, entre autres, grâce à ce mécanisme que nous pouvons concentrer toute notre attention sur une tâche importante, en ignorant, par exemple, les bruits, les mouvements et d'autres phénomènes habituels qui se produisent autour de nous. En fait, le SNC n'interprète pas toutes les informations captées par les récepteurs sensoriels ; il accorde en quelque sorte la priorité à certaines informations.

Ces deux mécanismes (adaptation sensorielle et attention sélective) tendent à rendre plus difficile la distinction entre le phénomène de sensation et le phénomène de perception. Ils font, en effet, intervenir des processus de traitement plus ou moins conscient des informations afférentes recueillies par le cerveau (ces processus de régulations pourraient être attribués au phénomène de perception lorsqu'ils sont conscients et au phénomène de sensation lorsqu'ils sont inconscients). Par ailleurs, le cerveau intervient également par rétroaction dans ces processus de régulation, en envoyant des signaux efférents aux récepteurs sensoriels, il leur « commande » de gérer, en les ignorant ou en les modérant, les informations qui leur sont présentées, intervenant ainsi sur les processus sensoriels.

L'étude des principaux concepts liés aux sensations montre à quel point les sens sont bien adaptés aux exigences environnementales. Cependant, la sensation ne suffit pas, à elle seule, à rendre compte de la complexité des phénomènes impliqués pour que des stimulations sensorielles atteignent le SNC et soient perçues. Les signaux reçus et transférés par les organes sensoriels passent par une série de processus pour aboutir à la *perception* d'informations sensorielles.

2.4. La perception : traitement de l'information sensorielle

La question qui se pose lorsqu'on tente de comprendre la façon dont nous arrivons à nous représenter la réalité, est celle de savoir comment, parmi la multitude de stimulations dont il est assailli, le cerveau parvient-il à organiser les sensations pour les transformer en percepts.

2.4.1. L'organisation perceptive

L'organisation perceptive fait intervenir différents mécanismes dont le but est d'aboutir à la reconnaissance des objets, des formes, des personnes, des situations...

Nous allons approfondir cet aspect en nous appuyant sur la perspective des cognitivistes pour lesquels la perception constitue la première étape dans le traitement de l'information consistant à élaborer la signification à attribuer aux sensations. Cette étape repose sur la réalisation d'un ensemble d'opérations effectuées à partir des signaux en provenance des différentes modalités sensorielles.

Selon Godefroid (2008), l'organisation des perceptions dépend de deux types de processus opposés mais qui peuvent toutefois fonctionner de façon complémentaire :

- 1) Le traitement suscité par les qualités intrinsèques des données : qui consiste en un traitement de « bas en haut » dépendant de processus ascendants, par lesquels nous percevons les objets à partir de l'identification de leurs attributs élémentaires que nous cherchons alors à intégrer.

- 2) Le traitement dirigé de par les connaissances : qui s'effectue de « haut en bas ». Il s'appuie sur des processus descendants par lesquels la perception d'une situation découle de nos connaissances, de nos croyances et de nos attentes. Il s'agit là de la base du raisonnement proposé par les cognitivistes selon lesquels l'organisation et l'interprétation des sensations s'effectue dans le cerveau à partir des connaissances qui y sont stockées.

Neisser (1967) va tenter d'articuler les deux approches précédentes en proposant la théorie du cycle perceptif (Figure 16) selon laquelle la reconnaissance d'un objet ou d'une situation s'effectue à la suite d'un traitement de l'information, orienté vers une recherche de signification. Une telle démarche s'appuierait au départ sur l'expérience antérieure du sujet, lui ayant permis la constitution de schémas d'objets, de visages ou de situations. La perception s'inscrirait ainsi dans un cycle selon lequel nos schémas dirigent l'exploration de l'objet, afin d'en extraire les informations pertinentes qui, à leur tour, modifient les schémas et entraînent la réorientation éventuelle de l'exploration.

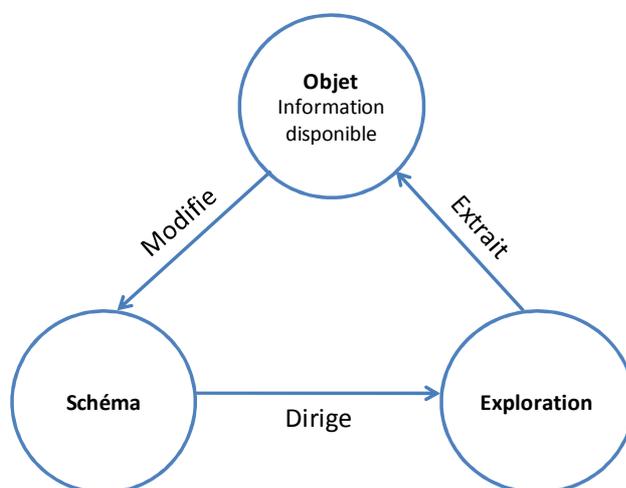


Figure 16. *Le cycle perceptif (Neisser, 1967) – les schémas en mémoire dirigent l'exploration de l'objet, afin d'en extraire les informations pertinentes qui, à leur tour, modifient les schémas et entraînent la réorientation éventuelle de l'exploration*

Ce modèle abstrait des perceptions introduit la notion essentielle d'une entité fonctionnelle qui est modifiée par les interactions avec le milieu environnant et devient ainsi une sorte de « plan » pouvant guider des actions ou des explorations ultérieures (Delorme et Flückiger, 2003). De ce point de vue, l'hypothèse de présence d'une médiation dans le processus de la perception oppose clairement les modèles cognitifs aux théories des perceptions directes qui réfutent la présence de notion de représentation ou d'intermédiaire symbolique dans la relation entre les stimuli et la réponse.

Les cognitivistes ont aussi recours à des modèles basés sur la théorie de l'information pour représenter l'organisation des perceptions. Les premiers schémas proposés présentaient en général trois phases de traitement qui concernent respectivement : 1) la détection des stimuli ; 2) leur stockage et leur transformation ; 3) la production des réponses, soumise le plus souvent à un contrôle moteur dépendant parfois d'un système de rétroaction.

D'autres adjonctions ont, par la suite, été apportées à ce traitement séquentiel en trois étapes et concernent principalement l'intervention de diverses formes de stockage (mémoire à court terme, mémoire à long terme et mémoire de travail)

Le schéma général de circulation d'information lors du processus perceptif (Solso, 1991) est présenté dans la Figure 17. Les étapes du processus interne de traitement ne correspondent pas forcément à autant de fonction du cerveau, elles représentent un simple support visuel à la conceptualisation.

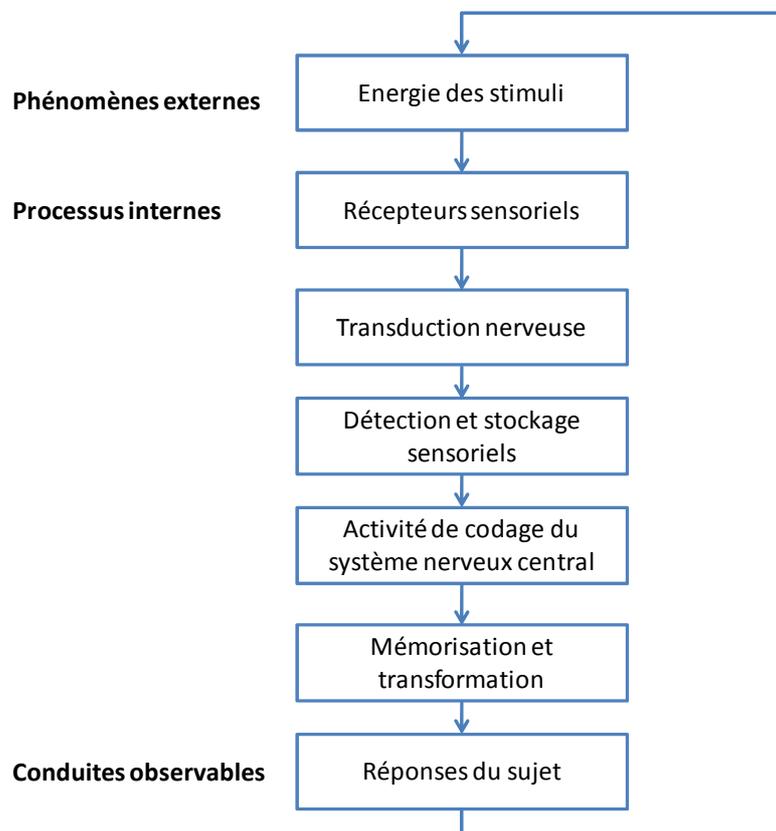


Figure 17. Schéma de circulation de l'information (flow chart) (Solso, 1991)

L'approche cognitive expliquant l'organisation des perceptions, a fait l'objet de critiques puisque certains auteurs considèrent que cette approche est celle de « l'homme machine » qui véhicule une image de l'être humain propice à l'idéologie de la performance et du management. Ils considèrent donc que cette approche nous éloigne de l'objet d'étude principal : l'homme.

A l'inverse, d'autres auteurs soulignent les progrès accomplis par cette discipline depuis le milieu du XX^e siècle qui peuvent aussi être considérés dans la perspective d'une meilleure connaissance de l'homme, la démarche analytique et la modélisation informationnelle n'étant là que pour guider le scientifique vers des questions précises ouvertes à l'expérimentation : l'image du cerveau-ordinateur n'est qu'une métaphore.

La section suivante est consacrée à une hypothèse non moins controversée qui est celle de la perception subliminale.

2.4.2. La perception subliminale

Lorsque nous avons présenté les différents aspects du phénomène de la sensation, nous avons évoqué l'hypothèse de l'existence d'une zone subliminale située entre le seuil physiologique et le seuil perceptif (cf. § 2.4.2).

Nous avons aussi évoqué le fait que le seuil perceptif dépend du niveau d'activation du cerveau ainsi que l'attention portée par ce dernier à l'information qui a franchi le seuil physiologique. Or, il s'avère aussi que le cerveau peut, de lui-même, abaisser le seuil perceptif en cas de stimuli intéressants et l'élever en cas de stimuli neutres ou anxiogènes, on parle dans ce dernier cas de « défense perceptive » (Godefroid, 2008).

Les premiers travaux sur la perception subliminale (dite aussi perception inconsciente ou implicite) s'inscrivent dans la perspective de la théorie transactionnelle (cf. § 2.3.1) selon laquelle les perceptions seraient influencées par des facteurs non perceptifs tels que les attentes, les motivations et les émotions. Quelques auteurs comme Dixon (1971) ont essayé d'étudier le mécanisme de la perception subliminale en se focalisant sur le « devenir » des informations, qui pour une raison ou une autre, n'ont pas pu franchir le seuil de la perception consciente. Selon cet auteur, toutes les informations exclues de la conscience seraient traitées à un niveau rudimentaire. Elles constitueraient ainsi le réservoir à la base de l'imagerie spontanée et des associations libres, et joueraient à leur tour un rôle d'activation de l'organisme. Ce rôle d'activation peut, entre autres, être mis en évidence dans les rêves ou dans le cas de certaines intuitions.

Bien que la notion d'inconscient prête toujours à controverse, la plupart des psychologues quelque soit leur orientation théorique admettent que, même hors du champ de la conscience, les stimuli peuvent avoir une influence sur l'individu. A ce sujet, Jacoby, un théoricien important dans le domaine de la perception inconsciente pense que «les influences inconscientes sont partout. Il est évident que les gens planifient et agissent parfois d'une manière consciente. Cependant, le comportement est plus fréquemment influencé par les processus inconscients. » (Jacoby et al., 1992, p.82).

Nous estimons que cette notion de perception subliminale pourrait donc jouer un rôle non négligeable dans les processus de prise d'information et de décision des piétons parcourant un environnement urbain. En effet, la faible intensité des stimuli microclimatiques pourrait franchir le seuil physiologique sans pour autant parvenir à la conscience du sujet. De plus, à cette faiblesse s'associe le caractère continu et homogène dans le temps de ces stimuli. Or les signaux homogènes ont tendance à être mis en « arrière-plan », du fait du phénomène d'« adaptation sensorielle » (cf. § 2.4.2) par rapport aux stimuli qui varient rapidement dans le temps. D'autre part, si l'on reprend le modèle cognitif, on pourrait rajouter que le traitement des signaux microclimatiques serait d'autant plus malaisé que les catégories cognitives et le vocabulaire nécessaire à leur identification sont, du moins dans la culture occidentale, peu développés.

Une information qui n'entre pas dans des cadres de représentation cognitive très élaborée pourrait avoir tendance à être ignorée au profit de stimuli acoustiques et plus encore visuels.

Les facteurs climatiques, dont la perception pourrait être en partie inconsciente, font l'objet de la section suivante dans laquelle nous examinons les mécanismes physiologiques et physiques intervenant dans la perception de ces facteurs.

2.5. Perception des facteurs climatiques

Nous présentons dans ce paragraphe les différents aspects de la perception des facteurs climatiques et plus précisément la température et le vent qui nous intéressent particulièrement dans le contexte de ce travail. Ces aspects sont à la base de l'élaboration de certains modèles de confort thermique et aéraulique qui seront présentés dans le prochain chapitre (Chapitre 3).

2.5.1. La sensation thermique

La peau permet au corps d'exercer une régulation thermique adaptée aux exigences de l'environnement en retenant ou en favorisant l'élimination de la chaleur. Elle procure aussi des sensations thermiques reliées aux stimuli qui entrent en contact avec elle (Delorme et Flückiger, 2003).

Les sensations de chaud ou de froid relèvent d'un phénomène d'adaptation (ou de régulation) dans le sens de la modification du zéro physiologique. Ce dernier peut se définir comme une zone neutre de complète adaptation thermique ou, autrement dit, comme une zone d'indifférence thermique. Le zéro physiologique est déterminé essentiellement par deux facteurs, la région cutanée concernée et la vitesse de variation de la température.

Selon les endroits de la peau stimulés et le rythme de variation des températures, on peut ressentir des différences aussi minimales que 1°C et rester indifférent à des variations de 8°C. En fait, pour des températures extrêmes, l'adaptation est beaucoup plus longue.

L'adaptation se traduit en cas de forte chaleur, par la transpiration ou par la vasodilatation périphérique pour évacuer le surplus de chaleur à l'intérieur du corps. Dans le cas de basses températures, la régulation se fait en retenant la chaleur à l'intérieur du corps, par vasoconstrictions périphériques ou grâce au frissonnement (Bell et al., 2005).

Par ailleurs, la sensibilité aux changements de la température obéit à un principe de sommation spatiale : plus grande est la surface cutanée exposée aux changements de température, plus grande est la sensibilité. Autrement dit, si on double la surface exposée, on peut réduire de moitié le changement de température requis pour la détection (Sherrick et Cholewiak, 1986)¹¹. Les mouvements d'air sont également déterminants dans l'évaporation et la modification de la température du corps.

2.5.2. La perception du vent

Même si le corps dispose de récepteurs spécialisés dans la détection de la lumière, du son, de l'odeur, etc., il n'y a pas de récepteurs spécifiques à la détection du vent. Ainsi, pour détecter le vent, nous devons compter sur plusieurs systèmes perceptifs : pour capter la présence du vent, les détecteurs de pression au niveau de la peau peuvent indiquer cette présence. S'il s'agit d'un vent particulièrement chaud ou froid, sec ou humide, les récepteurs de température de la peau peuvent nous le signaler. Quant à la force du vent, l'effort musculaire déployé pour y résister est un indicateur efficace de cette force. Finalement, l'intensité et la fréquence du bruit du vent est aussi un indicateur de sa présence et de sa force.

Les mouvements d'air sont déterminants dans l'évaporation et ainsi la modification de la température du corps. Le vent influence la perception et la sensation du froid ; il augmente la perte de chaleur. Le Tableau 1 donne un aperçu de l'influence de la vitesse du vent (m/s) sur la température perçue (°C).

¹¹ Cités dans Delorme et Flückiger (2003)

Vitesse du vent (m/s)	0	2,1	7	11,5	16,2
Température perçue (°C)	0	-1,6	-10,5	-16,11	-18,3
	-5	-6,6	-18,3	-23,3	-26,1
	-10	-12,2	-52	-31,3	-33,8
	-15	-17,2	-31,66	-38,3	-41,6
	-20	-22,7	-38,33	-45,5	-46,6

Tableau 1. *Température perçue (°C) en fonction de la vitesse du vent (m/s) (Bell et al., 2005)*

2.6. Synthèse intermédiaire

Ce chapitre a été consacré à l'étude des différents mécanismes de prise d'information par l'individu des propriétés de son environnement immédiat. Nous avons vu que certaines théories de la perception, contrairement à d'autres, opèrent une distinction entre le phénomène de la sensation (dans le sens : détection des stimuli) et le phénomène de la perception (dans le sens : traitement de l'information provenant des sens). Dans la présentation de ce chapitre, nous avons opté pour la séparation entre ces deux phénomènes en adoptant l'approche cognitive de la perception. En effet, par rapport à nos objectifs, cette approche nous paraît proposer une modélisation plus heuristique et pragmatique des processus de prise d'information.

Aussi, nous retenons, parmi les aspects présentés, l'importance des notions d'« adaptation sensorielle » et d'« attention sélective » qui, par l'intermédiaire de la modification du « seuil perceptif », peuvent influencer sur les conditions à partir desquelles l'organisme prend connaissance des informations captées par les sens.

Nous avons également pu constater que des stimuli peuvent toutefois être captés par les récepteurs sensoriels, sans pour autant atteindre le seuil perceptif. Selon l'hypothèse de la « perception subliminale » (ou inconsciente), ces informations ne sont pas forcément ignorées par l'organisme, elles peuvent, dans certaines situations, intervenir dans le processus d'activation du cerveau et influencer sur la perception, voire sur le comportement de l'individu. Cette notion de perception subliminale nous semble donc pertinente dans le contexte d'un environnement urbain dans lequel le piéton, focalisé sur un but et absorbé par sa marche, est confronté à d'innombrables stimuli (parmi lesquels les variables climatiques), dont la plupart échappe à son attention. On peut donc faire l'hypothèse que, dans certains cas, le piéton pourrait être amené à faire des choix sous l'influence de faibles variations micro climatiques qu'il aurait perçues à un niveau subliminal, sans pour autant que ces sensations aient été l'objet d'un traitement conscient.

Enfin, nous avons abordé dans ce chapitre les différents mécanismes de perception des facteurs climatiques auxquels nous nous intéressons particulièrement dans le cadre de ce travail. Les aspects liés à la perception de ces facteurs sont à la base des modèles de confort dans les espaces extérieurs.

2.7. Références bibliographiques

- Bell, P. A., Greene, T., Fisher, J. & Baum, A. S.** (2005). *Environmental Psychology*. 5ème édition. Fort Worth (TX) : Hartcourt College Publishers. 654 p.
- Delorme, A. & Flückiger, M.** (2003). *Perception et réalité*. Bruxelles : De Boeck Université. 516 p.
- Dixon, N. F.** (1971). *Subliminal Perception : The Nature of a Controversy*. New York : McGraw-Hill. 362 p.
- Gibson, J. J.** (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston : Houghtin Mifflin. 332 p.
- Godefroid, J.** (2008). *Psychologie: science humaines et cognitive*. Bruxelles : De Boeck Université. 1120 p.
- von Helmholtz, H.** (1989 [1867]). *Optique physiologique*. Paris: Jacques Gabay. 567 p.
- Ittelson, W. H.** (1960). *Visual space perception*. Springer. 212 p.
- Jacoby, L. L., Toth, J. P., Lindsay, D. S. & Debnar, J. A.** (1992). Perception without awareness : R.F. Bornstein & T.S. Pittman , "Lectures for a layperson: Methods for revealing unconscious processes". pp. 81-120.
- Larousse** (2002). *Grand dictionnaire de la psychologie*. Larousse. 1060 p.
- Neisser, U.** (1967). *Cognitive psychology*. Englewood Cliffs (NJ) : Prentice-Hall. 351 p.
- Sherrick, C. E. & Cholewiak, R. W.** (1986). *Handbook of perception and human performance*. New York : K. Boff, L. Kaufman, & J. Thomas , "Cutaneous sensivity". pp. 1-70.
- Solso, R. L.** (1991). *Cognitive psychology*. Boston : Allyn and Bacon. 564 p.
- Tavris, C. & Wade, C.** (1999). *Introduction à la psychologie : les grandes perspectives*. Paris, Bruxelles : De Boeck Université. 365 p.

Chapitre 3. Le confort dans les espaces urbains extérieurs

3.1. Introduction

La perception des caractéristiques physiques de l'environnement constitue une composante importante de la relation entre l'utilisateur et son environnement immédiat. Cette perception, et notamment la perception plus ou moins consciente des caractéristiques microclimatiques, va jouer un rôle important dans la détermination du niveau de confort de l'individu, tant du point de vue physiologique que psychologique.

La notion de confort dans les espaces urbains extérieurs, *a priori* subjective, est difficilement quantifiable et résulte d'un ensemble de paramètres :

- l'activité de l'individu ;
- la présence et les activités des autres individus dans l'espace urbain ;
- le climat et la saison dont dépend en partie le vêtement porté ;
- les facteurs microclimatiques (vent, lumière, température...)
- l'état physique de l'individu (âge, santé...)
- ainsi que son état psychologique, notamment ses attentes, ses besoins et son expérience.

Les travaux entrepris, pour tenter d'appréhender l'influence des paramètres microclimatiques sur le confort des usagers en milieu urbain extérieur, se heurtent à la complexité des paramètres microclimatiques, qui se caractérisent par de fortes variabilités spatiale et temporelle. Ces travaux ont, généralement, abordé la problématique du confort selon deux approches fondamentalement différentes : (1) une approche théorique basée sur des connaissances issues de la physiologie et des sciences physiques et (2) une approche psychologique traitant de l'évaluation subjective du confort par les usagers.

Les chercheurs amenés à s'intéresser au confort, qu'il soit aéraulique, thermique ou visuel, ont essayé de concevoir des critères et des indicateurs qui, pour la plupart, étaient initialement destinés à évaluer le niveau de confort dans les espaces intérieurs. C'est donc seulement dans un second temps qu'ils ont été étendus aux espaces urbains extérieurs. Cette extension constitue l'une des raisons ayant amené plusieurs auteurs à critiquer la validité de ces critères et indicateurs en mettant en évidence l'existence de paramètres d'adaptation pouvant intervenir dans l'évaluation du confort.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons plus particulièrement aux travaux ayant porté sur l'évaluation du confort aéraulique, thermique et visuel.

3.2. Le confort aéraulique

Le vent est un des facteurs les plus importants pouvant influencer sur les conditions de confort des piétons dans les espaces ouverts extérieurs. Nous nous attacherons donc à exposer les principaux effets du vent sur le confort du piéton et nous présenterons des exemples de critères du confort aéraulique.

3.2.1. Les effets du vent sur le confort du piéton

Le vent n'est pas un phénomène constant, il varie continuellement en direction et en grandeur (phénomène de rafales). Ce caractère instable oblige constamment le piéton à s'adapter pour rechercher un état d'équilibre physique et physiologique.

Les effets directs du vent peuvent être divisés en deux catégories principales : les effets mécaniques et les effets thermiques.

Concernant les effets mécaniques, des observations ainsi que les expérimentations réalisées sur le terrain et en laboratoire mettent en avant le rôle fondamental que jouent le vent et sa fluctuation sur le confort mécanique de l'homme en entravant son déplacement (Jordana et al., 2008). En effet, lorsque le vent souffle, il crée une force, proportionnelle au carré de la vitesse. Cette force s'exerce sur le piéton et ce dernier doit la vaincre ou la compenser afin de garder l'équilibre dans son déplacement (RUROS, 2004). De ce fait, plus la vitesse du vent est élevée, plus il faut lutter contre le vent et plus la gêne sera grande.

L'échelle de Beaufort reprise par Lawson & Penwarden (1975) (Tableau 2. Tableau 2) relate différents effets « mécaniques » du vent sur le piéton.

Force Beaufort	Vitesse d'air (m/s) à 2 m du sol	Effets « mécaniques » du vent
0 et 1	0 à 1,3	Calme, pas de vent sensible.
2	1,3 à 2,7	Le vent est ressenti sur le visage, Les feuilles bruissent.
3	2,7 à 4,5	Les cheveux sont agités, Les feuilles et les petits rameaux sont en mouvement permanents, Le vent déroule de petits drapeaux.
4	4,5 à 6,7	Les cheveux sont décoiffés, La poussière et les papiers sont soulevés du sol, Les petites branches s'agitent
5	6,7 à 8,9	La force du vent est ressentie sur le corps, La neige commence à s'envoler, Les petits arbres commencent à osciller.
6	8,9 à 11,2	Il est difficile de marcher droit, Les parapluies sont difficiles à utiliser, Le vent soulève la neige au dessus des têtes, Les grosses branches se mettent en mouvement, Le vent siffle dans les fils téléphoniques.
7	11,2 à 13,9	Il est difficile de marcher contre le vent, Les arbres sont totalement en mouvement.
8	13,9 à 17	Tempête, La marche est entravée, Les branchent se cassent.
9	Supérieure à 17	Forte tempête, Risque de perdre l'équilibre, Marche dangereuse.

Tableau 2. *Echelle de Beaufort (Lawson & Penwarden ,1975)*

D'un autre point de vue, le vent avec son comportement fluctuant, affecte aussi les échanges thermiques entre le corps humain et le milieu extérieur, ceci essentiellement par l'intermédiaire du mécanisme de perte/gain de chaleur par convection. Le vent peut ainsi amplifier une sensation d'inconfort thermique ou au contraire la diminuer lorsqu'il fait chaud.

3.2.2. Les critères du confort aéraulique

Plusieurs critères du confort « mécanique » liés au vent ont été proposés par différents chercheurs. Ces critères sont généralement utilisés comme outil d'aide à la décision dans le domaine de l'aménagement des espaces urbains.

Notons que ces critères impliquent généralement la vitesse moyenne \bar{U} (et parfois aussi la vitesse maximale des rafales \hat{U}) (cf. § 1.3.1.2). Cette vitesse est comparée à une valeur seuil afin d'évaluer si une personne est en situation de confort ou d'inconfort.

En outre, et partant du fait qu'il est inconcevable de s'attendre à ce que les conditions aérauliques soient confortables en permanence, les critères de confort sont spécifiés en fonction de la fraction du temps (%) pendant laquelle un seuil de vitesse est dépassé (cf. chapitre 1 - § 1.3.1.2) cette fraction de temps est appelée : probabilité de dépassement (ASCE, 2004).

Ces critères sont également spécifiés en fonction du type d'activité humaine dans l'espace extérieur. A titre d'exemple, le seuil de la vitesse du vent pour le confort des personnes assises dans un espace tel qu'une terrasse de café sera moins élevé que celui d'un espace où les gens marchent.

Le Tableau 3. Tableau 3 basé sur une probabilité de dépassement de 20%¹², donne un exemple de critère de confort simple proposé par rapport à trois types d'activités : station assise, station debout, marche.

Activité	Intervalle de confort pour \bar{U} (m/s)
Inconfortable quelque soit l'activité	> 5.4
Marche	0 – 5.4
Station debout	0 – 3.9
Station assise	0 – 2.6

Tableau 3. Exemple d'un critère simple basé sur une probabilité de dépassement de 20% (ASCE, 2004)

D'après le critère de confort présenté dans le Tableau 3, si la vitesse moyenne du vent \bar{U} est comprise dans les intervalles de vitesse correspondant aux différentes activités pendant 80% du temps, on dira que les conditions aérauliques sont confortables.

D'autres critères vont plus loin en subdivisant, par exemple, l'activité de la marche en marche déambulatoire et en marche fonctionnelle, pour lesquelles les seuils de vitesses sont différents. Le Tableau 4 présente un critère de confort un peu plus élaboré que celui présenté

¹² Pour une meilleure lisibilité, les critères de confort aérauliques proposés sont souvent basés sur un seul seuil de dépassement et ce, quelque soit l'activité physique.

dans le Tableau 3 dans la mesure où les activités sont plus détaillées. Par ailleurs, les seuils de vitesse sont calculés pour deux probabilités de dépassement différentes (5% et 20%).

Activité	Intervalle de confort pour \bar{U} (m/s) (probabilité de dépassement: 5%)	Intervalle de confort pour \bar{U} (m/s) (probabilité de dépassement : 20%)
Dépasse le critère de confort	> 10	> 6.8
Marche fonctionnelle	0 - 10	0 – 6.8
Déambulation	0 - 8	0 – 5.4
Position debout ou assise – courte exposition	0 - 6	0 – 3.9
Position debout ou assise – longue exposition	0 - 4	0 – 2.6

Tableau 4. Exemple d'un critère détaillé basé sur deux probabilités de dépassement : 5% et 20% (ASCE, 2004)

Lorsqu'il s'agit de prendre en compte l'effet thermique du vent sur le confort, on passe à l'évaluation d'un autre aspect du confort qui est celui du confort thermique basée sur l'élaboration d'indicateurs numériques. Parmi les indicateurs du confort thermique, la vitesse du vent ne constitue qu'une variable parmi d'autres (humidité, rayonnement solaire, température ambiante, habillement...) dont la combinaison sert à évaluer la sensation thermique de l'individu. La notion de confort thermique et les différents indicateurs qui lui sont associés font l'objet de la section suivante.

3.3. Le confort thermique

Le confort thermique a été défini selon Fanger (1972) comme étant « l'état de l'esprit qui exprime la satisfaction avec l'environnement thermique ».

Adoptant un autre point de vue, pour Humphreys (1975) une ambiance thermique est considérée confortable lorsque l'organisme humain peut maintenir constante sa température corporelle (homéothermie) sans mettre en jeu d'une manière perceptible ses mécanismes thermorégulateurs de lutte contre le chaud et le froid. Cet état est appelé neutralité thermique (cf. § 2.6.1).

Ces différentes définitions soulignent la complexité de la notion de confort en général et du confort thermique en particulier. En effet, le confort thermique résulterait à la fois d'aspects physiques mesurables et de processus cognitifs menant à une évaluation personnelle et subjective de la sensation thermique.

3.3.1. Les paramètres du confort thermique

Les paramètres du confort thermique sont relatifs, d'une part, à l'environnement et, d'autre part, à l'individu.

3.3.1.1. Paramètres relatifs à l'environnement

La prise en compte de l'environnement pour l'évaluation du confort thermique nécessite la connaissance précise, par l'intermédiaire de la mesure ou de la simulation, de quatre paramètres microclimatiques importants :

- Température de l'air
- Température radiante moyenne
- Humidité de l'air
- Vitesse du vent

A ces paramètres, il faut ajouter les paramètres caractérisant les espaces extérieurs:

- Les apports solaires (directs, indirects et diffus)
- La température de la voûte céleste
- Les phénomènes météorologiques : la pluie, la grêle, la neige, etc.

3.3.1.2. Paramètres relatifs à l'individu

3.3.1.2.1. Mécanismes de thermorégulation :

Ce sont les mécanismes internes du corps tels que la vasodilatation, évoqués précédemment (cf. § 2.6.1), dont le but est de maintenir la température du corps stable. En effet, l'homme est un être homéotherme. Sa température interne doit être comprise entre 36.8 °C et 37.2°C. On constate un inconfort généralisé lorsque la température corporelle est en dessous de 36.5 °C et au-dessus de 37.4°C (Vinet, 2000).

3.3.1.2.2. Le métabolisme et les échanges thermiques:

L'homme produit une certaine quantité de chaleur en fonction de son activité que l'on appelle production métabolique. Le métabolisme $M(Wm^{-2})$ peut se décomposer en une partie purement thermique $M_{th}(Wm^{-2})$ et une partie « mécanique » $W(Wm^{-2})$:

$$M = M_{th} + W \quad (Wm^{-2})$$

Dans la littérature, on trouve des tableaux constitués empiriquement par des ergonomes, qui permettent l'estimation de l'énergie métabolique mesurée en Wm^{-2} ou en met pour différentes activités, dans différentes postures. Un *met* correspond à 58,15 Wm^{-2} (métabolisme moyen d'une personne assise au repos).

Quelques valeurs usuelles du métabolisme sont données en fonction de l'activité de l'individu par le Tableau 5 (AFNOR, 1995).

Activité	M	
	(Wm^{-2})	(met)
Repos, couché	46	0,8
Repos, assis	58	1,0
Activité légère, assis (bureau, domicile, école, laboratoire)	70	1,2
Activité légère, debout (achats, laboratoire, industrie légère)	93	1,6
Activité moyenne, debout (vendeur, travail ménager)	116	2,0
Marche à plat :		
2 km h ⁻¹ (0,56 ms ⁻¹)	110	1,9
3 km h ⁻¹ (0,83 ms ⁻¹)	140	2,4
4 km h ⁻¹ (1,11 ms ⁻¹)	165	2,8
5 km h ⁻¹ (1,39 ms ⁻¹)	200	3,4

Tableau 5. Production d'énergie métabolique (AFNOR, 1995)

Pour atteindre l'équilibre thermique, le corps humain doit satisfaire la condition d'équilibre énergétique donnée, entre autres, par les équations du modèle à deux nœuds de Pierce (Gagge et al., 1971 ; ASHRAE, 1989) qui suggère de partager le corps en deux parties : l'intérieur du corps et la surface du corps (la peau), chacune de ces parties ayant une température différente. Les équations traduisant l'équilibre énergétique du corps selon le modèle à deux nœuds de Pierce sont les suivantes :

$$S_p = Q_{cp} - E_p - R_p - C_p \quad (Wm^{-2})$$

Où

- S_p est la chaleur stockée au niveau de la peau ;
- Q_{cp} est le taux du flux de chaleur passant du corps à la peau ;
- E_p est la perte de chaleur par évaporation au niveau de la peau ;
- R_p est la perte de chaleur par rayonnement au niveau de la peau ;
- C_p est la perte de chaleur par convection au niveau de la peau.

$$S_c = M - W - E_{res} - C_{res} - Q_{cp} \quad (Wm^{-2})$$

Où

- S_c est la chaleur stockée au niveau du corps ;
- M est la production de chaleur métabolique ;
- W est le taux de travail mécanique ;
- E_{res} est la perte de chaleur par évaporation due à la respiration ;
- C_{res} est la perte de chaleur par convection due à la respiration.

Une description détaillée et une quantification de chacun des termes de ces équations sont présentées dans Vinet (2000) et Robitu (2005).

A noter que le terme Q_{cp} représente le lien entre ces deux équations et qu'une valeur positive de S_c indique un gain d'énergie du corps, tandis qu'une valeur négative indique une perte d'énergie. L'équilibre énergétique est, lui, atteint lorsque la valeur de S_c est nulle (Oliver, 2005).

3.3.1.2.3. Les vêtements

La façon dont l'individu s'habille va bien évidemment intervenir dans les échanges thermiques entre cet individu et son environnement thermique. La température extérieure du vêtement joue un rôle important dans les expressions des transferts thermiques à travers la peau (Vinet 2000 ; Robitu 2005).

Généralement, la température du vêtement est calculée au moyen d'un bilan de flux thermiques qui traversent le vêtement, ce bilan est caractérisé par une résistance thermique globale I_{cl} exprimée en clo (1 clo = 0.155 m². K/W).

La résistance thermique globale d'un vêtement, c'est-à-dire son isolation thermique peut être soit mesurée, soit calculée en sommant l'isolation des différentes parties du vêtement (McCullough et al., 1985).

3.3.2. Les modèles du confort thermique

Afin de quantifier le confort thermique, des chercheurs ont mis au point un ensemble de modèles qui permettent d'évaluer le confort thermique soit dans le cadre d'une approche « physique et physiologique », soit dans celui d'une l'approche plus « psychologique ».

3.3.2.1. Les modèles de l'approche physique et physiologique

L'approche physique et physiologique est basée sur l'élaboration d'indicateurs numériques pour la prédiction du niveau de confort thermique, elle s'appuie sur l'analyse du bilan thermique du corps humain et prend en compte les transferts de chaleur ainsi que la façon dont la thermorégulation intervient dans la modulation de ces échanges (Thellier *et al.*, 2003). Selon cette approche, le corps est considéré comme un système thermique dans lequel les échanges thermiques entre le corps et l'environnement se produisent par la peau et au travers des vêtements.

De ce point de vue, une ambiance thermique est considérée confortable lorsque l'équilibre entre le gain et la perte de chaleur au niveau du corps tend à être maintenu.

Les indicateurs proposés ont d'abord été conçus afin de prédire le confort thermique à l'intérieur des bâtiments où les conditions physiques sont, généralement, hautement contrôlables et très peu variables. Ils ont, par la suite, progressivement évolué afin de tenir compte des conditions climatiques extérieures (essentiellement par la prise en compte du rayonnement solaire).

L'un des indicateurs les plus connus et les plus utilisés pour la prédiction du confort thermique est le « Avis Moyen Prédit – Predicted Mean Vote » (*PMV*) introduit par Fanger (1972) et qui est la base de la norme ISO 7730 (AFNOR, 1995) spécifiant les conditions du confort thermique à l'intérieur des bâtiments.

Cet indicateur, basé sur le modèle d'équilibre énergétique précédemment cité (cf. § 3.3.1.2.2), a fait l'objet de plusieurs modifications visant à l'adapter pour une utilisation dans les milieux extérieurs. Parmi ces modifications nous citons celle de Gagge et al. (1986) qui a

introduit la variable « Température effective » (ET^*) dans la méthode de calcul du PMV pour une meilleure prise en compte de l'hygrométrie en zone chaude, ainsi celle de Matzarakis et al. (1998)¹³ introduisant le rayonnement absorbé par une personne debout dans la composante du PMV relative à la température radiante.

A l'indicateur PMV correspond un autre indicateur, le « Pourcentage Prédit des Insatisfaits – Predicted Percent Dissatisfied » (PPD) calculé en fonction de la valeur du PMV et prédisant quantitativement le pourcentage des personnes insatisfaites par l'environnement thermique. La Figure 18 illustre la relation entre le PMV et le PPD .

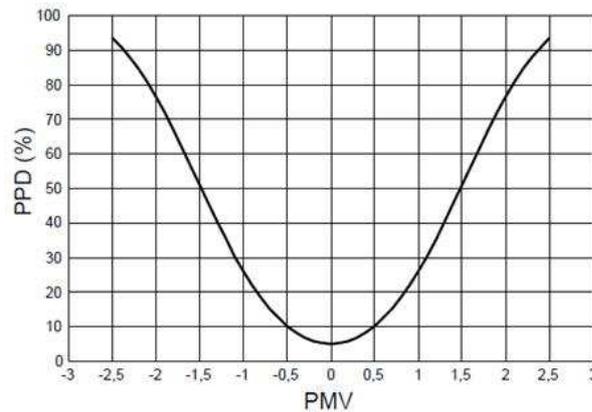


Figure 18. Relation entre le PMV et le PPD (%) (Fanger, 1972)

On notera que :

- la courbe représentant la relation PMV/PPD est symétrique par rapport à l'axe $PMV=0$;
- la valeur du PPD est d'au moins 5%, même en cas de situation de confort optimale ($PMV=0$).

La méthode de calcul des indicateurs PMV et PPD est donnée par le tableau suivant (Tableau 6).

¹³ Cité par Vinet (2000)

Indicateur	Variables	Méthode de calcul	Echelle des valeurs
PMV	<ul style="list-style-type: none"> • Chaleur métabolique (M, Wm^{-2}) • Température de l'air (T_a, °C) • Température radiante moyenne (T_{mr}, °C) • Humidité (RH, %) • Vitesse de l'air (V_a, ms^{-1}) • Isolation thermique des vêtements (I, clo) • Pertes : par diffusion à travers la peau, par sudation, par respiration, par rayonnement et par convection (Wm^{-2}). 	$PMV = [0.303e(-0.036 M) + 0.028] LOAD$ <p>Où $LOAD$ est la charge thermique dans le corps.</p> $LOAD = f(M, T_a, T_{mr}, RH, V_a, I, Pertes)$	<p>PMV est évalué sur une échelle de sensation thermique de 7 niveaux : chaud (+3) à froid (-3).</p> <p>0 correspond à une situation thermique neutre.</p>
PPD	Calculé en fonction du PMV	$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)]$	<p>Pour obtenir une situation de confort thermique il est recommandé que le PPD soit à peu près de 10% (critère pour l'intérieur), ce qui correspond à un PMV entre -0.5 et +0.5</p>

Tableau 6. Calcul des indicateurs PMV et PPD (Fanger, 1972)

A l'instar du PMV , d'autres indicateurs numériques basés sur des théories d'équilibre énergétiques ont été développés. Parmi ces indicateurs, nous citons l'indicateur de « Température Physiologique Equivalente – Physiological Equivalent Temperature » (PET) proposé par Höppe (1999) et basé sur le modèle de bilan d'énergie MEMI (Munich Energy balance Model for Individuals).

L'indicateur PET pour un lieu donné (intérieur ou extérieur) est défini comme la température de l'air à laquelle, dans un local typique intérieur, sans vent et rayonnement solaire, le bilan d'énergie du corps humain est équilibré avec les mêmes températures interne et de peau que celles obtenues dans les conditions à évaluer. Ainsi, le PET permet de comparer les effets d'un environnement thermique complexe en extérieur avec sa propre expérience en intérieur (Robitu, 2005).

L'avantage des indicateurs de l'approche physique réside dans leur capacité à rendre compte du déséquilibre thermique au niveau du corps dû aux variations de l'environnement thermique. Ce déséquilibre est considéré, selon l'hypothèse de l'approche physique, comme étant la principale source d'inconfort thermique.

Toutefois, même s'ils ont été étendus pour être valables en milieu extérieur, ils ne tiennent pas encore suffisamment compte de la complexité des facteurs physiques de l'environnement, caractérisés par leur forte variabilité spatiotemporelle. Ils tiennent encore moins compte des variations interpersonnelles lors de l'évaluation du confort ainsi que du rôle de modération qui pourrait être attribué aux facteurs psychologiques et aux différents mécanismes d'adaptation de l'individu évoluant dans un espace social : l'espace urbain.

3.3.2.2. Les modèles de l'approche psychologique

L'approche psychologique est basée sur des enquêtes de terrain et traite de l'évaluation subjective du confort par les usagers de l'espace urbain grâce au recueil des interprétations de ces derniers en termes de sensation thermique.

Les modèles proposés dans le contexte de cette approche sont, en fait, des équations de régression utilisées pour la prédiction de la sensation thermique. Ces équations donnent, notamment, la contribution de chaque variable d'entrée (variables microclimatiques) pour expliquer la variance de la sensation thermique. De plus, à ces équations, est associé un coefficient de corrélation (R^2), qui plus il est proche de 1, plus il indique que le modèle prédictif est pertinent.

Notons que ce type d'approche, étant basé sur des enquêtes portant sur l'évaluation subjective du confort par les individus, est supposée mettre en évidence le rôle modérateur, que pourraient jouer les facteurs psychologiques ainsi que les variations interpersonnelles dans l'évaluation de la sensation de confort thermique et l'adaptation aux conditions thermiques.

3.3.2.2.1. Quelques modèles de l'approche psychologiques

Les modèles de l'approche psychologique ont fait l'objet de recherches récentes ayant pour objectif de proposer une solution alternative aux indicateurs physiques. L'utilisation de ces derniers pour évaluer le confort dans les espaces extérieurs, a été jugée inadéquate par des auteurs tels que Stathopoulos et al. (2004) et Nikolopoulou et Lykoudis (2006) du fait de leur insuffisance à tenir compte de la complexité des facteurs microclimatiques et des facteurs interpersonnels.

Parmi ces modèles, citons celui de Givoni et al. (2003), qui a été élaboré à partir d'une enquête menée dans la ville de Yokohama au Japon. Givoni et ses collègues ont interrogé les sujets dans différentes situations climatiques en utilisant un questionnaire sur leurs sensations thermiques (*TS*). L'équation de régression obtenue est présentée dans le Tableau 7.

Notons que les variables qui prédisent le plus significativement la sensation thermique sont celles relatives à la température de l'air (corrélée positivement à *TS*) et la vitesse du vent (corrélée négativement à *TS*), les autres variables (Rayonnement solaire, température du sol et humidité relative) ayant un rôle moins important dans l'évaluation de *TS*.

Variables μclimatiques mesurées	Méthode de calcul	Echelle des valeurs
<ul style="list-style-type: none"> • Température de l'air (T_a, °C) • Rayonnement solaire (Ray, Wm^{-2}) • Vitesse du vent (V_a, ms^{-1}) • Humidité relative (RH, %) • Température du sol (TS, °C) 	$TS = 1.7 + 0.1118 T_a + 0.0019 Ray - 0.322 V_a - 0.0073 RH + 0.0054 T_s$ $(R^2 = 0.8792)$	Echelle des valeurs de TS : de 1 (très froid) à 7 (très chaud).

Tableau 7. *Le modèle de prédiction Sensation Thermique (TS) (Givoni et al., 2003)*

Dans un projet mené dans plusieurs villes européennes¹⁴ et proposant une approche bioclimatique pour la conception des espaces urbains extérieurs, les chercheurs du RUROS (2004) ont mis au point un prédicteur de la sensation thermique appelé « Avis de Sensation effective – Actual Sensation Vote » (ASV). Cette étude a abouti à l'élaboration d'un ensemble d'équations de régression. Une équation se différenciant d'une autre par les poids (coefficients) attribués aux variables d'entrées ainsi que par le coefficient de corrélation (R^2).

Une équation globale de l'ASV, moyennée sur toutes les villes où se sont déroulées les enquêtes, est donnée par le Tableau 8.

A toute valeur de ASV correspond un « Pourcentage Actuel d'Insatisfaits – Actual Dissatisfied Pourcentage » (APD) prédisant, à la manière du PPD (cf. § 3.3.2.1), le pourcentage d'insatisfaits.

Variables μclimatiques mesurées	Méthode de calcul	Echelle des valeurs
<ul style="list-style-type: none"> • Température de l'air (T_a, °C) • Rayonnement solaire (Ray, Wm^{-2}) • Vitesse du vent (V_a, ms^{-1}) • Humidité relative (RH, %) 	$ASV = 0.049 T_a + 0.001 Ray - 0.051 V_a + 0.014 RH - 2.079$ $(R^2=0.61)$	ASV évalué sur une échelle de 5 niveaux : de « très froid » à « très chaud ».

Tableau 8. *Le modèle de prédiction « Avis de Sensation effective – Actual Sensation Vote » (ASV) (RUROS, 2004)*

Remarquons que dans le modèle prédictif de l'ASV, comme dans celui de Givoni et al. (2003), les coefficients plus importants sont la température de l'air et la vitesse du vent, les autres variables microclimatiques jouant un rôle secondaire dans ces modèles.

La réutilisation de ce type de modèles dans des sites autres que les sites où se sont déroulées les études initiales, représente néanmoins leur principal inconvénient. En effet, ils sont basés sur les résultats d'enquêtes menées dans un contexte géographique et culturel particulier, qui sera forcément différent lors de leur application dans d'autres lieux ou d'autres villes. Les résultats obtenus par ces modèles doivent donc être considérés avec précaution et utilisés à titre indicatif. Nous estimons, par ailleurs, que l'utilisation, dans une ville donnée, du modèle ASV moyenné peut constituer un bon compromis.

¹⁴ Athènes (Grèce), Thessalonique (Grèce), Milan (Italie), Fribourg (Suisse), Kassel (Allemagne), Cambridge (Roy.-U.) et Sheffield (Roy.-U.).

Les avantages de ces modèles peuvent se résumer au fait qu'ils sont censés refléter la sensation thermique telle qu'elle est perçue par les personnes enquêtées et non pas telle qu'elle devrait être perçue si l'on se réfère à des théories physiques et physiologiques. On pourrait donc considérer que ces modèles intègrent, contrairement aux indicateurs de l'approche physique et physiologique, les paramètres personnels (culturels et psychologiques) ainsi que les effets de l'adaptation des usagers à leur environnement.

3.3.2.2.2. Mise en évidence de l'adaptation

Dans les travaux de Ramos et Steemers (2002) et de Nikolopoulou et al. (2001), un écart conséquent a été systématiquement constaté entre, d'une part, les résultats d'une évaluation objective du confort thermique à l'aide de l'indicateur physique *PMV* (Fanger, 1972) et, d'autre part, les résultats d'une évaluation subjective du confort thermique par l'intermédiaire du modèle *ASV* (RUROS, 2004). Cet écart menant à une différence entre les pourcentages d'insatisfaits *PPD* et *APD*.

Par exemple, l'écart constaté entre le *PPD* et le *APD* dans l'étude menée par Nikolopoulou et al. (2001) à Cambridge (RU) atteint 55% pour une moyenne annuelle (66% pour le *PPD* et 11% pour l'*APD*) (Figure 19).

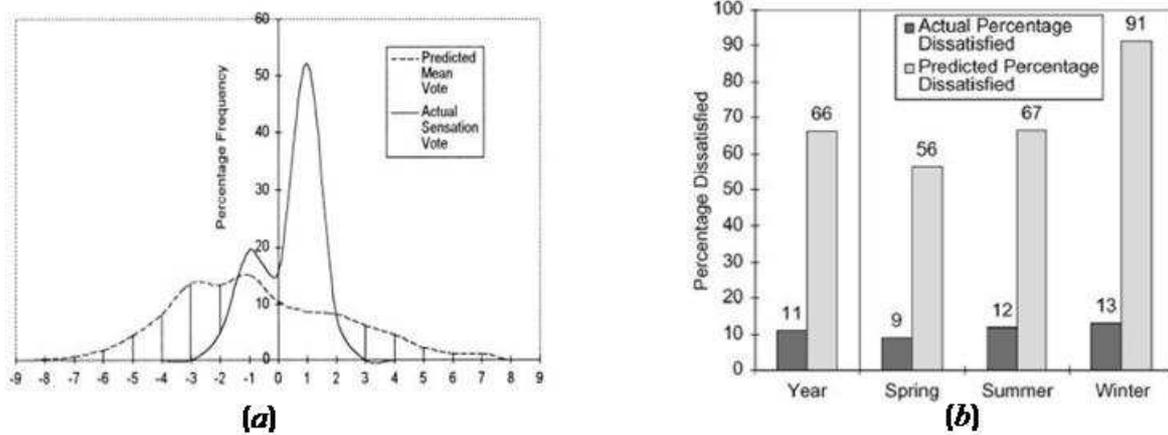


Figure 19. Ecarts entre (a) *PMV* et *ASV* et entre (b) *PPD* et *APD* (Nokolopoulou, 2001)

D'après Ramos et Steemers (2002), ce genre de constatation suggère qu'il est nécessaire de prendre en compte un phénomène additionnel dans l'évaluation du confort : le phénomène d'adaptation.

La notion d'adaptation a déjà été évoquée dans les études du confort thermique à l'intérieur des bâtiments (Humphreys et Nicol, 1995). Mais les phénomènes d'adaptation sont encore plus évidents dans les espaces extérieurs caractérisés par une variabilité plus importante des facteurs physiques et des temps d'exposition plus longs.

Les paramètres d'adaptation, qui sont surtout d'ordre psychologique, sont détaillés dans les travaux de Nikolopoulou et Steemers (2003) dans lesquels, les auteurs se sont largement inspirés, d'une part, de la théorie transactionnelle de la perception qui suggère que l'individu fait appel à son vécu et à « ses expériences de vie » lors de la perception de son environnement (cf. § 2.3.1) et, d'autre part, du phénomène de l'« adaptation sensorielle » qui

consiste en la tendance des systèmes sensoriels à réagir de moins en moins à l'exposition continue ou répétée à un stimulus (cf. § 2.4.2).

Ci-dessous nous présentons un résumé des paramètres qui devraient faire partie, selon Nikolopoulou et Steemers (2003), des paramètres individuels devant être pris en considération lors de l'évaluation du confort (cf. § 3.3.1.2)

- ***L'aspect naturel*** : le caractère naturel d'un environnement peut amener l'individu à tolérer les grands changements de l'environnement physique.
- ***L'attente*** : correspond à l'état dans lequel selon l'individu devrait se trouver l'environnement plutôt qu'à l'état dans lequel il est effectivement.
- ***L'expérience*** : elle influe directement sur le facteur de l'attente et peut être à court terme ou à long terme
- ***Le temps d'exposition*** : L'exposition à une situation d'inconfort n'est pas perçue négativement si l'individu s'attend à ce qu'elle soit de courte durée.
- ***Le sentiment de contrôle*** : une personne ayant un haut niveau de contrôle sur une source d'inconfort tolère les grandes variations et est moins gênée.
- ***La stimulation environnementale*** : un environnement variable, plutôt que fixe, est préférable. En effet, un environnement ayant un aspect statique devient très vite intolérable (Hawkes, 1982)¹⁵.

3.4. Le confort visuel

Dans l'esprit de beaucoup de gens, un espace ouvert agréable encourageant à la pratique d'activités pédestres est un espace ouvert offrant des expériences visuelles positives. Plusieurs facteurs peuvent contribuer à ce sentiment de satisfaction : des vues dégagées vers le paysage ou les bâtiments environnants, une belle végétation, des façades spectaculaires, un mobilier urbain de qualité... Tous ces facteurs relèvent de l'esthétique et sont par conséquent sources « d'agrément visuel » (Carmona et al., 2003).

Toutefois le citoyen ne peut véritablement apprécier la qualité esthétique de ces éléments qu'à condition que les niveaux d'éclairage adéquats soient fournis sur l'ensemble de l'espace en évitant les sensations d'éblouissement, principales sources d'inconfort visuel.

A notre connaissance, rares sont les études qui se sont penchées sur l'évaluation du confort visuel dans les environnements urbains ouverts. Les seuls indicateurs de confort visuel qui existent sont des indicateurs valables à l'intérieur des bâtiments. Le plus connu de ces indicateurs est celui de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE, 1995) appelé « Unified Glare Rating » évaluant l'éblouissement et ayant ensuite été modifié pour tenir compte de la lumière naturelle provenant des fenêtres (Nazzari, 2001 ; Fikesis, 2003).

Parmi les rares travaux sur le confort visuel en milieux extérieurs, rapportons ici une étude menée dans le cadre du projet RUROS (2004) qui s'appuie sur une approche empruntée au domaine de l'éclairage. Les auteurs n'ont pas défini d'indicateurs de confort dans les milieux extérieurs mais ils se sont penchés sur l'analyse de l'évaluation subjective de l'environnement

¹⁵ Cité dans Nikolopoulou et Steemers (2003)

lumineux par les usagers de l'espace urbain. Ils expliquent, notamment, qu'un éblouissement perturbateur ou inconfortable apparaît lorsque le champ visuel contient soit des luminances élevées, soit des grands contrastes de luminances.

Les résultats de cette étude nous incitent à examiner plus en détail l'état des connaissances sur les caractéristiques de l'environnement lumineux mesuré ainsi que sur l'évaluation subjective de la qualité lumineuse par les usagers des espaces urbains.

3.4.1. Niveaux d'éclairage et éblouissement dans les espaces ouverts urbains

L'éclairage dans les espaces ouverts provient de la réflexion des rayons lumineux sur les matériaux, le sol et les bâtiments environnants, de l'éclairage provenant des rayons solaires directs, et de la lumière diffuse provenant du ciel.

Il est communément admis que pour des tâches visuelles usuelles, les niveaux d'éclairage requis pour une perception visuelle confortable vont de 100 à 1000 Klux selon la taille des détails géométriques qui doivent être discriminés (niveaux d'éclairage plus élevés pour des détails plus fins). Sachant que les niveaux diurnes d'éclairage dans des espaces ouverts dépassent presque toujours 1000 lux (même à l'ombre), ceci permet d'accomplir aisément n'importe quelle tâche visuelle courante. Les niveaux d'éclairage peuvent devenir insuffisants à l'aurore ou au crépuscule, ou dans des zones très denses.

Quant à l'éblouissement dans des espaces ouverts urbains, il pourrait être causé par la présence de façades exceptionnellement claires (ou sombres par effet de contraste). Malgré cela, les rapports de contraste de luminances observés dans ces situations n'excèdent pas 1:65, ce qui est un rapport plutôt bas en comparaison avec ceux pouvant atteindre 1:4000 que l'on rencontre fréquemment à l'intérieur par éclairage naturel ou artificiel. Évidemment, quand le regard s'oriente vers le soleil, de très forts contrastes de luminances peuvent être atteints, et la gêne occasionnée par ce fort contraste peut pousser le piéton à changer son comportement (déviation du regard, changement de la direction de marche...) afin d'éviter ce phénomène lumineux désagréable.

Par ailleurs, les ciels couverts agissent comme de larges diffuseurs de lumières qui égalisent les luminances du champ visuel (les ombres disparaissent). Les rapports de contrastes dans ces circonstances sont largement atténués et ne peuvent jamais dépasser ceux observés par ciels clairs.

Des relations empiriques entre des paramètres mesurables, comme les niveaux d'éclairage, et les réactions, en termes de ressenti des usagers, ont été établies par (RUROS, 2004) à partir d'enquêtes sur le terrain réalisées dans douze espaces ouverts dans différentes villes en Europe.

3.4.2. Appréciation du champ lumineux par les usagers

Pour évaluer l'appréciation du champ visuel par les gens, RUROS (2004) a eu recours à des questions spécifiques concernant :

- l'apparence lumineuse de l'espace, définie par un Avis de Sensation Lumineuse (*LSV*) évalué sur une échelle à 5 niveaux allant de "très sombre"(-2) à "très clair" (2) ;

- les conditions d'ensoleillement, évaluées sur une échelle à 3 points allant de "trop de soleil" à "je préférerais plus de soleil";
- l'éblouissement par les surfaces environnantes.

Simultanément au recueil des évaluations des sujets enquêtés, des observations et des mesures sont menées *in situ*.

Une mise en correspondance est, par la suite, effectuée entre, d'une part, les mesures et les observations de l'environnement lumineux et, d'autre part, l'évaluation subjective de l'apparence lumineuse. Elle montre que la plupart des usagers jugent positivement (selon l'échelle LSV) leur environnement lumineux, même en présence de faibles niveaux d'éclairement. En outre, dans le cas de fortes valeurs d'éclairement typiques d'un ciel clair, les usagers n'évaluent pas forcément l'apparence lumineuse comme « très claire », ceci relève du phénomène d'adaptation du système visuel.

Quant aux préférences pour plus ou moins de soleil, RUROS (2004) démontre que les gens préfèrent et réclament toujours plus d'ensoleillement, et ce, même en cas de niveaux d'éclairement déjà très élevés. Il ne s'agit évidemment pas de généraliser ce genre de résultats pour toutes les catégories sociogéographiques, étant donné qu'ils ont été obtenus dans un contexte particulier.

Enfin, concernant l'éblouissement, Les parties du champ visuel qui apparaissent comme éblouissantes sont, en premier lieu, les façades des bâtiments environnants. Le ciel apparaît comme étant la seconde cause de l'éblouissement. Par ailleurs, les gens ont tendance à s'adapter physiquement aux situations d'éblouissement en mettant, par exemple, des lunettes de soleil où en effectuant des mouvements pour protéger les yeux (placer la main au-dessus des yeux, tourner ou pencher la tête, cligner des yeux, etc).

Ce que l'on pourrait retenir, si l'on se réfère à ces exemples d'évaluations de l'environnement lumineux par les usagers de l'espace urbain, c'est d'abord le fait que la qualité lumineuse de l'environnement ne semble tenir qu'un rôle secondaire, en termes de confort, par rapport à la qualité thermique et aéraulique de l'environnement. L'éclairement, même lorsqu'il atteint de faibles ou de fortes valeurs, semble en effet toujours être perçu positivement par les gens. Enfin, même en cas d'éblouissement, ces derniers adaptent facilement leurs attitudes et leurs comportements afin d'éviter la gêne produite.

3.5. Synthèse intermédiaire

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les principales approches pour l'évaluation du confort aéraulique, thermique et visuel.

Ce que nous retenons tout d'abord, c'est l'existence de deux grandes catégories de modèles de confort : les modèles physiques et physiologiques relatifs à l'équilibre thermique du corps et aux mécanismes de thermorégulation impliqués dans le maintien de cet équilibre et les modèles psychologiques en relation avec les capacités d'adaptation consciente ou inconsciente de l'individu face aux situations d'inconfort auxquelles il est confronté dans les espaces urbains.

Nous retenons aussi, que parmi les critères et les modèles de confort présentés dans ce chapitre, certains pourraient être retenus pour notre étude afin de rendre compte des conditions de confort pour un piéton en déplacement dans le milieu urbain.

Pour le confort aéraulique, par exemple, il semble communément admis qu'à partir du seuil de vitesse de 5 ms^{-1} combiné à une probabilité de dépassement de seuil supérieure à 20%, le vent est susceptible d'avoir des effets gênants sur la pratique de la marche.

Concernant le confort thermique, on pourrait considérer, du point de vue de l'indicateur *PMV*, qu'à partir d'une valeur supérieure à -1 (« moyennement froid » selon l'échelle des valeurs du *PMV*) ou supérieur à +1 (« moyennement chaud »), l'individu peut commencer à ressentir des gênes d'ordre thermique. L'intervalle [-1 +1] du *PMV* pourrait sembler être un intervalle plutôt large¹⁶, il correspond en fait à un pourcentage théorique d'insatisfaits (*PPD*) de 25%), mais le fait que l'individu a tendance à s'adapter aux conditions d'un environnement extérieur plus facilement qu'aux conditions présentes dans un espace fermé, le rend moins sensible à l'inconfort. Cependant, aucun des travaux menés sur les modèles de confort thermique ne définit explicitement une fréquence de dépassement d'un seuil de confort thermique qui permettrait d'identifier si une personne peut tolérer, à certaines conditions, des conditions d'inconfort.

Quant au confort visuel lié à la qualité de l'ambiance lumineuse, on peut considérer que les problèmes d'inconfort en milieu extérieur ne se posent que dans le cas d'éblouissement causé par une vision directe du soleil, par la réflexion du soleil sur des surfaces très réfléchissantes (souvent orientées sud) ou par un contraste de luminance excessif entre deux façades adjacentes. Toutefois aucun modèle théorique permettant de prédire ou d'évaluer le degrés d'éblouissement dans les milieux extérieurs n'est proposé dans la littérature.

S'il est avéré que les variations des facteurs physiques de l'environnement sont susceptibles d'avoir des effets sur la perception des individus et sur leur confort, on peut se demander dans quelle mesure ces mêmes variations pourraient influencer sur leur comportement. Certains travaux, que nous présentons dans le prochain chapitre, ont étudié cette question et tenté d'apporter des éléments de réponses.

3.6. *Références bibliographiques*

AFNOR (1995). Ambiances thermiques modérées, détermination des indices *PMV* et *PPD* et spécification des conditions de confort thermique. rapport de recherche, Paris : NF ISO 7730. 40 p.

ASCE (2004). Outdoor human comfort and its assessment. American Society of Civil Engineers (ASCE). 68 p.

ASHRAE (1989). Fundamentals handbook. Chap 8 , "Physiological principals, comfort and health".

Carmona, M., Heath, T., Oc, T. & Tiesdell, S. (2003). Public spaces - Urban Places. Burlington, US : Architectural Press. 312 p.

CIE (1995). Discomfort glare in interior lighting. Commission Internationale de l'Eclairage. 117 p.

Fanger, P. (1972). Thermal comfort. Copenhagen, Denmark : Danish Technical Press.

Fikesis, K., Davies, M., Kolokotroni, M. & Langford, P. (2003). Prediction of discomfort glare from windows. Lighting Research Technology. Vol 35, n° 4. pp. 360-371.

¹⁶ L'intervalle de confort recommandé pour le *PMV* est [-0.5 +0.5] correspondant à un *PPD*=10% (dans un espace fermé).

- Gagge, A. P., Fobelets, A. P. & Berglund, L. G.** (1986). A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Transactions*. Vol 92. pp. 709-731.
- Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J. & Nishi, Y.** (1971). An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response. *ASHRAE Transactions*. Vol 77. pp. 247-257.
- Givoni, B., Noguchi, M., Saaroni, H., Pochter, O., Yaacov, Y., Feller, N. & Becker, S.** (2003). Outdoor comfort research issues. *Energy and Building*. Vol 35. pp. 77-86.
- Hawkes, D. U.** (1982). The theoretical basis of comfort in the selective control of environments. *Energy and Buildings*. Vol 5, n° 2. pp. 127-134.
- Humphrey, M. A. & Nicol, J. F.** (1995). An adaptive guideline for UK office temperatures Standards for thermal comfort : indoor air temperature standards for the 21st century. London: Chapman and Hall.
- Humphreys, M.** (1975). Field studies of thermal comfort compared and applied. *J. Inst. Heat. & Vent. Eng.* Vol 44. pp. 5-27.
- Höppe, P.** (1999). An universal index for the assessment of the thermal environment - The Physiological Equivalent Temperature PET. in : Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology. [CD-ROM].
- Jordana, S., Johnsonb, T., Sterlinga, M. & Bakera, C.** (2008). Evaluating and modeling the response of an individual to a sudden change in wind speed. *Building and Environment*. Vol 43. pp. 1521-1534.
- Lawson, T. V. & Penwarden, A. D.** (1975). The effects of wind on people in the vicinity of buildings. in : Proceedings of the fourth international conference on wind effects on buildings and structures. United Kingdom : Cambridge University Press. pp. 605-622
- Matzarakis, A. & Mayer, H.** (1998). Investigations of Urban Climate's thermal Component in Freiburg, Germany.. in : Proceedings of the Second Urban Environment Symposium and 13th Conference on Biometeorology and Aerobiology. Albuquerque, New Mexico : American Meteorology Society. pp. 140-143
- McCullough, E. A., Jones, B. W. & Huck, J.** (1985). Comprehensive Data Base for Estimating Clothing Insulation. *ASHRAE Trans.* Vol 91, n° 2. pp. 29-47.
- Nazzal, A. A.** (2001). A new daylight glare evaluation method – introduction of the monitoring protocol and calculation method. *Energy and Building*. Vol 33, n° 3. pp. 257-265.
- Nikolopoulou, M., Baker, N. & Steemers, K.** (2001). Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameters. *Solar Energy*. Vol 70, n° 3. pp. 227-235.
- Nikolopoulou, M. & Lykoudis, S.** (2006). Thermal comfort in outdoor urban spaces : Analysis across different European countries. *Building and Environment*. Vol 41, n° 11. pp. 1455-1470.
- Nikolopoulou, M. & Steemers, K.** (2003). Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings*. Vol 35, n° 1. pp. 95-101.
- Oliver, J. E.** (2005). *Encyclopedia of world climatology*. Springer. 854 p.
- Ramos, M. C. C. & Steemers, K. A.** (2002). Comfort in urban spaces : The roles of the physiological and psychological parameters. in : *Creating sustainable urban environments: Future forms for city living*.

Robitu, M. (2005). Étude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain : influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Thèse de doctorat. Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes. 249 p.

RUROS (2004). Designing open spaces in the urban environment: a bioclimatic approach. Centre for Renewable Energy Sources (CRES).

Stathopoulos, T., Wu, H. & Zacharias, J. (2004). Outdoor human comfort in an urban climate. *Building and Environment*. Vol 39. pp. 297-305.

Thellier, F., Monchoux, F. & Serin, G. (1983). Les outils d'évaluation du confort thermique. in : *Confort thermique : Aspects psychologiques et physiologiques*. 10 p.

Vinet, J. (2000). Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain : caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Thèse de doctorat. Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes. 245 p.

Chapitre 4. Le comportement

4.1. Introduction

Après avoir présenté les différents éléments liés à la perception sensible de l'individu (les ambiances, les stimuli physiques, la prise d'information, le confort...), nous abordons dans ce chapitre la notion de comportement, une autre des composantes fondamentales de la relation Individu-Environnement.

Le comportement, et plus spécialement le comportement piétonnier a fait l'objet de différentes études dans divers domaines tels que la sécurité des piétons (Giles-Corti & Donovan, 2002 ; Humpel et al. 2004) et l'impact des projets d'aménagement urbain et du microclimat sur les usages (Zacharias et al., 2001 ; Boussoulim, 2001 ; Nikolopoulou et Lykoudis , 2005).

Les comportements se traduisent par des mouvements observables, mais ils sont étroitement liés à des mécanismes de prise de décision. Ceux-ci impliquent des processus complexes faisant intervenir des dimensions sociologiques et psychologiques, ainsi que des mécanismes internes à l'organisme.

L'étude du comportement a recours à diverses méthodes d'observation dont le but est d'identifier et de quantifier les comportements en vue de confirmer ou d'infirmer des hypothèses. L'étude du comportement peut également faire appel à des méthodes de modélisation pour formaliser les connaissances en vue de prédire les phénomènes comportementaux. Ces éléments sont aussi exposés dans ce chapitre.

Enfin, nous abordons les facteurs environnementaux ayant une influence sur le comportement piétonnier. Nous nous focalisons particulièrement sur les facteurs microclimatiques et sur les études ayant porté sur l'influence de ces facteurs sur les pratiques piétonnières.

4.2. Définitions

Larousse (2002) définit le comportement comme « l'ensemble des réactions objectivement observables qu'un organisme généralement pourvu d'un système nerveux exécute en réponse aux stimulations du milieu, elles-mêmes objectivement observables ». Cette définition peut varier en fonction du courant ou de la discipline qui l'aborde.

En psychologie environnementale, la science qui étudie les interrelations entre l'individu et son environnement physique et social, dans ses dimensions spatiales et temporelles (Moser & Weiss, 2003), le comportement est l'ensemble des manifestations externes de l'organisme. Par ailleurs, le comportement est généré par des processus internes à l'organisme. Ces processus font l'objet des études menées en neurophysiologie.

Dans le domaine de la psychologie sociale, le terme de conduite est parfois utilisé de façon indifférenciée à la place de comportement lorsque celui-ci est utilisé dans son usage commun. Mais il arrive également que l'on désigne par conduite un mixte d'activités externes

observables de l'organisme (en ce sens, le comportement) et de phénomènes internes inobservables concomitants (buts, motivations, émotions, attitudes, etc.).

Pour résumer, on peut estimer que le concept de « comportement » est généralement lié aux notions suivantes :

- Extériorité : le comportement concernerait des manifestations externes d'un organisme ;
- Objectivité : le comportement concernerait des phénomènes observables ;
- Interaction avec l'environnement : le comportement serait lié à la fois aux caractéristiques des stimulations de l'environnement et aux actions d'un organisme sur et dans cet environnement pour répondre, sélectionner ou modifier ses conditions environnementales et satisfaire ses besoins ;
- Mouvement : le comportement serait associé à la notion de mouvement (action, mobilité, motricité) de l'organisme.

Dans le contexte de cette thèse, nous nous intéressons au comportement d'un point de vue éthologique, c'est-à-dire aux manifestations externes à l'organisme et donc observables (les déplacements, les parcours sélectionnés, les emplacements des stations...), tout en étant conscients du fait que ces manifestations externes sont le produit de processus complexes impliquant des dimensions physiologiques, psychologiques et sociales.

Cette dissociation interne-externe renvoie à l'une des problématiques méthodologiques primordiales de l'étude du comportement, qui est la « pertinence ». En effet, les questions suivantes reviennent souvent dans les études éthologiques :

Est-il pertinent d'étudier les manifestations externes d'un organisme, sachant que la genèse et la dynamique de ce phénomène sont internes ? Cette approche n'est-elle pas réductrice et susceptible de produire de nombreux biais ?

Ne vaudrait-il pas mieux étudier directement les processus à l'origine des comportements, et ne parler de comportement uniquement lorsque l'activité interne comporte une composante externe ?

Pour justifier notre choix méthodologique, il convient de dire que cette dissociation interne-externe est considérée, dans le cadre de nos travaux de recherche, plus comme un moyen didactique d'analyse et de description que comme une réalité neurologique (où comportements et processus cérébraux relèveraient d'une même unité fonctionnelle dynamique).

4.3. L'étude du comportement

Étudier les comportements humains implique de choisir, en amont, la méthode la plus adaptée à la problématique initialement posée. Plus précisément, pour appréhender les comportements liés aux déplacements piétonniers (choix d'itinéraires, postures stations et positions adoptées au cours du déplacement ...), les recherches effectuées sont généralement basées sur deux approches fondamentalement différentes (Piombini, 2006) :

- *Une approche déductive* s'appuyant essentiellement sur des données quantitatives. Les chercheurs empruntant cette approche partent, généralement, d'hypothèses

prédéterminées relatives aux comportements supposés des individus. Ils vérifient ensuite la validité de ces hypothèses au regard des résultats obtenus.

- *Une approche inductive* souvent associée à des données qualitatives permettant de faire émerger des connaissances nouvelles pas forcément préalablement imaginées par le chercheur. De ce fait, le cadre de fonctionnement de l'approche inductive est moins contraignant que celui de l'approche déductive dans la mesure où les recherches basées sur cette approche sont libres de toutes théories préconçues.

La démarche méthodologique que nous proposons est, en ce sens, déductive car elle se base sur une hypothèse restrictive liée à l'influence des facteurs physiques de l'environnement (éléments explicatifs) sur les comportements piétonniers liés aux déplacements (éléments à expliquer). Mais elle pourrait être considérée comme inductive dans les cas où les hypothèses émises en amont ne sont que partiellement (ou pas du tout) vérifiées, et où l'interprétation des données recueillies permettrait de faire émerger des nouvelles connaissances, de définir de nouvelles pistes d'investigation ou de formuler de nouvelles hypothèses.

4.3.1. Le recueil des données comportementales

4.3.1.1. L'observation du comportement

L'observation est une méthode qui implique une technique d'observation et/ou d'enregistrement des comportements, une grille de codage définissant précisément les catégories utilisées pour décrire le comportement.

L'objectif des méthodes d'observation du comportement est d'identifier et de quantifier des comportements qui peuvent aider à répondre à la question de recherche ou à confirmer une hypothèse.

L'observation naturaliste a pour but d'observer les comportements des sujets dans leurs environnements « naturels » ou habituels sans perturber ou modifier ces situations habituelles. L'observateur cherche ici à minimiser son impact sur la situation ; il est selon Barker (1965) un transducteur qui cherche à rendre compte et retranscrire les comportements manifestés dans leur cadre habituel.

La méthode d'observation peut également être couplée à des protocoles expérimentaux, soit dans le cadre classique de situations de laboratoire, soit *in situ* en manipulant certaines composantes de la situation afin d'en éprouver l'effet sur les comportements dans des contextes réels et non dans les situations artificielles du laboratoire (Bronfenbrenner, 1977 ; Legendre, 1985). L'observation peut également être associée à des protocoles de quasi expérimentation. Dans ce dernier type d'approche, les variables ne sont pas directement manipulées par l'expérimentateur, mais les observations sont effectuées de façon à pouvoir comparer les comportements dans des situations qui varient selon une composante particulière, mais qui en même temps sont appareillées (le mieux possible) sur leurs autres composantes (Cook & Campbell, 1979).

En outre, quelque soit le protocole dans lequel s'inscrit l'observation, celle-ci comporte les phases suivantes :

- Observation naïve (impressionniste) : le but de cette phase est de permettre à l'observateur de se familiariser avec les sujets étudiés et le contexte d'observation.

- Élaboration du répertoire (éthogramme) : identifier et classier les comportements qui seront à observer (grille de codage). Planification temporelle des observations : combien de temps, dans quelles situations, auxquels moments, les sujets seront observés dans quel ordre.
- Observation systématique : cette phase correspond au recueil de données proprement dit. L'observation peut être opérée directement, les comportements observés étant alors catégorisés immédiatement, elle peut également consister à enregistrer les comportements (vidéo) qui seront codés ultérieurement.
- Analyse descriptive des comportements : transformation des données permettant de définir la fréquence, le taux horaire etc., des catégories de comportement analysées.
- Analyses inférentielles: comparaison par des comportements manifestés par différents groupes de sujets ou des sujets placés dans des situations différentes.

Récemment, de nouvelles techniques d'observation informatisées ont commencé à faire leur apparition. Il s'agit des techniques de suivi (*tracking*) basées sur l'analyse du mouvement par l'intermédiaire de logiciels tels que Mikromak®¹⁷.

A titre d'exemple, Willis et al. (2004) ont utilisé cette technique de suivi automatique des piétons et ont essayé dans leur travaux d'analyser statistiquement les préférences des piétons en terme de choix de parcours, de vitesse de déplacement, de distances interpersonnelles, etc. Il ont aussi étudié la manière avec laquelle ces variables peuvent être influencées par des facteurs personnels et des facteurs liés à la morphologie urbaine.

Cette technique de suivi a l'avantage de fournir des informations très précises sur les trajectoires (temps et positions), cependant, les logiciels utilisés demeurent coûteux et leurs performances très dépendantes des modèles mathématiques utilisés pour analyser (et prédire) les mouvements.

Pour mener à bien notre étude et pour recueillir les données comportementales liées aux déplacements piétonniers, nous avons opté pour une méthode d'observation naturaliste, non participante, réalisée en filmant les déplacements piétonniers dans un espace urbain. L'objectif est de recueillir les données relatives aux itinéraires empruntés (trajectoires, longueurs) et à certains aspects du comportement des piétons empruntant ces itinéraires comme les stations et la durée des arrêts ou encore la vitesse moyenne de déplacement).

4.3.1.2. L'étude des processus décisionnels

Les processus décisionnels ont intéressé aussi bien les économistes que les psychologues. L'approche des économistes dans l'étude de ces processus est complètement objective et les éléments subjectifs pouvant intervenir dans le processus de choix ne sont pas pris en compte. Ils estiment que l'individu maximise l'utilité de ses décisions en fonction des informations dont il dispose sur chaque alternative. Les psychologues ont, quant à eux, consolidé ce formalisme en rajoutant des notions de motivation et d'attitude qui influencent l'établissement des préférences et le processus de choix.

Pour étudier les processus décisionnels, les économistes ont longtemps eu recours à la méthode dite des « préférences révélées » introduites par Samuelson (1948). Cette méthode a été appliquées dans divers contextes (estimation des valeurs des biens marchands et non marchands, coûts de déplacement...) où l'on s'intéresse aux décisions effectives des individus

¹⁷ www.mikromak.com

(ou des ménages). Cette méthode part donc du principe que les comportements observés peuvent s'avérer être, dans certains contextes, de bons indicateurs des préférences individuelles (Pearce et al. 2006).

Un des principaux problèmes susceptibles d'être posés par ces méthodes est le fait qu'elles imposent souvent de formuler des hypothèses en amont qui peuvent s'avérer restrictives.

La deuxième méthode d'étude des processus décisionnels est celle qui consiste à recueillir, en amont des choix effectués, les justifications invoquées par des sujets enquêtés pour prendre leurs décisions. Cette méthode, dite des « préférences déclarées », intègre les dernières avancées du domaine du marketing et de la psychologie expérimentale. Elle vient prolonger la méthode des préférences révélées en intégrant les composantes internes dans le processus global de prise de décision. Les processus décrivant les deux méthodes sont illustrés dans la Figure 20.

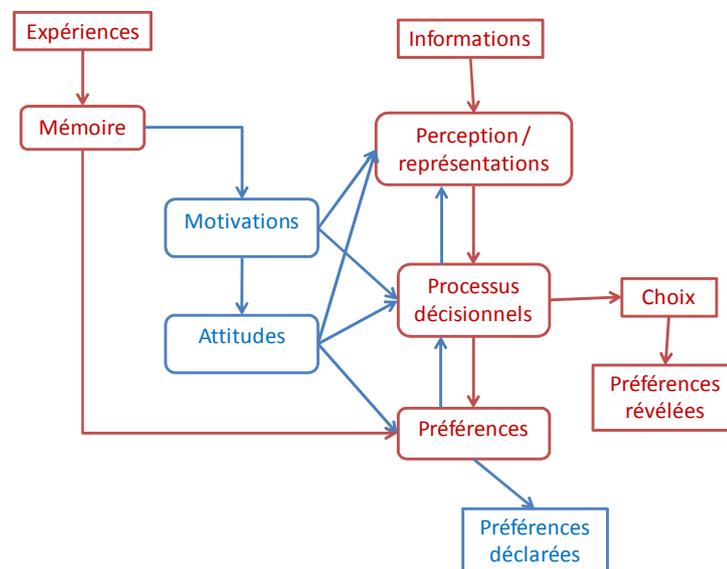


Figure 20. Processus des préférences révélées (en rouge) et des préférences déclarées (en rouge et bleu) (Piombini, 2006)

La méthode des préférences révélées a récemment été appliquée au domaine de l'évaluation environnementale. Un de ses atouts tient, d'une part, à sa capacité à évaluer les changements des caractéristiques environnementales multidimensionnelles (Pearce et al., 2006) et, d'autre part, au fait qu'elle offre, *a priori*, plus de certitude pour la définition des comportements.

Néanmoins, un décalage est fréquemment observé entre les comportements déclarés et ceux réellement observés, car les personnes ne sont pas toujours capables d'analyser objectivement et de manière fiable les raisons de leurs choix. L'individu n'a, en effet, pas toujours conscience des critères qui motivent ses choix ni de leur rôle respectif (Costermans, 2000). Cette absence de conscience des facteurs intervenant dans les décisions doit être considérée avec attention lorsque l'on s'intéresse à l'influence des facteurs microclimatiques sur les processus décisionnels, puisque ces facteurs sont caractérisés par leur intensité relativement faible et leur homogénéité dans le temps (cf. § 2.4.2). Le rôle que peuvent donc

jouer les stimuli physiques sur le choix de parcours et sur les comportements en général, serait plus de l'ordre de stimulations subliminales intervenant de manière inconsciente que de l'ordre d'une évaluation consciente de ces stimuli entraînant une décision consciente (cf. 2.5.2). Dans ce contexte, la mise en œuvre d'une méthode basée sur les préférences déclarées peut sembler inadaptée.

Il est, certes, impossible de conclure sur la supériorité d'une méthode par rapport à une autre, le recours à l'une ou à l'autre se faisant en fonction de la nature des données à disposition ainsi que des objectifs visés. Nous estimons, cependant, que pour l'étude de l'impact des facteurs climatiques sur le comportement piétonnier, la méthode des préférences révélées, comme celle de l'observation naturaliste non participante, semble être méthodologiquement plus adéquate.

4.3.2. La modélisation du comportement

Même si elle ne fait pas partie des objectifs de ce travail de thèse, il nous semble intéressant d'évoquer ce qu'est la modélisation du comportement piétonnier.

La modélisation du comportement piétonnier consiste à formaliser les données recueillies (entre autres par l'intermédiaire des observations) sous forme de règles logiques ou d'équations mathématiques et statistiques. La mise en œuvre des modèles comportementaux ainsi produits peut conduire à confirmer ou à infirmer des hypothèses émises en amont. Citons à ce sujet, les travaux de l'équipe « Crowd Dynamics »¹⁸ qui s'intéresse à la modélisation du comportement de foules et à la mise en œuvre des modèles produits pour analyser et comparer des scénarii comportementaux dans diverses configurations spatiales.

L'élaboration de ces modèles peut donc, d'une part, constituer l'objectif d'une étude visant à mieux appréhender les phénomènes comportementaux et, d'autre part, constituer, grâce aux résultats que génère la mise en œuvre des modèles, une base pour d'autres études.

Généralement, les modèles comportementaux sont de deux types : des modèles dits « agrégés » décrivant la dynamique des systèmes comportementaux (foules/flux de piétons) et des modèles dits « désagrégés » décrivant le comportement individuel du piéton. Ces modèles sont souvent implémentés dans un environnement informatique permettant de tirer profit de la puissance des calculateurs pour mettre en œuvre des simulations plus ou moins complexes. On parle de simulations macroscopiques lorsque le modèle, sur lequel sont basées ces simulations, est un modèle agrégé, et de simulations microscopiques lorsque le modèle de base est désagrégé.

Quant aux techniques employées pour la modélisation des comportements, elles proviennent de travaux basés principalement sur quatre approches: l'approche stimulus-réponse, les systèmes à base de règles, les systèmes basés sur des automates et les systèmes multi-agents. Un état de l'art détaillé de ces modèles est présenté dans (Donikian, 2004).

La nature des hypothèses formulées en amont d'une démarche de modélisation influe directement sur le choix des techniques d'analyse et/ou de simulation et, de ce fait, sur le type des modèles comportementaux produits (modèles à bases de règles de décision, modèles à base d'automates, etc.). Notons, cependant, que la plupart des travaux de modélisation portent

¹⁸ www.crowddynamics.com

davantage sur l'évaluation des variables impliquées dans le modèle que sur le choix du modèle lui-même, ce dernier étant souvent admis comme valide.

4.4. Impact des facteurs personnels et environnementaux sur le comportement piétonnier

Des chercheurs du domaine de la santé publique, du transport et de l'aménagement urbain ont mené, ces dernières années, plusieurs recherches visant à identifier et à évaluer l'impact des facteurs de l'environnement urbain sur les activités physiques des usagers, les modes de déplacement, les itinéraires empruntés, les attitudes, etc.

L'intérêt récent éprouvé envers cette thématique est justifié, d'une part, par le fait que la prise en compte, dans la conception des environnements urbains, de la marche comme mode de déplacement non polluant et bénéfique pour la santé s'inscrit dans une perspective « durable ». D'autre part, cet intérêt est justifié par une prise de conscience croissante de l'influence de l'environnement construit sur la mobilité, et en particulier, sur les pratiques locales de la marche à pied et sur le niveau d'activité physique des usagers.

Heimstra & MacFarling (1974) qui ont étudié le comportement humain à travers la relation entretenue avec l'environnement immédiat ont dégagé trois types de relations :

- Le type d'environnement influe sur le comportement des gens qui s'y trouvent ;
- Les caractéristiques d'un cadre de vie, comme le bruit ou la densité, influencent le comportement et la personnalité des résidents ;
- L'environnement est une source de motivations dans la mesure où il incite les personnes à développer certaines formes d'adaptation.

4.4.1. Les facteurs personnels

Le consensus général dans les recherches portant sur le comportement piétonnier convient sur le fait que les facteurs personnels jouent un rôle de médiateur dans les mécanismes de perception des stimuli de l'environnement. Aussi, participent-ils grandement à la genèse des comportements et aux processus de prise de décision. Parmi ces facteurs, mentionnons : l'âge, la santé, l'expérience, la motivation, les besoins, les attentes, l'état psychologique et les facteurs d'ordre social et culturel.

A titre d'exemple, l'habitude de prendre un itinéraire plutôt qu'un autre est dans certains cas citée par les usagers comme un des facteurs ayant le plus influé sur leurs choix, comme cela apparaît dans l'étude de Seneviratne & Morall (1985).

Certains auteurs ont mis en évidence le fait que les notions subjectives, liées aux perceptions individuelles, influent sur la perception de la distance réelle et, de ce fait, sur le processus du choix d'itinéraires. C'est ainsi que (Levy et al., 1998)¹⁹ avancent l'idée que des distances dites « sociales » et « psychologiques » influent sur les mesures objectives des distances, on passe ainsi « d'une dimension mesurable de la proximité à des dimensions subjectives fortement marquées par les perceptions ».

Toujours concernant les facteurs personnels et plus précisément concernant l'état d'esprit de l'individu et la fonction (utilitaire ou récréative) qu'il pourrait attribuer au parcours

¹⁹ Cité dans Piombini (2006).

qu'il compte emprunter, il faudrait distinguer, selon Kaufmann (2000) entre la « mobilité comme moyen nécessaire au déploiement d'activités » (mobilité fonctionnelle, utilitaire) et la « mobilité comme finalité » (mobilité récréative, promenade).

Cette distinction, qui rejoint celle proposée par Gehl (1968) entre les activités « nécessaires » et activités « facultatives », est importante dans la mesure où le type de mobilité conditionne le rapport de l'usager à l'espace. En effet, si le piéton a généralement tendance à privilégier le chemin le plus court lors d'un déplacement utilitaire (nécessaire), il peut consentir, dans le cas d'une mobilité récréative (facultative) à allonger quelque peu son trajet à la recherche de plus de sécurité ou de confort. Kaufmann (2000) évoque à ce sujet « une perte de temps volontaire ». Pour chaque piéton, le déplacement peut donc être considéré comme un arbitrage entre l'optimisation de son temps et la volonté d'agrémenter son trajet.

A ce propos, nous avons essayé lors de notre étude de cas (cf. Chapitre 7) de nous placer dans un contexte de mobilité récréative en privilégiant un site urbain susceptible de favoriser, de par son emplacement et sa morphologie, des activités où certains usagers pourraient venir rechercher des situations plaisantes intégrant notamment des aspects microclimatiques.

4.4.2. Les facteurs environnementaux

Au regard de la multiplicité et la diversité des facteurs environnementaux susceptibles d'influer sur les comportements lors de déplacements, nous proposons dans le Tableau 9 une liste non exhaustive des études ayant exploré différents types de facteurs. Nous appuyant sur nos lectures et les synthèses bibliographiques élaborées par Lavadinho & Pini (2005) et Alfonzo (2005), nous proposons une classification de ces études selon les catégories de facteurs pris en compte.

Les études citées sont caractérisées par leur pluridisciplinarité. Elles font, pour la plupart, appel à diverses méthodes d'enquête (questionnaires, observations) et recourent à des techniques d'analyse quantitatives et qualitatives ainsi qu'à des méthodes de simulation numérique.

Catégories des facteurs environnementaux	Facteurs environnementaux	Comportements étudiés	Références
Facteurs morphologiques et spatiaux	Distance objective Distance perçue	Choix modal (entre marche et déplacement motorisé)	Black et al. (2001)
	Plus court chemin	Choix d'itinéraires et Type de la marche (récréative, fonctionnelle...)	Seneviratne & Morall (1985) ; Borgers & Timmermans (1986) ; Bovy & Stern (1989) ; Chang (2002)
	Minimisation des changements de direction	Choix d'itinéraires	Marchand (1974)

	Indicateur d'étalement urbain	Type d'activité	Saelens et al. (2003)
	Interconnexion de rues (Space Syntax)	Fréquentation des rues	Hillier & Hanson (1984) ; Desyllas & Duxbury (2001) ; Hillier & Iida (2005) ; Baran et al. (2008)
Aménagement et fonctionnalité	Proximité et accessibilité aux équipements	Marche (pas de distinction entre marche récréative et fonctionnelle)	Berrigan & Troiano (2002)
		Type marche (récréative et fonctionnelle)	Humpel et al. (2004)
		Activités physiques et marche (récréative et fonctionnelle)	Booth et al. (2000)
	Attractivité et type de quartier (traditionnel, moderne, banlieue...)	Choix modal et types de trajets (fonctionnels et récréatifs)	Friedman et al. (1994) ; Cervero & Radish (1996) ; Handy (1996)
Facteurs esthétiques et paysagers	Esthétique	Type de la marche (seul ou en groupe, récréative et fonctionnelle)	Ball et al. (2001)
	Présence d'éléments de verdure	Choix modal (entre marche et déplacement motorisé) et activités physiques	Burden et al. (1999)
	Paysages urbains (éléments bâtis et éléments de verdure)	Choix d'itinéraires	Piombini (2006) ; Piombini & Foltête (2006, 2007)
Microclimat et confort	Température, vitesse du vent, ensoleillement...	Occupation des espaces et nature des activités (position assise, position debout, discussion, observation, déplacement...)	Li (1994) ; Westerberg (1994) ; Zacharias et al. (2001) ; Boussoulim (2001) ; Zacharias & Stathopoulos (2004) ; Eliasson et al. (2007) ; Thorsson et al. (2007)
		Vitesse de déplacement	Rotton et al. (1990)
	Indicateurs de confort thermique, temps d'exposition	Occupation des espaces	Nikolopoulou & Lykoudis (2005) ; Thorsson et al. (2007)
Sécurité et nuisances	Sécurité perçue, intersections	Activités physiques et type de la marche	Giles-Corti & Donovan

liées au trafic	dangereuses, disponibilité de trottoirs, éclairage	(récréative et fonctionnelle)	(2002) ; Humpel et al. (2004)
	Bruit et pollution de l'air	Choix modal (entre marche et déplacement motorisé) et activités physiques	Burden (1999)

Tableau 9. *Facteurs environnementaux ayant un impact sur la marche*

Ce qui pourrait ressortir de prime abord en analysant le Tableau 9, c'est le fait que les recherches citées se sont surtout intéressées aux facteurs liés à la notion de distance (longueur des trajets et proximité des équipements), que les chercheurs considèrent souvent comme étant le facteur le plus important. En effet, le plus court chemin a toujours été admis comme étant le choix intuitivement adopté par les piétons lors de leurs déplacements. Selon Bovy & Stern (1989), deux tiers des personnes choisissent leurs chemins en faisant en sorte qu'ils soient les plus courts possibles. Par ailleurs, selon Marchand (1974), lorsqu'ils ne font pas le choix du parcours le plus court, les piétons peuvent être amenés à emprunter le parcours le plus simple en termes de changements de direction.

Les autres facteurs qui apparaissent comme étant importants dans le conditionnement des activités extérieures et dans le choix des itinéraires, sont les facteurs de morphologie urbaine liés à l'interconnexion et à l'agencement des rues. Les travaux les plus aboutis menés à ce sujet sont ceux s'articulant autour de la théorie Space Syntax²⁰ introduite par Hillier & Hanson (1984).

Les fondements de la théorie Space Syntax s'appuient sur l'hypothèse que la configuration du réseau urbain (d'un point de vue géométrique et topologique) représente l'aspect le plus important dans le façonnement des modèles de la mobilité pédestre.

Cette théorie repose sur des mesures (indicateurs) quantitatives décrivant la configuration du réseau des rues dans un espace urbain (interconnexion, degrés d'accessibilité...). La méthodologie décrivant cette théorie est présentée plus en détails à l'Annexe A.

Les approches développées par Space Syntax ont contribué de façon significative à la mise au point de notre démarche analytique. Ces approches proposent, en effet, une analyse quantitative de l'espace urbain basée sur des indicateurs numériques dont les corrélations avec des variables comportementales (fréquentation des rues, type de mobilité...) sont étudiés, notamment au travers de modèle de régressions multiples (Desyllas & Duxbury, 2001 ; Hillier & Iida, 2005 ; Baran et al., 2008). Une telle démarche nous a semblée, d'une part, compatible avec la nature des données (quantitatives) dont nous disposons, et, d'autre part, adaptée à nos objectifs d'identification des relations entre facteurs microclimatiques et comportements piétonniers.

Les facteurs esthétiques font partie des éléments intervenant dans la relation entre l'homme et l'environnement urbain. Leur influence a été notamment évoquée dans les récents

²⁰ www.spacesyntax.com

travaux de Piombini (2006) et de Piombini & Foltête (2006, 2007) qui dans une tentative d'établir un lien entre mobilité pédestre et paysages urbains, ont démontré que certains éléments du paysages urbains comme les places, les vitrines et, dans une certaine mesure, les monuments agissent comme attracteurs vis-à-vis des piétons. Tandis que d'autres éléments comme les parkings et les obstacles visuels ont tendance à repousser les piétons.

Les facteurs environnementaux qui nous intéressent le plus dans le cadre de cette thèse, à savoir les facteurs microclimatiques et le confort, ont été abordés par quelques études (confère Tableau 9). Nous essaierons dans la section suivante de les présenter plus en détails et de donner un aperçu des résultats obtenus par quelques unes de ces études.

4.4.2.1. Impact des facteurs microclimatiques sur la fréquentation et les activités

Les travaux relatifs aux effets des facteurs microclimatiques sur le comportement (Li, 1994 ; Weterberg, 1994 ; Boussoualim, 2001 ; Zacharias, 2001; Eliasson et al., 2007) ont en commun le fait qu'ils se situent dans un contexte d'aide à la conception et à l'aménagement des espaces urbains. A ce titre, et vu l'effet évident des facteurs microclimatiques sur la fréquentation des espaces extérieurs, certains appellent à un aménagement « sensible aux aspects microclimatiques » (Eliasson et al., 2007) en avançant, entre autres, l'argument qu'« un aménagement d'un espace urbain est considéré comme réussi si cet espace est agréablement perçu et aussi fortement fréquenté » (Weterberg, 1994).

Le deuxième point commun réside dans le fait que les auteurs ont fait le choix d'étudier les comportements piétonniers dans des espaces du type « places du centre-ville ». Ce choix s'explique par le fait que ces places, habituellement très fréquentées, favorisent les activités récréatives des piétons, qui dans ce cas de figure, semblent être plus sensibles à la qualité de l'environnement physique.

Zacharias et ses collègues (2001) ont montré en observant le comportement des usagers de sept places à Montréal que le facteur de la température a un effet prépondérant sur le taux de fréquentation et sur la nature des activités piétonnes (position assise, debout, exercices...); leur étude montre notamment que l'accroissement de la température combinée à la présence d'ensoleillement peut amener une augmentation sensible de la fréquentation. Ces auteurs sont aussi parvenus à identifier une valeur seuil de la température équivalente à 20°C. A partir de ce seuil, en présence de la lumière du soleil, les gens ont plutôt tendance à rechercher les zones ombrées ou du moins des zones moins ensoleillées.

Dans une étude plus récente (Zacharias & Stathopoulos, 2004) menée dans sept espaces urbains de San Francisco, les auteurs se sont intéressés au facteur "vent" et ont prouvé que la présence du vent est corrélée négativement à la présence des usagers dans les espaces urbains. Par ailleurs les résultats obtenus, notamment en ce qui concerne la relation entre les variables température et occupation de l'espace étaient sensiblement proches de ceux obtenus lors de la précédente étude à Montréal.

Les travaux de Eliasson (2007) montrent que la température de l'air, la vitesse du vent et la clarté du ciel ont une influence significative sur la perception des piétons et leurs appréciations de l'environnement ainsi que sur leur fréquentation des lieux. Pour recueillir les données liées à la fréquentation et à l'appréciation de l'environnement par les usagers, ces auteurs se sont appuyés sur des observations et des interviews effectuées dans quatre espaces urbains dans la ville de Gothenburg en Suède.

D'autres part, Eliasson (2007) démontre que, quel que soit le site de l'étude, la fréquentation des lieux augmente linéairement avec la température jusqu'à un certain seuil au-delà duquel elle diminue. Il met également en évidence à travers cette étude l'interaction entre les facteurs microclimatiques et les aspects psychologiques de l'individu. L'évaluation de l'environnement par les usagers diffère ainsi d'un site à un autre. Le vent est, par exemple, perçu positivement dans un site urbain en front de mer et négativement dans un site encerclé de bâtiments. Ce qui va dans le sens de ce qu'avançaient Nikolopoulou & Steemers (2003) dans leur étude sur l'adaptation psychologique, qui estimaient que le caractère naturel de l'environnement, en l'occurrence du vent fort en bord de la mer, est plus apprécié que des courants d'air dus à la disposition des bâtiments. La fréquentation des lieux suit, elle aussi, cette logique puisque l'effet du vent sur la diminution de la fréquentation en milieu urbain s'avère être plus important que dans les milieux ayant un caractère naturel.

Westerberg (1994) expose différentes études menées à Stockholm dans le but d'analyser les comportements des gens dans les espaces extérieurs. L'auteur démontre, en se basant sur des méthodes de comptage, que la fréquentation des espaces publics est beaucoup plus importante dans le cas d'un ciel dégagé et d'un vent très faible, que dans un environnement nuageux avec présence de vent.

Cet auteur identifie aussi deux valeurs seuils de la température de l'air en relation avec la pratique d'activités nécessitant une certaine perception de confort. Ainsi à partir d'une température de 11°C au soleil et de 20°C à l'ombre, le nombre de personnes qui se sentent plus à l'aise et qui ont tendance à choisir de s'asseoir lorsque l'aménagement le permet, augmente sensiblement.

Li (1994), qui a observé les comportements piétonniers en hiver et à l'intersaison dans cinq petites places de New York, a identifié une valeur de température (environ 5°C) à partir de laquelle, en présence d'ensoleillement, les activités extérieures augmentent et se diversifient. Dans ces conditions, la fréquentation peut aller jusqu'à tripler, de plus, le temps passé sur ces places s'allonge, il passe de quelques minutes (le temps d'une traversée de la place) à plusieurs dizaines de minutes (les gens prennent le temps de s'asseoir, de discuter entre eux...).

Notons que les résultats présentés ci-dessus, basés sur des données empiriques limitées à quelques sites, sont à considérer avec précaution. En effet, les corrélations identifiées entre les facteurs microclimatiques et les comportements, ainsi que les différents seuils de température ou de vitesse du vent, sont étroitement liés à l'appartenance socioculturelle des usagers et aux lieux dans lesquels se sont déroulées les études.

De tels résultats, à l'image des modèles de confort (présentés dans le *Chapitre 3*) ne peuvent pas être généralisés. Par exemple un seuil de température au soleil équivalent à 20°C à partir duquel les gens commencent à rechercher les zones ombrées et ce à cause de la gêne due à l'ensoleillement est peut être un seuil valable à Montréal ou à Stockholm, mais il serait de loin plus élevé dans des villes des pays du Golfe ou d'Afrique subsaharienne.

Il faut tout de même mentionner que le principal intérêt de ces résultats est d'identifier des tendances ou des stabilités corrélationnelles dans les relations entre les facteurs microclimatiques et les comportements piétonniers. Ils confortent, de ce fait, l'idée que l'environnement physique et particulièrement microclimatique influence sur le comportement.

Enfin, nous retenons que les études ayant porté sur l'impact des facteurs microclimatiques et de confort sur le comportement se sont surtout focalisées sur une analyse statique des facteurs microclimatiques et de leur influence sur des comportements essentiellement liés à l'occupation de l'espace et à la nature des activités. En revanche, l'influence des facteurs microclimatiques sur les comportements dynamiques : mobilité, choix d'itinéraires, attitudes des piétons lors de leurs déplacements, a été très peu étudiée.

4.4.2.2. Impact des facteurs microclimatiques sur la mobilité

Hormis des travaux évoqués précédemment (Westerberg, 1994 ; Zacharias et al., 2001) ayant mis en évidence des valeurs seuil de température à partir desquelles les piétons se déplacent de zones ensoleillées vers des zones ombragées ou moins ensoleillées, très peu d'études se sont intéressées aux effets des facteurs microclimatiques sur le déplacement et la mobilité piétonne.

Evoquons cependant les travaux de Rotton et al. (1990) qui ont souligné l'effet de la température ambiante sur la vitesse de marche. Les auteurs ont déduit que, dans le cas de très basses températures, les piétons ont tendance à marcher plus rapidement que lorsque la température est confortablement chaude (entre 15 et 20°C). Ils expliquent cela par le fait que l'individu augmente sa température interne par la marche, ce qui favorise, physiologiquement parlant, l'équilibre énergétique. D'autre part, en marchant relativement plus vite, le piéton quittera plus rapidement la zone froide et inconfortable pour atteindre, éventuellement, des zones thermiquement plus confortables.

En proposant des méthodes dédiées à une analyse dynamique de l'espace urbain basée sur une analyse fine de parcours piétonniers, notre étude s'inscrit donc dans un domaine de recherche encore peu exploré.

4.5. Synthèse intermédiaire

Ce chapitre a porté sur le comportement ainsi que sur les différentes manières de l'observer, de l'identifier et de le quantifier.

Nous nous intéressons, dans cette thèse au comportement comme étant l'ensemble des manifestations observables, externes à l'organisme, ainsi qu'aux facteurs microclimatiques susceptibles d'avoir une influence sur le choix des activités physiques et plus particulièrement sur la mobilité des piétons.

Par ailleurs, parmi les méthodes de recueil des données comportementales présentées dans ce chapitre, nous opterons pour une méthode d'observation naturaliste, réalisée en filmant les déplacements piétonniers dans un espace urbain. Notre objectif est de recueillir les données comportementales relatives aux itinéraires empruntés (trajectoires, longueurs) et aux attitudes des piétons empruntant ces itinéraires (positions et durée des arrêts, vitesse moyenne de déplacement).

Cette méthode d'observation, qui pourrait s'apparenter à celle des préférences révélées, a été préférée aux méthodes basées sur le questionnement des individus (telles que la méthode des préférences déclarées) en raison du caractère subliminal de la perception des facteurs microclimatiques, pouvant rendre ainsi une méthode de recueil des avis subjectifs des individus très délicate.

Enfin, nous avons remarqué que les recherches portant sur l'influence des facteurs environnementaux (et particulièrement microclimatiques) sur les comportements n'ont que très peu abordé la thématique de la mobilité (choix d'itinéraire, attitude au cours de la marche...). C'est pourquoi nous cherchons dans ce travail à enrichir le corpus des connaissances liées à la thématique de l'influence de facteurs microclimatiques sur le comportement.

4.6. Références bibliographiques

- Alfonzo, M. A.** (2005). To Walk or not to walk? The Hierarchy of Walking Needs. *Environment and Behavior*. Vol 37, n° 6. pp. 808-836.
- Ball, K., Bauman, A., Leslie, E. & Owen, N.** (2001). Perceived environmental aesthetics and convenience and company are associated with walking for exercise among Australian adults. *Preventive Medicine*. Vol 33. pp. 434-440.
- Baran, P. K., Rodriguez, D. A. & Khattak, A. J.** (2008). Space syntax and walking in a new urbanist and suburban Neighbourhoods. *Journal of Urban Design*. Vol 13, n° 1. pp. 5-28.
- Barker, R. G.** (1965). Exploration in ecological psychology. *American Psychologist*. Vol 20, n°1. pp. 1-14.
- Berrigan, D. & Troiano, R.** (2002). The association between urban form and physical activity in U.S. adults. *American Journal of Preventive Medicine*. Vol 23(2S). pp. 74-79.
- Black, B., Collins, A. & Snell, M.** (2001). Encouraging walking: The case of journey-to-school trips in compact urban areas. *Urban Studies*. Vol 38. pp. 1121-1141.
- Booth, M., Owen, N., Bauman, A., Clavisi, O. & Leslie, E.** (2000). Social-cognitive and perceived environment influences associated with physical activity in older Australians. *Preventive Medicine*. Vol 31. pp. 15-22.
- Borgers, A. & Timmermans, H.** (1986). A model of pedestrian route choice and demand for retail facilities within inner-city shopping areas. *Geographical Analysis*. Vol 18, n° 2. pp. 115-128.
- Boussoualim, A.** (2001). Contribution à la caractérisation de l'impact et de l'incidence du microclimat sur l'usage et les activités en espace public extérieur. Étude de cas à Blagnac. Thèse de doctorat. GRECO - Ecole d'Architecture de Toulouse . 256 p.
- Bovy, P. H. L. & Stern, E.** (1990). *Route choice : Wayfinding in transport networks*. Dordrecht, the Netherlands : Kluwer Academic Press.
- Bronfenbrenner, U.** (1977). Toward an experimental ecology of human development. *American Psychologist*. Vol 32, n°7. pp. 513-129.
- Burden, D., Wallwork, M., Sides, D., Trias, R. & Rue, H.** (1999). *Street design guidelines for healthy neighborhood*. Centre for Livable Communities.
- Cervero, R., & Radish, C.** (1996). Travel choices in pedestrian versus automobile oriented neighborhoods. *Transport Policy*. Vol 3. pp. 127-141.
- Chang, D.** (2002). Spatial choice and preference in multilevel movement networks. *Environment and Behavior*. Vol 34, n° 5. pp. 582-615.
- Cook, T. & Campbell, A.** (1979). *Quasi-Experimentation: Design and Analysis Issues for Field Settings*. Boston : Houghton Mifflin.
- Costermans, J.** (2000). *Les activités cognitives*. Bruxelles : De Boeck Université (2e édition).

240 p.

Desyllas, J. & Duxbury, E. (2001). Axial Maps and Visibility Graph Analysis. in : Proceedings of the 3rd International Space Syntax Symposium Atlanta 2001. pp. 27-39.

Donikian, S. (2004). Modélisation, contrôle et animation d'agents virtuels autonomes évoluant dans des environnements informés et structurés. Habilitation à diriger des recherches, IRISA. 236 p.

Eliasson, I., Knez, I., Westerberg, U., Thorsson, S. & Lindberg, F. (2007). Climate and behaviour in a Nordic city. *Landscape and Urban Planning*. Vol 82. pp. 72-84.

Friedman, B., Gordon, S. & Peers, J. (1994). Effect of neotraditional neighborhood design on travel characteristics. *Transportation Research Record*. Vol 1466. pp. 63-70.

Gehl, J. (1968). *Life Between Buildings: Using Public Space*. Copenhagen : Danish Architectural Press.

Giles-Corti, B. & Donovan, R. J. (2002). The relative influence of individual, social and physical environment determinants of physical activity. *Social Science and Medicine*. Vol 54, n° 12. pp. 1793–1812.

Handy, S. (1996). Urban form and pedestrian choices: Study of Austin neighborhoods. *Transportation Research Record*. Vol 1552. pp. 135-144.

Heimstra, N. W. & Macfarling, L. H. (1974). *Environmental Psychology*. Monterey, Canada : Brooks/Cole.

Hillier, B. & Hanson, J. (1984). *The social logic of space*. Cambridge, UK : Cambridge University Press.

Hillier, B. & Iida, S. (2005). Network and Psychological Effects in Urban Movement. in : COSIT 2005. p. 475–490.

Humpel, N., Owen, N., Iverson, D., Leslie, E. & Bauman, A. (2004). Perceived environment attributes, residential location, and walking for particular purposes. *American Journal of Preventive Medicine*. Vol 26, n° 2. pp. 119-125.

Kaufmann, V. (2000). *Mobilités quotidiennes et dynamiques urbaines*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires.

Larousse, C., Bloch, H. & R. Chemama, E. D. (2002). *Grand dictionnaire de la psychologie Larousse*. 1060 p.

Lavadinho, S. & Pini, G. (2005). Développement durable, mobilité douce et santé en milieu urbain. Développement urbain durable, gestion des ressources et gouvernance rapport de recherche, Lausanne, Suisse : Observatoire universitaire de la Ville et du développement durable. 8 p.

Legendre (1985). Etudier l'enfant de la naissance à 3 ans : les grands courants méthodologiques actuels. Paris : P.-M. Baudonnière (Editions du CNRS) , "L'expérimentation écologique dans l'approche des comportements sociaux des jeunes enfants en groupes". pp. 165-181.

Levy, I., Santi, G. & Thomas, O. (1998). La ville ou la proximité organisée. Paris : J.M. Huriot, "La notion de proximité urbaine : quels apports?". pp. 199-209

Li, S. (1994). Users' Behaviour of Small Urban Spaces in Winter and Marginal Seasons. *Architecture and Behavior*. Vol 10, n° 1. pp. 95-109.

- Marchand, B.** (1974). Pedestrian traffic planning and the perception of the urban environment : A French example. *Environment and Planning*. Vol 6. pp. 491-507.
- Moser, G. & Weiss, K.** (2003). *Espaces de vie: aspects de la relation homme-environnement*. Paris : Armand Colin. 396 p.
- Nikolopoulou, M. & Lykoudis, S.** (2006). Thermal comfort in outdoor urban spaces : Analysis across different European countries. *Building and Environment*. Vol 41, n° 11. pp. 1455-1470.
- Nikolopoulou, M. & Steemers, K.** (2003). Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings*. Vol 35, n° 1. pp. 95-101.
- Pearce, D. W., Atkinson, G. & Mourato, S.** (2007). *Analyse coûts-bénéfices et environnement: Développements récents*. Paris : OCDE. 355 p.
- Piombini, A.** (2006). *Modélisation des choix d'itinéraires pédestres en milieu urbain. Approche géographique et paysagère. Thèse de doctorat. Université de Franche-Comté . 299p.*
- Piombini, A. & Foltête, J.-C.** (2007). *Vers une définition des ambiances urbaines favorables à la mobilité pédestre. 42ème congrès de l'AQTR, rapport de recherche, Montréal, Canada.*
- Rotton, J., Shats, M. & Standers, R.** (1990). Temperature and pedestrian tempo. *Environment and Behavior*. Vol 22, n° 5. pp. 650-674.
- Saelens B. E., Sallis, J. F., Black, J. B. & Chen, D.** (2003). Neighborhood-based differences in physical activity: an environment scale evaluation. *American Journal of Public Health*. Vol 93, n°9. pp. 1552-1558.
- Samuelson, P.** (1948). Consumption theory in terms of revealed preference. *Economica*. Vol 15. pp. 242-253.
- Seneviratne, P. N. & Morrall, J. F.** (1985). Analysis of factors affecting the choice of route of pedestrians. *Transportation Planning and Technology*. Vol 10. pp. 147-159.
- Thorsson, S., Honjo, T., Lindberg, F., Eliasson, I. & Lim, E.-M.** (2007). Thermal Comfort and Outdoor Activity in Japanese Urban Public Places. *Environment and Behavior*. Vol 39, n°5. pp. 660-684.
- Westerberg, U.** (1994). Climatic planning—physics or symbolism ?. *Architecture and Behavior*. Vol 19. pp. 49-72.
- Willis, A., Gjerse, N., Havard, C., Kerridge, J. & Kukla, R.** (2004). Human movement behaviour in urban spaces: implications for the design and modelling of effective pedestrian environments. *Environment and Planning B: Planning and Design*. Vol 31, n° 6. pp. 805 – 828.
- Zacharias, J. & Stathopoulos, T.** (2004). Spatial behavior in San Francisco's plazas the effects of microclimate, other people, and environmental design. *Environment and Behavior*. Vol 36, n° 5. pp. 638-658.
- Zacharias, J., Stathopoulos, T. & Wu, H.** (2001). Microclimate and downtown open space activity. *Environment and Behavior*. Vol 33. pp. 296-315.

Conclusion de la première partie

La première partie de ce rapport de thèse a été dédiée aux différents éléments théoriques qui déterminent la relation entre l'Homme et son Environnement. Elle a consisté en une étude bibliographique que nous avons voulue la plus claire possible en essayant de ne retenir que les notions pertinentes et suffisamment explicites à la bonne compréhension des phénomènes complexes impliqués dans la relations Homme-Environnement.

Au cours du premier chapitre, nous avons abordé la notion d'ambiances architecturales et urbaines à travers les différentes significations et méthodes de recueil et d'analyse qui lui sont associées.

Ce que nous retenons de ce premier chapitre, c'est l'originalité des méthodes d'analyse dynamiques basées sur les parcours piétonniers comme moyen d'explorer l'espace urbain.

Ces méthodes, qui rendent compte de la dynamique des formes perçues par les piétons se déplaçant dans un environnement urbain, constituent une alternative intéressante aux méthodes d'analyse dites statiques destinées à fournir une cartographie des données d'ambiances qui sont habituellement employées par les chercheurs et autres urbanistes pour l'analyse spatiale de ces phénomènes.

Les méthodes dynamiques utilisées pour l'analyse des données physiques, nous a donc inspirés dans la démarche méthodologique que nous exposons dans la deuxième partie de ce rapport.

Dans le deuxième chapitre, que nous avons consacré à l'étude des différents mécanismes de prise d'information, nous nous sommes focalisés sur une approche cognitiviste de la prise d'information, dissociant le phénomène de sensation (excitation des capteurs sensoriels) de celui de la perception (traitement de l'information et représentations). Cette approche nous paraît, en effet, proposer une modélisation de la perception qui pourrait convenir à la démarche analytique que nous souhaitons mettre en place. En effet, nous dissocierons, dans un premiers temps, l'analyse des stimuli physiques de l'analyse des usages.

Par ailleurs, nous retenons dans ce chapitre la pertinence de l'hypothèse de la « perception subliminale » qui stipule que des stimuli peuvent très bien atteindre le seuil de réception physiologique d'un individu sans atteindre son seuil perceptif (ou de conscience). Ces stimuli ne seraient pas pour autant ignorées par l'organisme, ils pourraient, en effet, intervenir dans le processus d'activation du cerveau et, de ce fait, influencer sur la perception et éventuellement la prise de décision de l'individu. Les stimuli microclimatiques caractérisés généralement par leur faible intensité et par leur homogénéité dans le temps, pourraient très bien faire partie de la famille des stimuli n'atteignant pas toujours le seuil de perception et être, ainsi dans certains cas, inconsciemment perçues par l'individu.

Ensuite, nous avons exposé dans le troisième chapitre les modèles prédictifs du confort en nous attardant sur les deux principales approches théoriques utilisées pour l'élaboration de ces modèles, à savoir d'une part l'approche physique et physiologique et, d'autre part l'approche psychologique.

Nous avons retenu dans ce chapitre certains critères et modèles de confort qui nous serviront lors de la phase de caractérisation des parcours qui sera présentée dans la partie suivante du rapport. Ainsi, pour évaluer le confort thermique, nous utiliserons un indicateur (*PMV*) basé sur l'approche physique et physiologique. Le recours à cet indicateur pourra rendre compte du déséquilibre physiologique synonyme de gêne thermique mais les résultats obtenus devront être relativisés car ce genre d'indicateurs ne reflète qu'une partie de la réalité.

Le quatrième et dernier chapitre de cette partie a porté sur le comportement et sur les diverses méthodes destinées à l'étudier. Parmi les méthodes de recueil des données comportementales présentées dans ce chapitre, nous pencherons pour une méthode d'observation naturaliste, réalisée en filmant les déplacements piétonniers dans un espace urbain. Notre objectif étant de recueillir les données comportementales relatives aux itinéraires empruntés (trajectoires, longueurs...) et aux attitudes des piétons empruntant ces itinéraires (positions et durée des arrêts, vitesse moyenne de déplacement...).

Problématique et objectifs

A travers les différents travaux de recherche présentés dans la première partie, nous avons constaté que le piéton, son confort, sa perception, son comportement... sont devenus des sujets auxquels différents spécialistes et chercheurs accordent un intérêt de plus en plus important. Cette tendance contribue à mettre le piéton au centre des préoccupations et des problématiques se rapportant à la conception et à la réalisation de projets urbains.

Néanmoins, certains aspects liés à l'influence des facteurs environnementaux sur le comportement piétonnier demeurent insuffisamment explorés. Nous avons notamment constatés que la problématique de l'influence des facteurs microclimatiques sur le comportement des piétons, et plus particulièrement leurs déplacements, n'a été que rarement abordée.

C'est donc dans ce contexte que nous souhaiterions apporter, par l'intermédiaire de cette recherche, quelques solutions techniques d'analyse et de caractérisation ainsi que des éléments de réponses à la problématique de l'influence des facteurs microclimatiques sur les déplacements des piétons.

Ainsi, il sera question dans la suite du rapport de proposer une méthode permettant de vérifier dans quelle mesure les facteurs microclimatiques peuvent influencer sur les prises de décisions (choix de parcours) et les attitudes (nombre des arrêts, durée des arrêts, longueur des parcours, vitesse de déplacement) du piéton se déplaçant dans un milieu urbain ouvert.

Plus précisément, nous nous demandons, tout en étant conscient du rôle de médiateur joué par les facteurs personnels et subjectifs, s'il est possible d'identifier, dans certaines conditions, des tendances et/ou des relations plus ou moins stables entre, d'une part, les caractéristiques microclimatiques des parcours et, d'autre part, les attitudes et les prises de décision.

Pour arriver à cette fin, nous proposons de développer une méthode analytique qui se veut applicable dans différents contextes (géographiques, climatiques...). Cette méthode sera basée sur la simulation des données microclimatiques et sur l'observation des données comportementales. Par ailleurs, elle aura pour principal objectif de caractériser, dans un environnement informatique, les parcours du point de vue microclimatique et du point de vue comportemental.

Les relations entre les résultats des deux caractérisations (microclimatique et comportementales) seront, par la suite, analysées statistiquement dans le cadre d'une étude de cas.

DEUXIÈME PARTIE

Vers une méthode pour l'évaluation de l'influence des facteurs microclimatiques sur la mobilité piétonne

Introduction de la deuxième partie

Après la présentation du contexte scientifique de cette étude et la définition des différents éléments théoriques auxquels nous aurons recours dans la suite de ce rapport, nous consacrons cette partie à la méthodologie destinée l'étude de l'influence des facteurs microclimatiques sur les comportements piétonniers liés à la mobilité, ainsi qu'à sa mise en œuvre dans le cadre d'un cas d'étude réel.

La deuxième partie de ce manuscrit détaillera les étapes de la méthode d'analyse que nous proposons. Le premier chapitre de cette partie (*Chapitre 5*) est consacré à la méthode de caractérisation microclimatique des parcours. Cette méthode, basée sur des techniques de simulation, de traitement du signal et de classification automatique des données, a pour objectif de fournir une description quantitative et qualitative de la qualité microclimatique des parcours.

Le second chapitre de cette deuxième partie (*Chapitre 6*) concerne la méthode de caractérisation comportementale des parcours piétonniers. Cette méthode est basée sur les données comportementales recueillies lors des observations menées *in situ*. Par ailleurs, elle vise à décrire les parcours du point de vue de leurs propriétés comportementales (vitesse moyenne de déplacement, durée et longueur des parcours, nombre et durée des arrêts) et permettre ainsi de pouvoir étudier l'influence des caractéristiques microclimatiques des parcours sur les comportements piétonniers.

Le dernier chapitre (*Chapitre 7*) est destiné à la mise en œuvre pratique de notre méthode dans le cadre d'un cas d'étude réel (le cours Cambronne à Nantes). Lors de ce chapitre nous appliquons les méthodes de caractérisation (microclimatique et comportementale) et nous procédons à une mise en correspondance des résultats obtenus en vue d'étudier les relations susceptibles d'exister entre les propriétés microclimatiques des parcours et les comportements piétonniers liés à la mobilité.

Chapitre 5. Caractérisation microclimatique des parcours

5.1. Introduction

Nous abordons dans ce chapitre la première partie de notre contribution qui est la caractérisation microclimatique des parcours. Cette phase vise à décrire les parcours piétonniers du point de vue de leurs particularités microclimatiques. Pour ce faire, elle se base sur une représentation, sous forme de signaux, de l'évolution des paramètres microclimatiques le long des parcours étudiés.

Nous proposons dans ce chapitre de décrire l'implémentation de cette phase de caractérisation microclimatique. Nous avons, en effet, développé un outil d'analyse et de visualisation permettant de mettre en œuvre les différentes composantes de cette phase de caractérisation.

Les données gérées dans cet outil d'analyse proviennent de deux sources : le logiciel de simulation SOLENE pour la simulation de l'éclairement et du logiciel ENVI-MET pour les simulations thermo-radiatives, aérauliques et bioclimatiques (confort). Ces données simulées sont stockées sur différentes « couches » de valeurs. Chaque « couche » représente les résultats de la simulation d'une variable physique au niveau du piéton.

L'outil en question permet, d'abord, à l'utilisateur d'indiquer virtuellement les parcours qu'il souhaite étudier, il procède, ensuite, à différents traitements (construction des signaux, calcul des indicateurs caractéristiques et classification). Il permet, enfin, de restituer l'information au sein d'une représentation 3D de l'environnement urbain afin que l'utilisateur visualise les résultats des traitements effectués.

Techniquement, l'outil informatique développé s'articule autour de deux composantes :

- Une première composante « graphique », dédiée à l'affichage des données géométriques et microclimatiques relatives à l'environnement urbain et aux parcours, ainsi à la restitution des résultats des traitements effectués. Cette composante a été développée en langage de programmation C++ et fait appel aux routines de la bibliothèque graphique OpenGL (Open Graphics Library²¹).
- Une deuxième composante « analytique », dont l'objectif est d'étudier les signaux microclimatiques relatifs aux parcours et de les caractériser quantitativement et qualitativement. Cette composante a été développée dans un environnement MATLAB®²² et fait appel à différentes boîtes à outils dédiées aux traitements des signaux numériques et à la classification des données.

Les signaux représentant l'évolution des variables microclimatiques perçues par les piétons le long de leurs parcours sont les entités centrales de la phase de caractérisation

²¹ www.opengl.org

²² www.mathworks.fr

microclimatique des parcours. En effet, caractériser les parcours d'un point de vue microclimatique, revient, selon notre approche, à caractériser les signaux des phénomènes physiques qui leur sont associés.

Nous présentons, dans les sections suivantes, toutes les étapes relatives à l'étude de ces signaux : de leur construction à leur analyse.

5.2. Modélisation des stimuli microclimatiques

L'idée, à ce stade, est de modéliser les stimuli microclimatiques dont on fait l'hypothèse qu'ils sont percevables par le piéton au cours de son déplacement. Cette modélisation est censée refléter le caractère dynamique de ces stimuli lors de leur variation le long du cheminement du piéton.

Pour ce faire, nous proposons une modélisation des stimuli microclimatiques sous forme de « signaux ». Un signal consiste en une succession de valeurs physiques évoluant le long du cheminement du piéton. Le signal microclimatique est représenté par une courbe $v = f(t)$ où v désigne une variable microclimatique et où t représente le temps de parcours ($t = 0$ étant l'instant relatif au début du parcours).

La technique de construction des signaux microclimatiques est basée sur l'extraction, à partir du modèle urbain tridimensionnel informé, des valeurs microclimatiques se succédant le long des parcours tracés au moyen de la composante graphique de l'outil d'analyse de parcours. Cette extraction est, en fait, réalisée à partir d'un plan horizontal virtuel situé à 1,5 mètre du niveau du sol²³.

Par ailleurs, nous avons opté pour un pas d'échantillonnage du signal équivalent à une seconde. Autrement dit, afin de construire le signal, les valeurs microclimatiques seront extraites toutes les secondes le long des parcours. La forme d'un signal dépendra ainsi de la vitesse de déplacement du piéton effectuant le parcours dans le sens où plus le piéton se déplacera rapidement moins le signal comportera de points.

La Figure 21 illustre le type de résultat auquel nous voulons aboutir au moyen de la méthode de modélisation des stimuli microclimatiques présentée dans cette partie, à savoir un signal obtenu suite à la sélection d'un parcours sur le module graphique de l'outil d'analyse. Le signal de la Figure 21 représente l'évolution de la variable « vitesse de l'air » le long du parcours. Les valeurs de la variable « vitesse de l'air » sont situées au niveau du plan virtuel du piéton.

Pour obtenir ce signal, nous devons passer par deux étapes de prétraitement : la discrétisation du parcours et l'extraction des données à partir du plan du piéton.

²³ Dans les études portant sur des mesures ou des simulations des facteurs microclimatiques à l'échelle du piéton, on se place usuellement à un niveau de 1,5 mètre du sol représentant, en moyenne, le niveau entre l'abdomen et la tête du piéton.

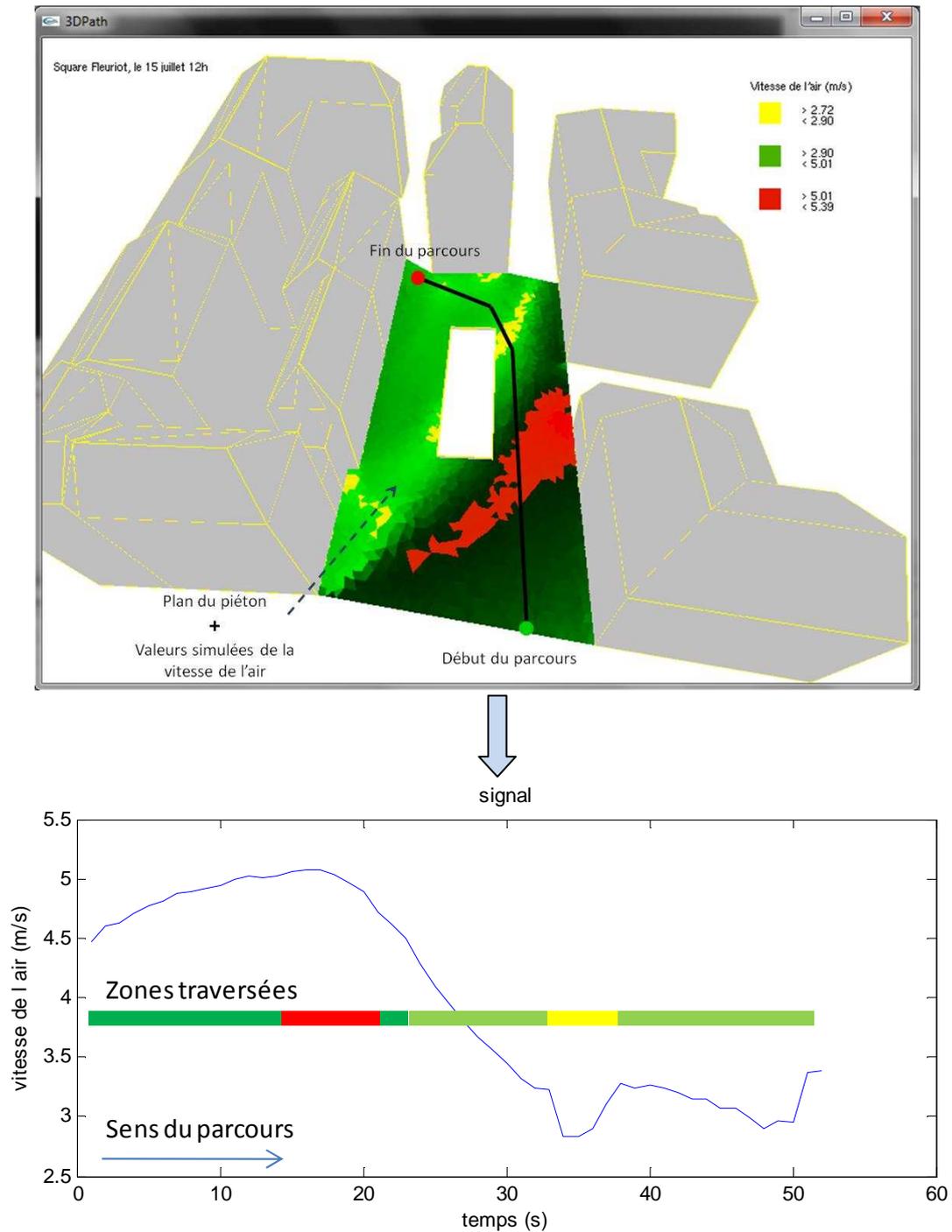


Figure 21. Sélection d'un parcours au niveau du plan virtuel du piéton et construction du signal représentant l'évolution de la vitesse de l'air le long de ce parcours

5.2.1. Discrétisation des parcours

Un parcours, tel qu'il est géré par notre outil informatique consiste, géométriquement, en une trajectoire reliant des points sélectionnés par l'utilisateur.

Les trajectoires ainsi tracées traversent le champ des valeurs simulées au niveau du plan du piéton. Ce dernier est discrétisé en mailles (facettes) triangulaires où à chaque maille est affecté un ensemble de valeurs simulées (une valeur par variable étudiée). Nous avons opté

pour une surface de maille moyenne équivalente à $0,5 \text{ m}^2$. Cette surface constitue, en effet, un bon compromis en termes de complexité et de temps de calcul, aussi bien lors des simulations que lors des traitements effectués par notre outil d'analyse.

En vue de calculer les valeurs microclimatiques sur les différents points du parcours, celui-ci est discrétisé en une succession de blocs rectangulaires. Le nombre de blocs rectangulaires obtenus correspondra *in fine* au nombre d'échantillons du signal microclimatique.

Le schéma présenté dans la Figure 22 représente un parcours dessiné sur le plan triangulé du piéton et discrétisé en blocs rectangulaires.

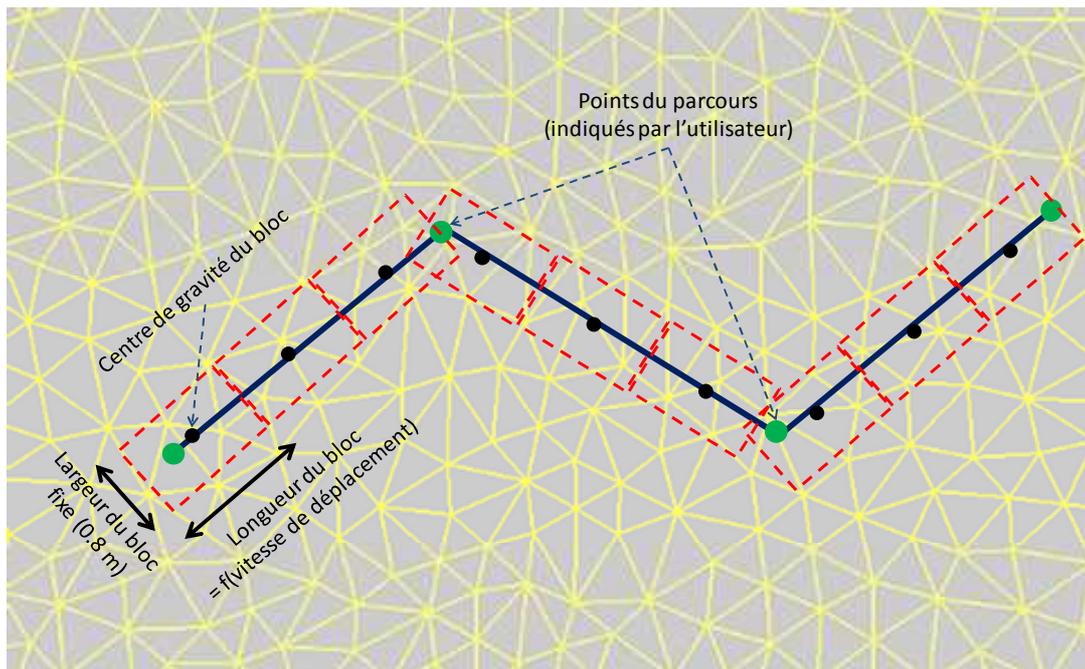


Figure 22. *Discretisation du parcours en blocs rectangulaires*

Chaque bloc rectangulaire est censé correspondre à la surface horizontale qu'une personne, en station debout et en mouvement, est susceptible de couvrir. Fruin (1971) a estimé cette surface à environ 1 m^2 .

Les valeurs du signal microclimatiques seront affectées aux centres de gravité des blocs rectangulaires et calculées en fonction des valeurs portées par les facettes triangulaires traversées par les blocs (cf. § 5.2.2).

Par ailleurs, le pas d'échantillonnage choisi pour le signal étant un pas temporel égal à une seconde, nous faisons varier la longueur des blocs rectangulaires, d'un parcours à un autre, en fonction de la vitesse moyenne de déplacement du piéton pour chacun des parcours. Cette vitesse est calculée, au moment du recueil des informations comportementales (cf. § 6.4.2), en fonction de la longueur du parcours et du temps mis par le piéton pour effectuer le parcours

A titre d'exemple, si l'utilisateur souhaite analyser un parcours correspondant au cheminement d'un piéton se déplaçant avec une vitesse moyenne de 4 km/h ($1,11 \text{ m/s}$). La

longueur du bloc rectangulaire devra être équivalente à $1,11\text{ m}$ afin que le pas d'échantillonnage du signal corresponde à une seconde.

5.2.2. Extraction des données le long des parcours

Pour calculer une valeur physique au niveau du centre de chaque rectangle composant le parcours, nous proposons deux approches d'extraction de données : une approche que nous avons appelée « barycentrique » et une autre « surfacique » (voir Figure 23). La différence entre ces deux approches réside dans la manière de considérer l'apport des valeurs, affectées aux mailles triangulaires du plan du piéton, dans le calcul des valeurs qui seront attribuées aux blocs rectangulaires du parcours.

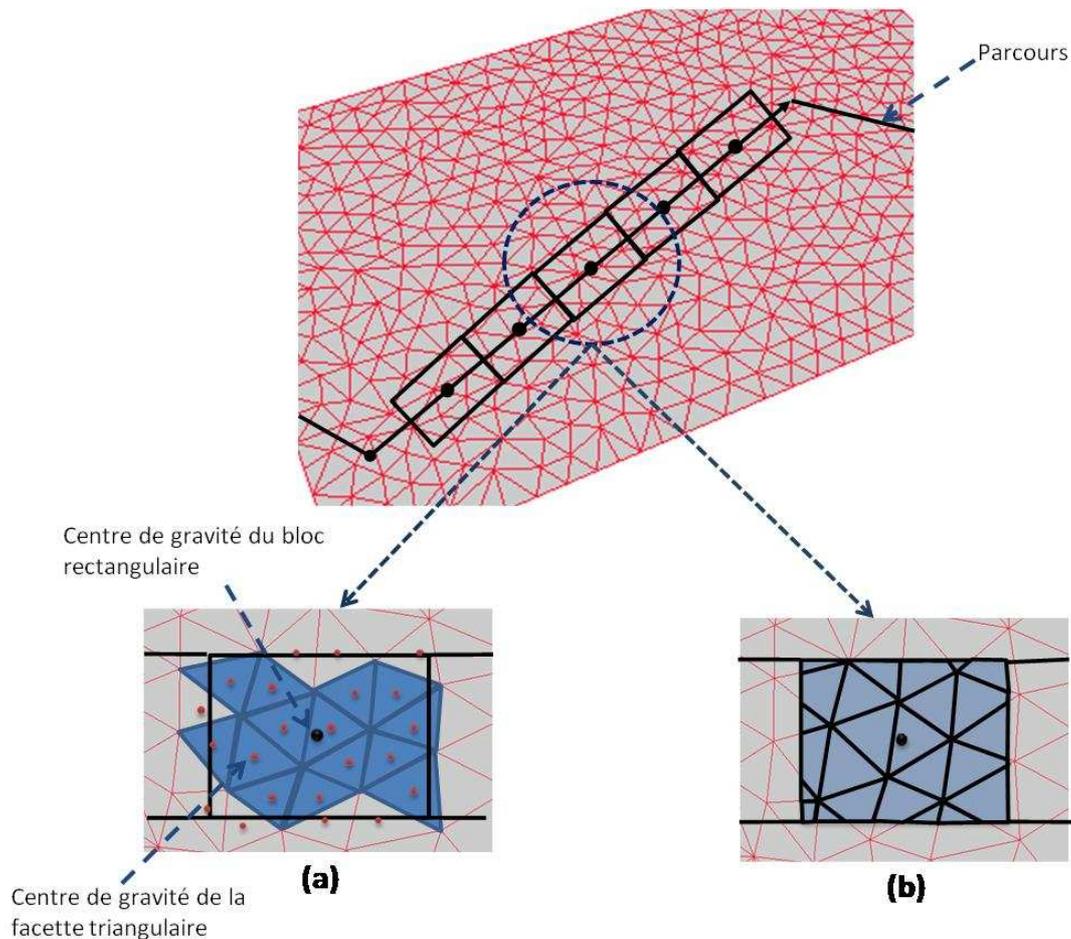


Figure 23. Méthodes d'extraction des données le long d'un parcours - (a) approche barycentrique, (b) approche surfacique

5.2.2.1. L'approche d'extraction barycentrique

La première méthode, schématisée dans la Figure 23(a), en l'occurrence la plus simple à implémenter, consiste à calculer la valeur affectée au centre d'un rectangle en considérant que tout triangle ayant le barycentre contenu dans ce rectangle, contribue, par la valeur qui lui est affectée, au calcul de la valeur qui sera affectée au rectangle. Ci-dessous (Figure 24) l'algorithme décrivant cette méthode.

```

Pour tous les rectangles du parcours
  S=0
  nb_tr=0 // nombre de triangles contenus dans le rectangle
  Pour tous les triangles interceptés par le parcours
    Si le barycentre du triangle est à l'intérieur du
    rectangle
      Alors
        nb_tr=nb_tr+1
        S=S+Vtj
        //Vtj : valeur portée par le triangle j
      Fin Si
  Fin Pour
  Vri=S/nb_tr
  //Vri : valeur affectée au centre du rectangle i
Fin Pour

```

Figure 24. *Algorithme de la méthode barycentrique*

5.2.2.2. L'approche d'extraction surfacique

Dans cette approche, nous prenons en compte la portion de surface du triangle comprise dans le rectangle pour le calcul de la valeur de la grandeur physique affectée au centre du rectangle (Figure 23(b)).

Cette méthode est, certes, plus complexe que la première méthode mais elle est cependant plus réaliste étant donné que les triangles partiellement à l'intérieur du rectangle sont censés moins contribuer au calcul de la valeur, au niveau du centre de gravité du rectangle, que des triangles entièrement inclus dans ce même rectangle. L'algorithme présenté dans la Figure 25 décrit la méthode « surfacique » :

```

Pour tous les rectangles du parcours
  S=0
  Pour tous les triangles interceptés par le parcours
    Ptj=Sij/Sr
    S=S+Ptj*Vtj
    //Ptj : poids affecté au triangle j
    //Sji : surface du triangle j incluse dans le
    rectangle i
    //Sr : surface du rectangle (fixe)
    //Vtj : valeur portée par le triangle j
  Fin Pour
  Vri=S/Somme(Ptj)
  //Vri : valeur affectée au centre du rectangle i
Fin Pour

```

Figure 25. *Algorithme de la méthode surfacique*

Une comparaison entre les deux méthodes d'extraction est présentée dans l'Annexe B. Elle met en évidence le fait que les deux méthodes sont assez proches du point de vue des résultats qu'elles produisent. Même si la méthode surfacique semble produire des signaux légèrement plus proches des signaux réels que la méthode barycentrique, nous opterons, dans la suite de notre travail, pour la méthode barycentrique qui présente l'avantage d'être plus facile à implémenter et d'être plus rapide en termes de temps d'exécution.

5.3. Méthode de caractérisation microclimatique des parcours

A quels éléments quantitatifs pourrait-on avoir recours afin de caractériser les signaux microclimatiques et, de ce fait, les parcours ? C'est la question à laquelle nous tentons de répondre dans cette partie.

Pour caractériser l'aspect dynamique de la perception des stimuli physiques le long des parcours, nous avons intuitivement pensé aux aspects liés aux changements du sens de variation ainsi qu'à l'intensité des signaux correspondant à ces parcours.

Nous proposons de quantifier ces deux aspects par l'intermédiaire d'indicateurs numériques. Notre objectif est de mettre en évidence les éléments qui peuvent faire en sorte qu'un signal microclimatique d'un parcours, puisse être différent (ou proche) du signal microclimatique d'un autre parcours. La méthode d'analyse et de calcul d'indicateurs numériques présentée dans cette partie a été implémentée au niveau de la composante analytique de l'outil d'analyse des parcours.

5.3.1. La segmentation du signal

En vue d'étudier les caractéristiques des signaux microclimatiques relatifs aux parcours obtenus au moyen de la méthode de construction des signaux microclimatiques (cf. § 5.2.2), nous proposons dans un premier temps de segmenter les signaux selon un critère de changement de sens de variation. Le but est de disposer de portions de signaux monotones (croissantes, décroissantes ou constantes) et, de ce fait, plus facilement caractérisables que la globalité du signal.

Pour la mise en œuvre de la technique de segmentation, nous nous basons sur une méthode d'analyse du signal permettant d'identifier les variations à différentes échelles fréquentielles du signal. Cette méthode est la Transformée en Ondelettes Discrète (*TOD*), brièvement présentée dans la section suivante.

5.3.1.1. La Transformée en Ondelettes Discrète (*TOD*)

La Transformée en Ondelettes Discrète (*TOD*) (Daubechies, 1990 ; Chan, 1995) est une technique mathématique d'analyse du signal basée sur le calcul de gradients multi-échelles.

Le principe de la *TOD* est de transformer un signal donné en entrée en un ensemble de coefficients indiquant, à travers différentes échelles fréquentielles (de l'échelle la plus fine à l'échelle la plus grossière), des irrégularités temporellement localisables au niveau du signal d'origine. Plus les valeurs de ces coefficients sont grandes, plus l'irrégularité locale du signal est importante.

Un exemple de *TOD* à trois niveaux de décomposition d'un signal représentant la variation de la vitesse de l'air le long d'un parcours est présenté dans la Figure 26.

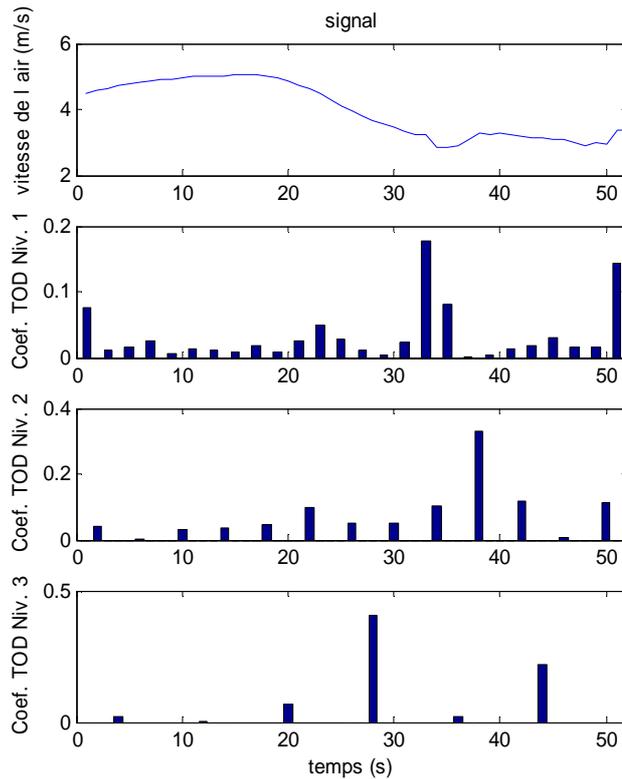


Figure 26. Analyse d'un signal par une transformée en ondelettes discrète à 3 niveaux de décomposition

L'étude des caractéristiques du signal par l'intermédiaire de la *TOD* a déjà fait l'objet de plusieurs travaux, notamment ceux de (Prochazka et al., 1998) à propos de l'analyse des signaux d'un électroencéphalogramme et ceux de (Carré et al., 2001) concernant la caractérisation de signaux radioélectriques. Dans ces travaux, la *TOD* est utilisée dans le but de détecter des changements abrupts au niveau de la forme du signal.

En règle générale, pour analyser les variations d'un signal en appliquant la technique de la *TOD*, il faut d'abord choisir une fonction « ondelette mère » qui est une fonction de fenêtrage temporel se déplaçant le long du signal pour l'analyser. Ensuite, il est nécessaire de définir le nombre de niveaux de décomposition du signal et de spécifier parmi ces niveaux lesquels seront exploités lors de l'analyse.

5.3.1.2. La méthode de segmentation

Dans notre méthode, la fonction de fenêtrage choisie est une fonction dite « ondelette de Daubechies du second ordre » (Daubechies, 1990) que nous avons identifiée comme étant la plus adaptée pour détecter les changements de variation qui entraîneront la segmentation des signaux.

Nous avons opté pour une décomposition à deux niveaux (quel que soit le facteur microclimatique étudié). En outre, nous nous focaliserons, pour segmenter le signal, sur les coefficients du second niveau de décomposition. Ces coefficients proviennent, en effet, de détections de variations du signal par des fenêtres d'analyse de largeur équivalente à 4

secondes²⁴. Nous avons estimé cette largeur de fenêtre d'analyse adéquate pour détecter les changements de sens de variation qui façonnent la forme générale du signal.

Enfin, nous retiendrons uniquement les coefficients qui dépasseront un seuil de sélection donné. Ce seuil de sélection, fixé empiriquement, est proportionnel aux amplitudes du signal²⁵. Il est censé permettre de sélectionner avec plus de précision les coefficients qui détermineront les positions du signal au niveau desquels on appliquera la segmentation.

Notons que la segmentation d'un signal entraîne, de fait, la segmentation (d'un point de vue géométrique) du parcours auquel ce signal est associé. Autrement dit, à chaque point de segmentation au niveau du signal correspond un point de segmentation au niveau du parcours.

Il est possible, grâce au module graphique de notre outil d'analyse, de visualiser les portions de parcours obtenues suite à la segmentation des signaux correspondant. A titre d'exemple, la Figure 27 présente un signal relatif à la variable microclimatique « vitesse de l'air » et pour lequel nous avons appliqué une *TOD* à deux niveaux de décomposition. Des coefficients du deuxième niveau de décomposition sont sélectionnés pour déterminer les points de segmentation du signal et aboutir ainsi à l'obtention d'un signal découpé en portions. Le résultat de la segmentation du signal restitué au niveau de la représentation du parcours dans l'environnement urbain 3D est présenté dans la partie gauche de la Figure 28. La première portion du parcours est une portion traversant une zone de valeurs relativement élevées. La seconde portion est une portion (de transition) caractérisée par un signal décroissant passant d'une zone de valeurs relativement élevées à une zone de valeurs relativement faibles. Les troisième et quatrième portions traversent une zone de valeurs de la vitesse du vent caractérisées par leurs faibles amplitudes.

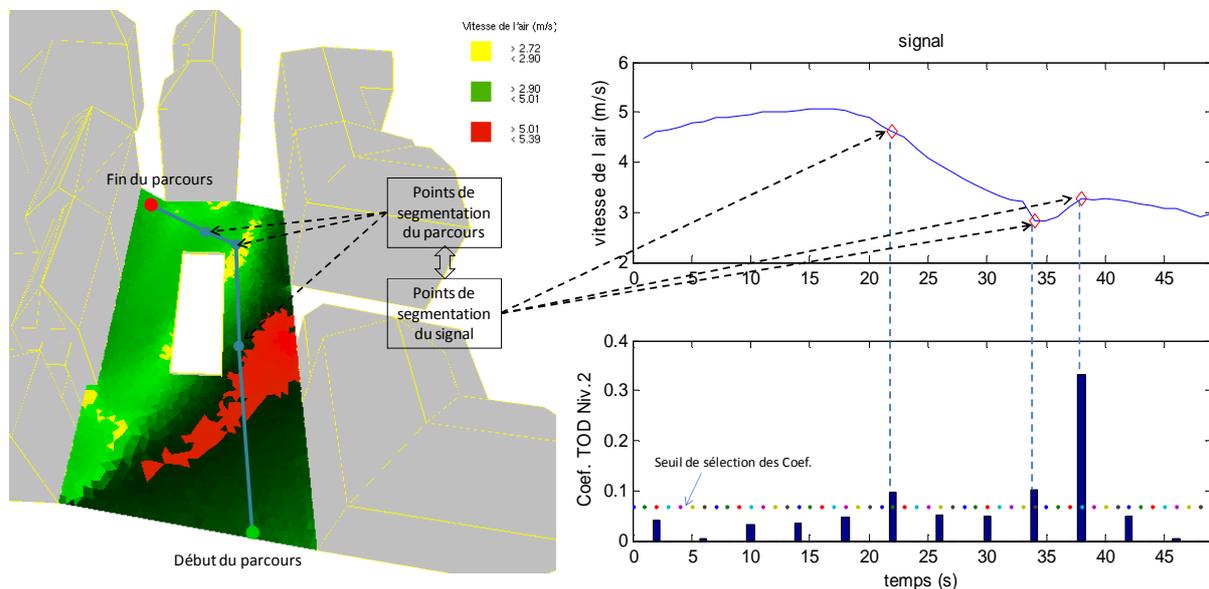


Figure 27. Segmentation d'un signal et segmentation du parcours correspondant

²⁴ La largeur de la fenêtre d'analyse, relative au $n^{\text{ième}}$ niveau de décomposition de la *TOD*, est déterminée par la formule $largeur_fen\hat{e}tre = 2^n$

²⁵ Le seuil de sélection des coefficients du deuxième niveau de la *TOD* est fixé empiriquement à environ 2% de la moyenne des valeurs des signaux relatifs à une variable microclimatique donnée.

Notons que la segmentation des parcours est menée relativement aux signaux d'une seule variable microclimatique. Pour des signaux relatifs à une autre variable, la méthode de segmentation pourrait produire des résultats sensiblement différents.

5.3.2. Les indicateurs caractéristiques du signal

Afin de caractériser quantitativement les signaux microclimatiques segmentés au moyen de la méthode de segmentation décrite précédemment, nous avons recours à des indicateurs numériques évaluant au niveau des portions du signal : (1) le sens de variation, (2) l'intensité moyenne et (3) la fréquence de dépassement d'une valeur seuil.

5.3.2.1. L'indicateur « sens de variation » (SV)

L'indicateur $SV(p)$ relatif au sens de variation d'une portion du signal p est tout simplement la pente de la droite de régression représentant l'ajustement d'une loi linéaire ($y = ax + b$), sur les points composant la portion de signal au sens des moindres carrés.

La Figure 28 présente un exemple de calcul de SV pour chaque portion d'un signal segmenté. Les droites de régression ayant permis d'évaluer SV sont, elles aussi, visibles sur la même figure.

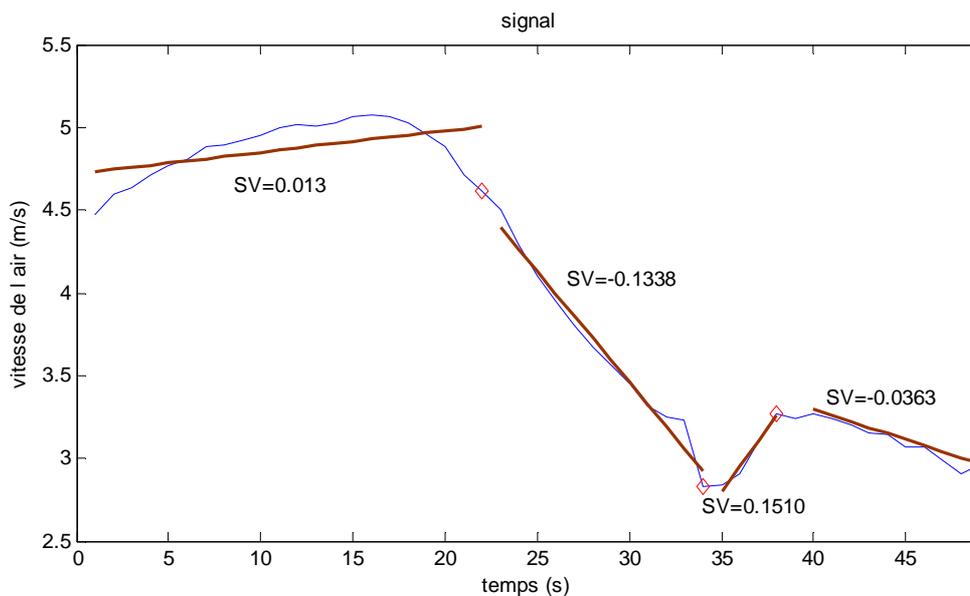


Figure 28. Calcul de l'indicateur « sens de variation » (SV) pour chaque portion du signal

5.3.2.2. L'indicateur « intensité moyenne » (I_{moy})

L'indicateur $I_{moy}(p)$ est donné par le rapport entre la somme de toutes valeurs (v_i) d'une portion de signal p , et le nombre total des points (échantillons) de cette même portion de signal (N_e).

$$I_{moy}(p) = \frac{\sum v_i}{N_e}$$

La Figure 29 illustre un exemple de calcul de I_{moy} pour chaque portion du signal relatif à la variable « vitesse de l'air ».

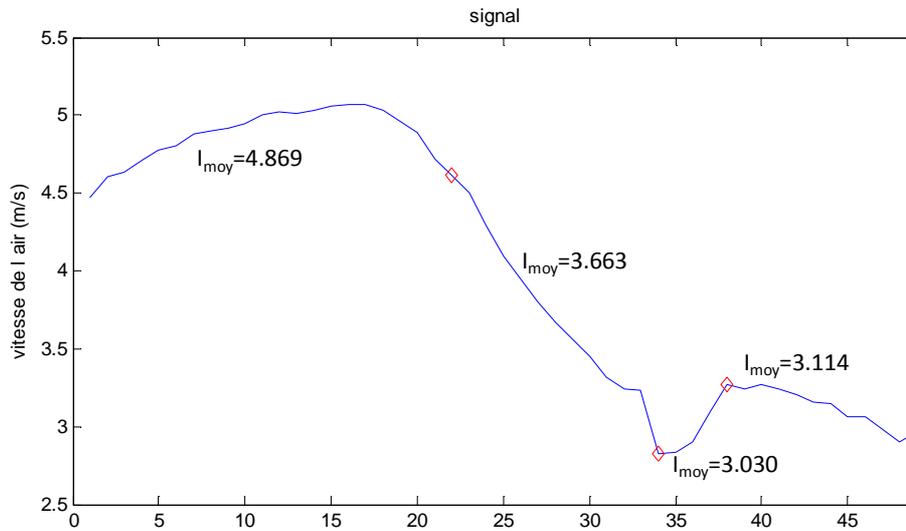


Figure 29. Calcul de l'indicateur Intensité Moyenne (I_{moy}) pour chaque portion d'un signal représentant la variable « vitesse de l'air »

5.3.2.3. L'indicateur « fréquence de dépassement » ($Freq_dep$)

$Freq_dep_{seuil\pm}(p)$ indique la proportion des points, parmi l'ensemble des points d'une portion de signal p , situées au-dessus (ou en-dessous²⁶) d'une valeur seuil donnée. Cet indicateur est donné par le rapport entre le nombre N_{seuil} des points de p dépassant le seuil et le nombre total de points N_e de p .

$$Freq_dep_{seuil\pm}(p) = \frac{N_{seuil}}{N_e} \in [0,1]$$

Plus la valeur de $Freq_dep$ est proche de 1, plus la portion de signal aura dépassé une valeur seuil donnée. Inversement plus elle est proche de 0, plus la portion de signal sera, dans sa globalité, au dessous de la valeur seuil.

Dans la Figure 30 nous présentons un exemple de calcul de $Freq_dep$ pour des portions d'un signal représentant l'évolution le long d'un parcours de la vitesse de l'air. Cet indicateur est très utile pour évaluer les conditions de confort liées à une variable microclimatique. La figure propose, par exemple, une manière d'utiliser l'indicateur $Freq_dep$ pour évaluer les conditions de confort aéraulique en termes de fréquence de dépassement d'un seuil de confort.

La valeur seuil à partir de laquelle on considérera que le piéton est susceptible de ressentir une gêne due aux conditions aérauliques est fixée à 5 m/s pour une fréquence de

²⁶ Lorsqu'on voudra évaluer la proportion des points du signal situés au dessus d'un certain seuil, le signe + apparaîtra devant la valeur du seuil dans l'expression de $Freq_dep$. Dans le cas inverse c'est le signe - qui apparaîtra.

dépassement de 20%, et ce, en rapport avec ce que proposent plusieurs modèles de confort aéralique (cf. § 3.2.2).

L'indicateur *Freq_dep* pourrait aussi être utilisé pour estimer la fréquence de dépassement de valeurs seuils liés à des prédictors de confort tels que *PMV* et *ASV* (cf. § 3.3.2).

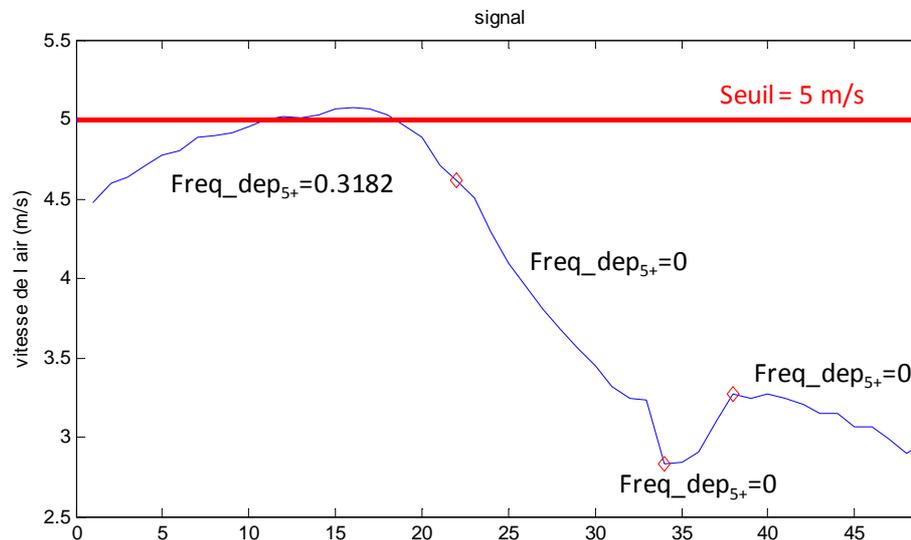


Figure 30. Calcul de l'indicateur $Freq_dep_{5+}$ pour des portions d'un signal représentant la variable « vitesse de l'air »

5.3.3. Classification des parcours

En vue d'étudier l'influence des facteurs microclimatiques sur la mobilité des piétons, il nous a semblé intéressant d'analyser les similitudes, du point de vue des caractéristiques microclimatiques, entre les différentes portions de parcours obtenues suite à la segmentation de leurs signaux microclimatiques.

A ce titre, nous présentons une méthode de classification automatique des portions de parcours dont le but est de constituer des classes contenant des portions jugées proches du point de vue des valeurs des indicateurs caractéristiques qui leur sont associés. Nous proposons, dans une seconde phase, de qualifier (interpréter) les classes obtenues sur la base des propriétés des éléments qu'elles regroupent. A l'instar des techniques de segmentation et de calcul d'indicateurs, la méthode de classification est implémentée au niveau de la composante analytique de notre outil d'analyse.

La taille des classes (en termes de nombre de portions de parcours qu'elles regroupent) ainsi que leurs propriétés microclimatiques sont les éléments que nous serons amenés à analyser lors de la phase de mise en correspondance entre les données microclimatiques et les données comportementales.

5.3.3.1. La classification microclimatique des parcours

L'analyse des données par l'intermédiaire de leur classification est une technique d'analyse statistique. La classification est généralement utilisée pour regrouper sur la base de

leur similarité des objets, des personnes, des concepts ou des stimuli dans différentes classes de façon à maximiser les différences inter-classe et minimiser l'hétérogénéité interne des classes qui doivent constituer des groupes les plus homogènes possible (Vachon et al., 2005). Ces techniques de classification sont particulièrement utiles dans le cadre d'investigations exploratoires afin de dégager des tendances générales au sein des données et de suggérer des pistes d'analyses futures (Kos & Psenicka, 2000).

Parmi les techniques de classification existantes, nous nous intéressons à une technique très utilisée, à savoir, la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) (Jardine & Sibson, 1968). Nous avons recours à cette technique afin de regrouper les parcours, représentés par leurs signaux microclimatiques, en différentes classes. Les parcours qui appartiendraient à une même classe seront considérés comme proches du point de vue des propriétés des signaux microclimatiques qui leur sont associés. Cette méthode est présentée en détail dans Zekri et al. (2008).

Notons que l'approche de classification que nous proposons de mettre en œuvre concernera une seule variable microclimatique à la fois. Nous avons, en effet, estimé que les résultats qui seraient obtenus suite à une classification relative à plusieurs variables, seraient difficilement interprétables.

5.3.3.1.1. La technique de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) est une technique de classification dite « non supervisée » (appelée aussi regroupement ou *clustering*). Elle est dite « non supervisée » à cause de l'absence de « superviseur » qui indiquerait à quelle classe appartiendrait un élément à classer. En fait, la classification est effectuée sans connaissances a priori ni sur le nombre ni sur les propriétés inhérentes aux classes.

La non connaissance *a priori* des classes constitue, à la fois, un avantage et une limite de la méthode de classification automatique. C'est un avantage car cette possibilité procure une souplesse d'utilisation et permet, dans certains cas, l'émergence de classes dites latentes (ou cachées) auxquelles on n'aurait pas pensé avant d'appliquer la méthode de classification. Il en résulte de cela une forte cohérence de la classification par rapport à la répartition des données. Mais il s'agit aussi d'une limite dans la mesure où cette méthode nécessite de définir un critère permettant de fixer le nombre de classes souhaitées. D'autre part, les résultats de la classification non supervisée font appel à une interprétation *a posteriori* du partitionnement afin de qualifier les classes.

La CAH nécessite, dans le cas où les variables ne sont pas évaluées à la même échelle, de standardiser les données en phase de pré-classification. Nous avons recours dans notre approche à une opération de centrage-réduction des variables. Cette opération consiste à rendre les variables indépendantes d'une quelconque unité ou échelle de valeurs. Des variables centrées-réduites ont la même moyenne et la même dispersion.

Les étapes de la classification CAH sont données par l'algorithme suivant (voir Figure 31).

Initialisation : les classes initiales sont des singletons (classes ne contenant qu'un seul élément). Calculer la matrice de leurs distances deux à deux.

Itérer les deux étapes suivantes **jusqu'à** l'agrégation de tous les éléments en une seule classe

- 1) Regrouper les deux éléments (classes) sur la base d'une méthode d'agrégation choisie à l'avance
- 2) Mettre à jour la matrice des distances en remplaçant les deux classes regroupées par une nouvelle classe et en calculant sa distance avec chacune des autres classes

Figure 31. *Algorithme de la CAH*

D'une manière générale, la méthode *CAH* nécessite de définir une méthode d'agrégation. Dans notre cas, nous avons choisi d'appliquer la méthode d'agrégation de Ward qui consiste à réunir les deux clusters dont le regroupement fera le moins baisser l'inertie²⁷ interclasse. Cette méthode suppose aussi l'existence d'une métrique permettant d'évaluer le degré auquel les entités sont considérées comme étant similaires. Dans le contexte de notre étude, nous avons opté pour la distance euclidienne²⁸.

La *CAH* nécessite aussi de choisir un nombre optimal de classes. Ce choix est crucial dans les problématiques de classification. Il n'existe pas en réalité d'indice unique permettant de déterminer le nombre optimal de classes. Un des critères pouvant être utilisé est le critère de pertinence et de signification des classes en termes de composition et de propriétés des éléments regroupés. Pour notre part, nous opterons pour un critère quantitatif qui consiste à sélectionner le nombre de classes tel qu'il a été obtenu juste avant une agrégation ayant eu lieu sur la base d'une distance de regroupement « abruptement » plus faible que les distances de regroupement précédentes.

L'application de la méthode *CAH* produit une structure arborescente décrivant toutes les étapes de fusions de clusters. Cette structure s'appelle le dendogramme (voir Figure 33).

5.3.3.1.2. *Un exemple de classification*

Nous présentons dans ce paragraphe un exemple d'une classification appliquée à un échantillon composé de dix-sept parcours fictifs sélectionnés, au niveau d'un modèle géométrique 3D représentant un espace urbain (Square Fleuriot, Nantes) (voir Figure 32). Nous proposons une classification menée par rapport à la variable « vitesse de l'air » dont la répartition spatiale des valeurs est visualisable au niveau du plan horizontal du piéton sur la Figure 32.

Les signaux relatifs à la variable « vitesse de l'air » sont construits selon la méthode de construction des stimuli microclimatiques présentée précédemment (cf. § 5.2.2). Pour des raisons de simplicité, nous supposons que la vitesse moyenne de déplacement relative à tous

²⁷ L'inertie interclasse est la moyenne pondérée des carrés des distances des centres de gravités des classes au centre de gravité de l'ensemble des éléments à classer.

²⁸ La distance euclidienne représente la distance géographique la plus courte entre deux points dans un espace multidimensionnel

les parcours est de 1 m/s . Ce choix implique une discrétisation homogène de tous les parcours en blocs rectangulaires de longueur équivalente à 1 m , ce qui simplifie les calculs.

Les parcours sont, d'abord, segmentés en portions de parcours obtenues au moyen de l'application de la procédure de segmentation des signaux microclimatiques basée sur la *TOD* (cf. § 5.3.1.1). Suite à la segmentation nous obtenons quarante-et-une portions de parcours. Les points de segmentations obtenus sont visibles sur la Figure 32.

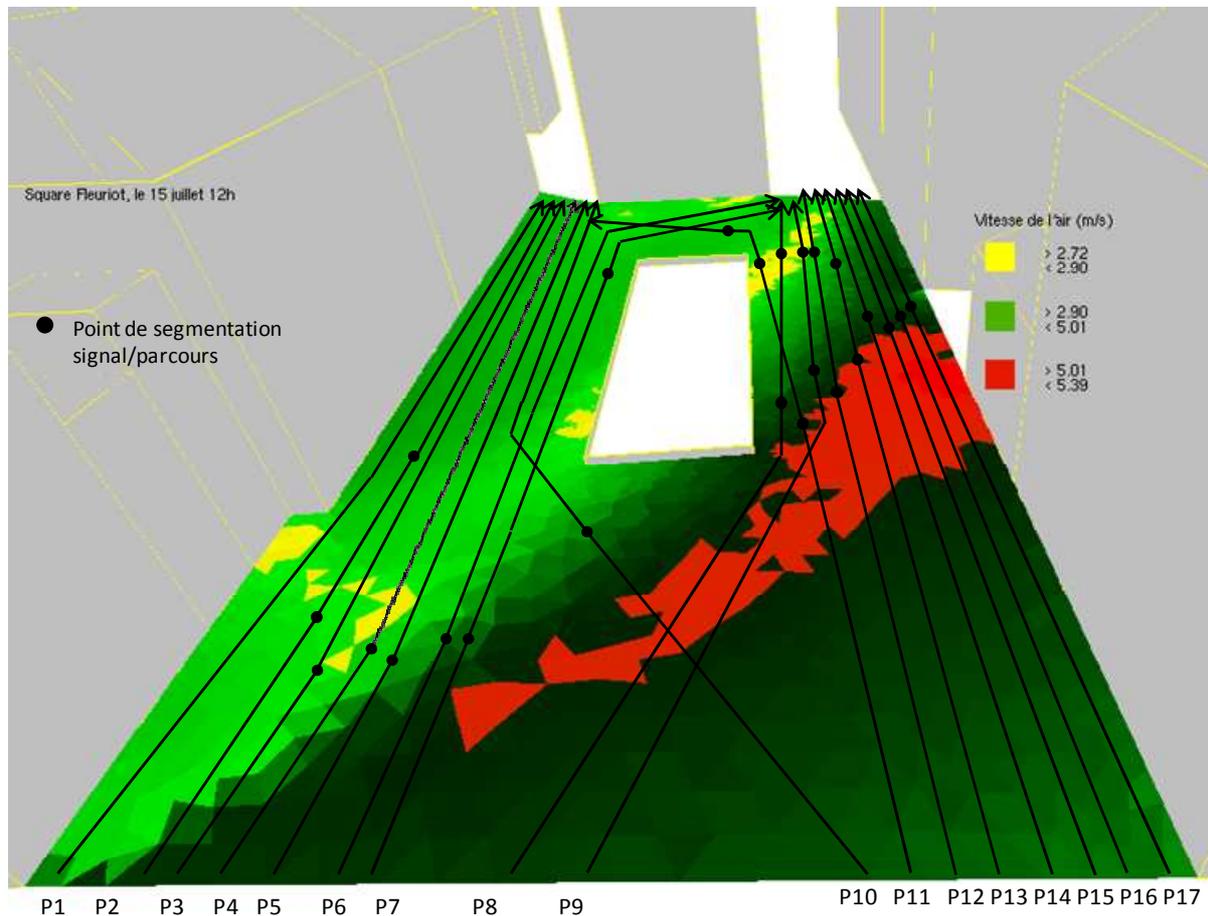


Figure 32. Ensemble des portions de parcours à classifier relativement à la variable « vitesse de l'air » - Environnement urbain 3D représentant le « Square Fleuriot à Nantes »

A cause du fait que les points de segmentation soient détectés par la *TOD* lors des changements -identifiés comme importants- du sens de variation des signaux physiques, nous constatons que ces points de segmentation se situent, pour la plupart, au niveau des frontières entre les zones de valeurs de la vitesse de l'air (voir Figure 32).

C'est, en effet, à ce genre de résultat que nous souhaitons parvenir en optant pour une analyse du sens de variation des signaux représentant les parcours, l'idée étant de « détecter » à quel niveau le signal subit un changement pouvant être significatif du point de vue de la perception du piéton.

Nous procédons, ensuite, au calcul, pour chaque portion P_i-j ($j^{\text{ème}}$ portion du $i^{\text{ème}}$ parcours), des indicateurs quantitatifs de l'intensité moyenne de la vitesse de l'air (I_{moy}) et de

la fréquence de dépassement du seuil de vitesse de l'air 5 m/s ($Freq_dep_{5+}$) et du sens de variation SV des portions de signal (Tableau 10).

Enfin, notons qu'une opération de normalisation (centrage-réduction) des variables est effectuée pour remédier au fait que les trois indicateurs ne soient pas évalués à la même échelle.

$Pi-j$	I_{moy}	$Freq_dep_{5+}$	SV	Centrage- réduction →	$Pi-j$	I_{moy}	$Freq_dep_{5+}$	SV
P1-1	3,479	0,000	0,011			P1-1	-0,632	-0,544	0,596
P2-1	3,062	0,000	-0,029		P2-1	-1,243	-0,544	0,189
P2-2	3,413	0,000	0,068		P2-2	-0,729	-0,544	1,175
P2-3	3,536	0,000	-0,009		P2-3	-0,549	-0,544	0,393
P3-1	3,496	0,000	-0,338		P3-1	-0,607	-0,544	-2,948
P3-2	3,418	0,000	0,008		P3-2	-0,722	-0,544	0,565
P4-1	3,438	0,000	-0,198		P4-1	-0,692	-0,544	-1,527
P4-2	3,441	0,000	0,001		P4-2	-0,688	-0,544	0,494
P5-1	3,718	0,000	-0,248		P5-1	-0,282	-0,544	-2,034
P5-2	3,378	0,000	0,000		P5-2	-0,780	-0,544	0,484
P6-1	4,371	0,000	-0,332		P6-1	0,674	-0,544	-2,887
P6-2	3,265	0,000	-0,001		P6-2	-0,946	-0,544	0,474
P7-1	4,423	0,000	-0,284		P7-1	0,750	-0,544	-2,400
P7-2	3,294	0,000	0,008		P7-2	-0,903	-0,544	0,565
P7-3	3,231	0,000	0,008		P7-3	-0,995	-0,544	0,565
P8-1	4,915	0,273	-0,012		P8-1	1,470	1,195	0,362
P8-2	3,388	0,000	-0,098		P8-2	-0,766	-0,544	-0,511
P8-3	3,266	0,000	0,070		P8-3	-0,944	-0,544	1,195
P9-1	4,965	0,364	-0,003		P9-1	1,543	1,775	0,454
P9-2	3,824	0,000	-0,090		P9-2	-0,127	-0,544	-0,430
P9-3	3,029	0,000	-0,009		P9-3	-1,291	-0,544	0,393
P10-1	4,360	0,167	-0,115		P10-1	0,658	0,520	-0,684
P10-2	3,296	0,000	0,003		P10-2	-0,900	-0,544	0,514
P11-1	4,930	0,389	0,008		P11-1	1,492	1,934	0,565
P11-2	3,458	0,000	-0,117		P11-2	-0,663	-0,544	-0,704
P11-3	3,222	0,000	0,004		P11-3	-1,009	-0,544	0,525
P11-4	3,006	0,000	0,006		P11-4	-1,325	-0,544	0,545
P12-1	4,833	0,346	-0,012		P12-1	1,350	1,660	0,362
P12-2	3,630	0,000	-0,077		P12-2	-0,411	-0,544	-0,298
P12-3	3,127	0,000	-0,033		P12-3	-1,148	-0,544	0,149
P13-1	4,915	0,409	0,016		P13-1	1,470	2,062	0,646
P13-2	4,199	0,000	-0,063		P13-2	0,422	-0,544	-0,156
P13-3	3,715	0,000	-0,035		P13-3	-0,287	-0,544	0,129
P14-1	4,909	0,385	0,017		P14-1	1,461	1,909	0,657
P14-2	4,216	0,000	-0,032		P14-2	0,447	-0,544	0,159
P15-1	4,916	0,423	0,024		P15-1	1,472	2,151	0,728
P15-2	4,439	0,000	-0,039		P15-2	0,773	-0,544	0,088
P16-1	4,911	0,423	0,030		P16-1	1,464	2,151	0,789
P16-2	4,620	0,000	-0,028		P16-2	1,038	-0,544	0,200

P17-1	4,868	0,324	0,007
P17-2	4,427	0,000	-0,041

P17-1	1,401	1,520	0,555
P17-2	0,756	-0,544	0,068

Tableau 10. *Calcul des indicateurs caractéristiques quantitatifs (tableau à gauche) et leur normalisation par centrage-réduction (tableau à droite)*

La procédure de regroupement des clusters, selon l'algorithme *CAH*, est illustrée par le dendrogramme présenté dans la Figure 33. Un nombre de clusters jugé optimal correspondant à la droite horizontale (coupure) sur le dendrogramme. Cette coupure est dressée juste avant un regroupement de clusters basé sur une distance de regroupement brusquement plus faible que la distance de regroupement des précédents clusters.

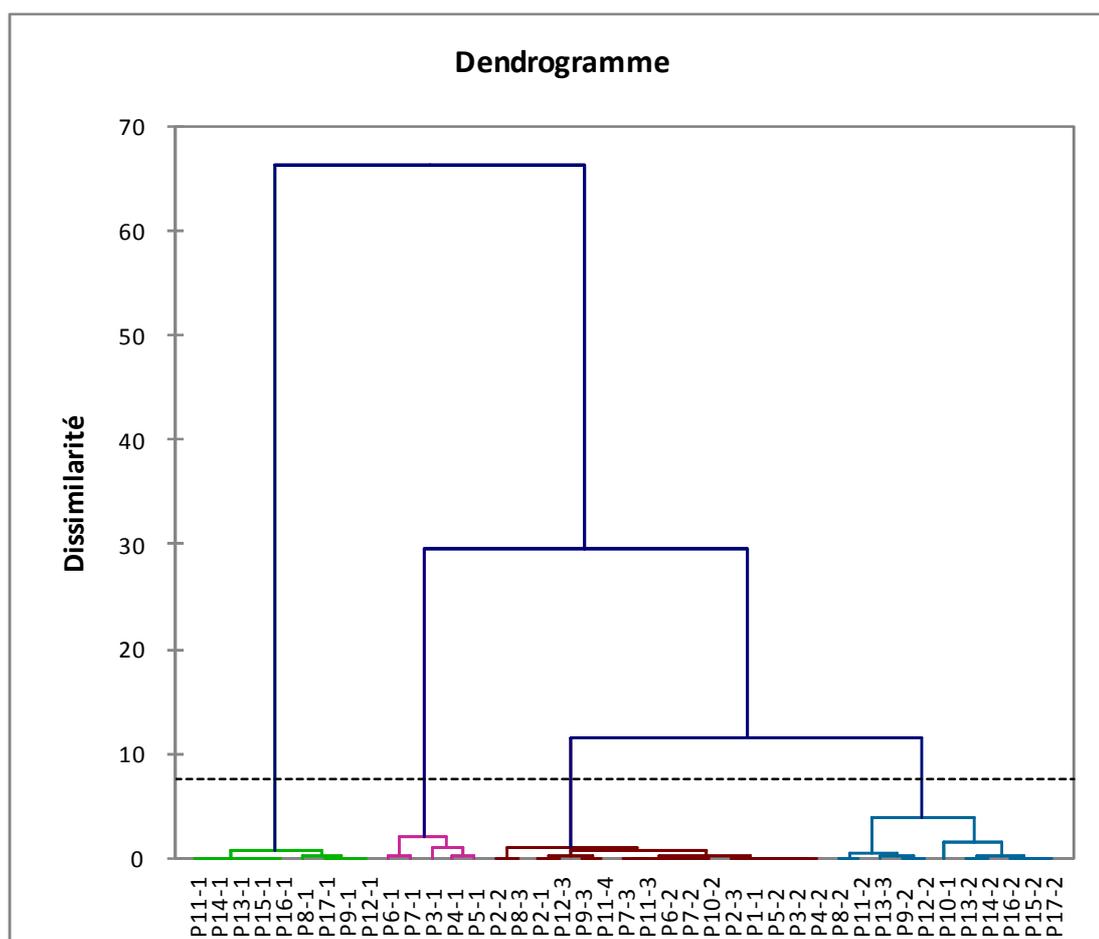


Figure 33. *Dendrogramme de la CAH (XLSTAT®)*

La classification *CAH* des dix-sept parcours aboutit à l'obtention de quatre classes. La composition de chaque classe est donnée par le Tableau 11.

Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
P1-1	P3-1	P8-1	P8-2
P2-1	P4-1	P9-1	P9-2
P2-2	P5-1	P11-1	P10-1
P2-3	P6-1	P12-1	P11-2
P3-2	P7-1	P13-1	P12-2
P4-2		P14-1	P13-2
P5-2		P15-1	P13-3
P6-2		P16-1	P14-2
P7-2		P17-1	P15-2
P7-3			P16-2
P8-3			P17-2
P9-3			
P10-2			
P11-3			
P11-4			
P12-3			

Tableau 11. Description de la composition des classes

Une fois les éléments constitutifs des classes identifiés, il est nécessaire, en vue d'interpréter les résultats de la classification, de spécifier des représentants de classes. Nous avons opté pour l'élément central (médian) comme représentant de la classe, celui-ci est en effet moins sensible qu'un élément moyen (au sens géométrique) aux éléments extrêmes dans les classes. Le Tableau 12 contient les valeurs associées à chaque élément central d'une classe.

Classe (élément central)	I_{mov}	$Freq_{dep_{5+}}$	SV
1 (P7-2)	3,294	0,000	0,008
2 (P5-1)	3,718	0,000	-0,248
3 (P14-1)	4,909	0,385	0,017
4 (P13-2)	4,199	0,000	-0,063

Tableau 12. Les éléments centraux représentant les classes

Les résultats de la classification peuvent être visualisés dans le contexte « urbain » par l'intermédiaire du module graphique de l'outil d'analyse des parcours (Figure 34).

Ce que nous remarquons de prime abord c'est que la répartition spatiale des classes est fortement liée à la répartition spatiale des zones microclimatiques (dans ce cas, les zones liées à la répartition spatiale de la « vitesse de l'air »). Plus précisément, nous constatons qu'à chaque zone microclimatique correspond une classe de portions de parcours : les portions de parcours de la *Classe 1* sont essentiellement situées sur une zone de valeurs de la vitesse de l'air relativement faibles. Les portions de la *Classe 3* se trouvent plutôt dans une zone à valeurs relativement élevées dépassant dans certains endroits le seuil de confort alors que les

portions des *classes 2 et 4* se trouvent, elles, dans des zones intermédiaires (Figure 34). Cette constatation conforte notre choix quant à la pertinence des indicateurs quantitatifs utilisés, qui semblent caractériser efficacement la qualité des stimuli microclimatiques le long de parcours.

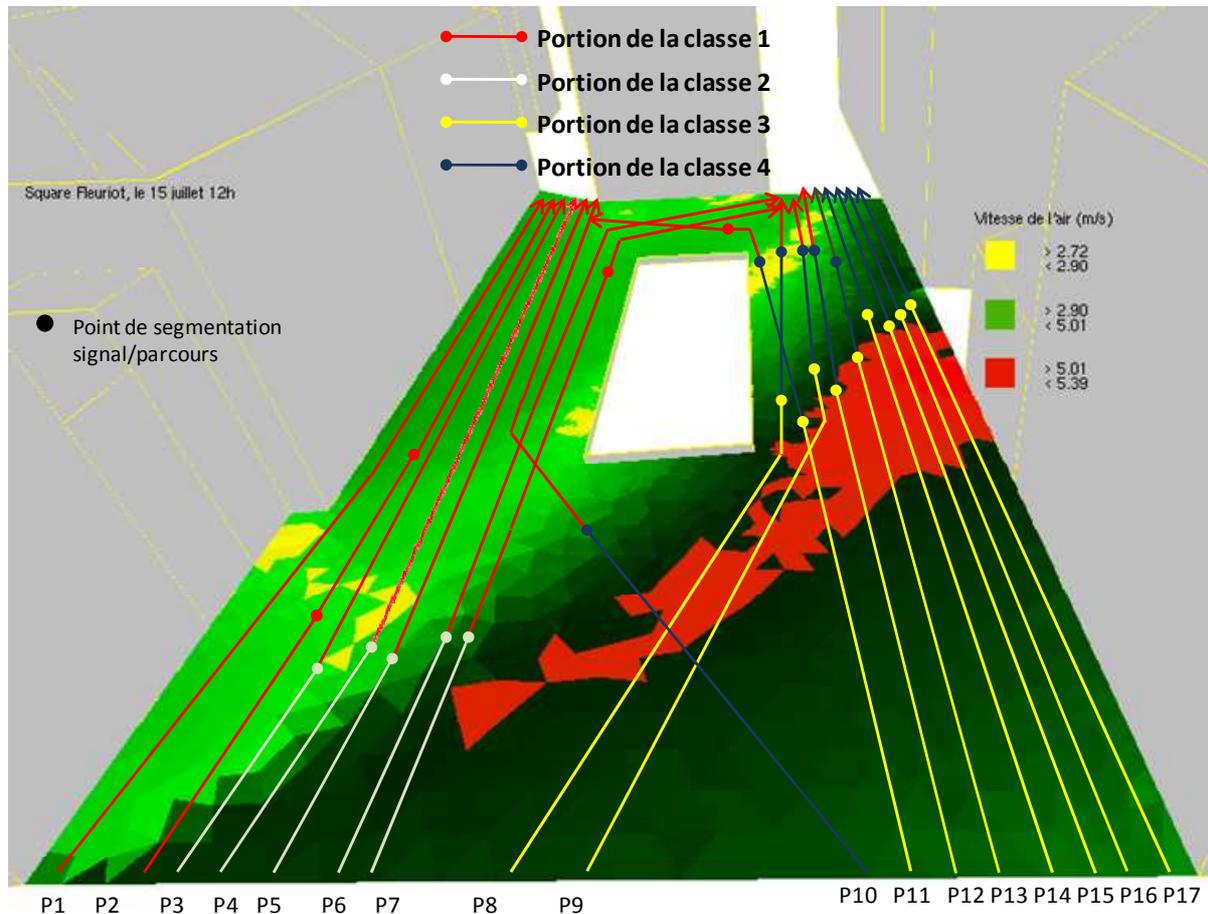


Figure 34. Visualisation du résultat de la classification (CAH) des parcours relativement à la variable « vitesse de l'air »

D'autre part, nous estimons que ces premiers résultats confirment le fait qu'une méthode d'analyse dynamique des données microclimatiques telle que celle que nous essayons de mettre en œuvre, pourrait constituer une alternative intéressante aux méthodes d'analyse statique des phénomènes microclimatiques²⁹. Nous serions même tentés de dire qu'elle est plus adaptée que les méthodes statiques dans des études où le centre d'intérêt est le piéton et ses déplacements. Dans notre méthode, par exemple, nous avons intégré, lors de la phase de caractérisation, des aspects dynamiques tels que le sens de variation des signaux microclimatique le long de parcours. Ce dernier paramètre pourrait être intéressant à analyser dans une étude portant sur l'analyse spatiale des facteurs microclimatiques.

Notons, cependant, que quelques incohérences peuvent avoir lieu lors de la classification. A titre d'exemple, la portion P10-1, correspondant à la première portion du dixième parcours, aurait logiquement dû faire partie de la *Classe 3* or elle a été identifiée comme appartenant à la *Classe 4*.

²⁹ Ce point a été évoqué dans ce rapport lors de la présentation des méthodes d'analyse des facteurs physiques des ambiances (cf. §1.4.1.4)

Cette incohérence, due à une erreur de segmentation du signal (changement de sens de variation non détecté), met en évidence la forte dépendance de cette méthode d'analyse aux types des techniques choisies pour la discrétisation du parcours, la segmentation du signal, la classification...

Plus précisément, les résultats fournis par la méthode que nous proposons sont très sensibles aux paramètres de réglage tels que la taille des blocs rectangulaires, le niveau de la *TOD*, le seuil de sélection des coefficients, le critère de choix du nombre optimal de classes... Ces paramètres nécessitent d'être fixés préalablement aux traitements et doivent donc être choisis avec précaution. Par ailleurs il est nécessaire d'effectuer une multitude de tests afin d'identifier quels paramètres produisent les résultats les plus cohérents.

5.3.3.2. Qualification des classes

Le résultat de la méthode de classification décrite précédemment est un partitionnement des portions de parcours en fonction de leurs caractéristiques microclimatiques quantitatives. Le partitionnement obtenu est formé de classes « anonymes » (dans le sens qu'elles sont dépourvues de qualificatifs, d'étiquettes) représentées par leurs éléments médians.

L'idée à ce stade, est de qualifier les classes en leur attribuant des qualificatifs permettant de mieux cerner leur qualité microclimatique. Il importe donc de vérifier la cohérence et la compréhensibilité des qualificatifs attribués afin de pouvoir les exploiter à bon escient lors de la mise en correspondance entre données microclimatiques et données comportementales. La qualification des classes est la dernière étape du processus de classification.

Dans notre approche, qualifier les classes revient à qualifier les éléments médians qui les représentent. Pour ce faire, nous proposons, dans une première étape, de coder les intervalles de valeurs des indicateurs caractéristiques quantitatifs. Des attributs linguistiques tels que « faible », « modéré », « élevé », etc., sont associés à ces intervalles.

Dans le contexte de notre étude, nous procédons à une qualification « adaptative » des classes. La correspondance entre les attributs linguistiques et les intervalles de valeurs des indicateurs caractéristiques dépendra, en fait, du type de la variable (vent, confort thermique...) relativement à laquelle nous effectuerons la classification. Autrement dit, à chaque variable correspondra un modèle de codage des intervalles.

A titre d'exemple, prenons le cas de l'indicateur caractéristique I_{moy} . La correspondance entre les attributs linguistiques (faible, modéré, élevé) et les intervalles de valeurs de I_{moy} sera différente si la variable étudiée est la vitesse de l'air ou un indicateur de confort. En effet, ces deux variables sont évaluées par deux échelles différentes. Nous devons donc définir un modèle de codage de valeurs par indicateur caractéristique et par variable.

Les tableaux suivants illustrent, relativement à la variable «vitesse de l'air» et à l'indicateur de confort *PMV*, des exemples de modèles de codage (marquage) des intervalles de valeurs des indicateurs I_{moy} (Tableau 13 et Tableau 16), $Freq_dep_{5+}$ (Tableau 14 et Tableau 17) et *SV* (Tableau 15 et Tableau 18).

Notons que l'indicateur $Freq_dep_{5+}$ est calculé, pour la vitesse du vent, en fonction d'une valeur seuil de 5 m/s. En effet, c'est à partir de cette valeur que le piéton est supposé

commencer à ressentir une gêne « mécanique » due au vent. Lorsque la fréquence de dépassement de ce seuil sera supérieure à 20%, on considérera qu'elle est élevée.

Concernant le *PMV*, on calculera un indicateur $Freq_dep_{1+}$ traduisant la proportion des points du signal dépassant la valeur « 1 ». Il s'agit en fait de la valeur à partir de laquelle le *PMV* indique que l'homme est susceptible de ressentir un début de gêne dû à la chaleur.

Intervalles de $I_{moy}(V_a)$ (ms^{-1})	[0 ; 1]	]1 ; 4]	]4 ; $+\infty$ [
Attributs linguistiques	Faible (1)	Modérée (2)	Élevée (3)

Tableau 13. *Qualification des intervalles de valeurs de $I_{moy}(V_a)$*

Intervalles de $Freq_dep_{5+}(V_a)$	[0 ; 0,05]	]0,05 ; 0,2]	]0,2 ; 1]
Attributs linguistiques	Faible (1)	Modérée (2)	Élevée (3)

Tableau 14. *Qualification des intervalles de valeurs de $Freq_dep_{5+}(V_a)$*

Intervalles de $SV(V_a)$	$]-\infty ; -0,05]$	$] -0,05 ; +0,05[$	$] +0,05 ; +\infty[$
Attributs linguistiques	Décroissant (1)	Constant (2)	Croissant (3)

Tableau 15. *Qualification des intervalles de valeurs de $SV(V_a)$*

Intervalles de $I_{moy}(PMV)$	[-3,5 ; -2,5]	]-2,5 ; -1,5]	]-1,5 ; -0,5]	]-0,5 ; 0,5]	]0,5 ; 1,5]	]1,5 ; 2,5]	]2,5 ; 3,5]
Attributs linguistiques	Très froid (1)	Froid (2)	Légèrement froid (3)	Neutre (4) (équilibre énergétique)	Légèrement chaud (5)	Chaud (6)	Très chaud (7)

Tableau 16. *Qualification des intervalles de valeurs de $I_{moy}(PMV)$*

Intervalles de $Freq_dep_{1+}(PMV)$	[0 ; 0,05]	]0,05 ; 0,2]	]0,2 ; 1]
Attributs linguistiques	Faible (1)	Modérée (2)	Élevée (3)

Tableau 17. *Qualification des intervalles de valeurs de $Freq_dep_{1+}(PMV)$*

Intervalles de SV (V_a)	$]-\infty ; -0,05]$	$]-0,05 ; +0,05[$	$[+0,05 ; +\infty[$
Attributs linguistiques	Décroissant (1)	Constant (2)	Croissant (3)

Tableau 18. *Qualification des intervalles de valeurs de SV(PMV)*

Ainsi, à toute classe représentée par son élément médian, on peut attribuer un qualificatif, combinaison de trois attributs linguistiques (un attribut par indicateur caractéristique).

Si nous reprenons l'exemple de classification précédent (cf. § 5.3.3.1.2), l'application de la méthode de qualification aux classes obtenues permet d'attribuer un qualificatif à chaque classe en fonction du modèle de codage présenté par les tableaux précédents. Chaque classe est qualifiée par un code du type C_{ijk} , où i, j et k sont respectivement les numéros des intervalles de valeurs de I_{moy} , $Freq_dep_{5+}$ et SV (voir Tableau 19).

Classe (élément central)	I_{moy}	$Freq_dep_{5+}$	SV	Description de la classe	Qualificatif
1 (P7-2)	3,294	0,000	0,008	<ul style="list-style-type: none"> • Intensité moyenne modérée • Fréquence de dépassement faible • Signal constant 	C_{212}
2 (P5-1)	3,718	0,000	-0,248	<ul style="list-style-type: none"> • Intensité moyenne modérée • Fréquence de dépassement faible • Signal décroissant 	C_{211}
3 (P14-1)	4,909	0,385	0,017	<ul style="list-style-type: none"> • Intensité moyenne élevée • Fréquence de dépassement élevé • Signal constant 	C_{332}
4 (P13-2)	4,199	0,000	-0,063	<ul style="list-style-type: none"> • Intensité moyenne élevée • Fréquence de dépassement faible • Signal décroissant 	C_{311}

Tableau 19. *Exemple de qualification de classes relativement à la vitesse de l'air*

5.4. Synthèse intermédiaire

Nous avons consacré ce chapitre à la caractérisation quantitative et qualitative des parcours. Cette caractérisation est, en réalité, appliquée aux portions de parcours obtenues suite à la segmentation des parcours en fonction de la qualité de la variation des signaux microclimatiques correspondant. La technique de segmentation que nous proposons est basée sur la Transformée en Ondelettes Discrète (TOD).

La caractérisation quantitative consiste en une estimation d'indicateurs relatifs à l'intensité du signal microclimatique, à la fréquence de dépassement d'un seuil donnée et au sens de variation du signal. Quant à la caractérisation qualitative des portions de parcours, elle consiste en l'exploitation des caractéristiques quantitative pour identifier des classes contenant des portions de parcours proches (au sens d'une mesure de similarité). Pour classifier les portions de parcours nous faisons appel à une technique de classification non supervisée : la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH).

L'application de ces techniques sur un exemple synthétique a mis en évidence la pertinence de ces méthodes de caractérisation et leur capacité à rendre compte de la qualité microclimatique des parcours et des portions de parcours.

5.5. *Références bibliographiques*

Carré, P., Pousset, Y., R., V. & Fernandez-Maloigne, C. (2001). Segmentation de Signaux par Maxima d'Ondelettes : Application à la Prédiction de Zones de Couverture radioélectrique. *Traitement du Signal et des Images*. Vol 18. N° 3. pp. 195-211.

Chan, Y. T. (1995). *Wavelet Basics*. Boston : Kluwer Academic Publishers.

Daubechies, I. (1990). The Wavelet Transform, Time Frequency Localization and Signal Analysis. *IEEE Transactions on Information Theory*. Vol. 36. pp. 961-1005.

Jardine, N. & Sibson, R. (1968). The construction of hierarchic and non-hierarchic classifications. *The Computer Journal*. Vol 11. 177 p.

Kos, A.J. & Psenicka, C. (2000). Measuring similarity across methods. *Psychological reports*. Vol 86. pp. 858-862.

Prochazka, A., Kolinova, M. & Stribrsky, J. (1998). Signal Segmentation Using Time-scale Signal Analysis. *in : IX European Signal Processing Conference EUSIPCO-98*.

Vachon, M., Beaulieu-Prévost, D., Ouellette, A. & Achille, M. (2005). Analyse de classification hiérarchique et qualité de vie. *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology*. Vol 1. N°1. pp. 25-30.

Zekri, E., Hégron, G. & Legendre, A. (2008). Environmental Classification of Urban Pedestrian Walkways. H.J.P. Timmermans, B. de Vries (eds.), *Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*, ISBN 978-90-6814-173-3, University of Technology Eindhoven, published on CD <http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?ddss2008-14>.

Chapitre 6. Caractérisation comportementale des parcours

6.1. Introduction

Après avoir présenté la méthode de caractérisation microclimatique permettant de classer des portions de parcours du point de vue de leurs caractéristiques microclimatiques, nous décrivons dans ce chapitre une méthode permettant de caractériser les portions de parcours du point de vue des données comportementales observées *in situ*.

Notre but est d'être en mesure de connaître, au niveau de chaque classe de portions de parcours, aussi bien les propriétés microclimatiques que les propriétés comportementales caractérisant ces classes.

6.2. L'observation des parcours

Afin de recueillir les informations relatives aux parcours piétonniers, nous avons opté pour une approche d'observation naturaliste basée sur des enregistrements vidéo. Il s'agit donc d'une méthode de recueil d'information permettant une analyse « différée » des données qui, à l'inverse des méthodes d'observation « directes » (papier et stylo par exemple), évite les interprétations immédiates et permet une plus grande souplesse lors de l'analyse des données. En effet, on peut revenir sur la même séquence, et analyser successivement cette séquence pour en extraire différents type d'indicateurs qu'il serait difficile à un observateur de saisir simultanément.

Une session d'observation devra se dérouler sur une période relativement courte (environ deux heures) afin qu'il n'y ait pas de changements importants au niveau des phénomènes météorologiques, et de ce fait microclimatiques, entre le début et la fin de la session. En effet, les données microclimatiques sont simulées en fonction des conditions climatiques (variables d'initialisation du modèle de simulation) telles qu'elles auront été relevées lors du début de la session d'observation. On supposera donc, pour des raisons de simplification de notre méthode³⁰, que ces conditions demeurent similaires pendant toute la période pendant laquelle se déroule l'observation.

Par ailleurs, nous devons faire en sorte que l'espace urbain dans lequel se dérouleront les observations présente des caractéristiques d'emplacement et d'aménagement susceptibles de favoriser la pratique de la marche d'une façon générale, et d'une marche à caractère récréatif en particulier. En effet nous souhaitons nous placer dans des conditions où le piéton serait susceptible de rechercher à agrémenter son trajet notamment par rapport à son confort.

³⁰ La simulation des données microclimatiques varient en fonction de la complexité de la géométrie de l'environnement urbain, de la finesse du maillage et du nombre de variables à simuler. La durée d'un seul processus de simulation peut atteindre, dans notre cas, plusieurs dizaines d'heures.

D'autre part, la configuration de l'espace urbain devra présenter des zones microclimatiques diversifiées et nuancées. Notre but est, en effet, d'étudier des aspects liés à la mobilité des piétons en fonction des variations plus ou moins importantes des stimuli microclimatiques le long des parcours.

Notons aussi que l'ont s'intéressera uniquement aux piétons parcourant l'espace de façon solitaire. En effet, lors de parcours effectués à plusieurs personnes, d'autres facteurs, notamment, à caractère « social » peuvent influencer sur la prise de décision et la manière de se déplacer des piétons, ces derniers pourraient avoir tendance à imiter le comportement (en termes de choix de parcours ou d'arrêts par exemple) des personnes les accompagnant.

Les informations relatives aux comportements des piétons et extraites lors du visionnage des vidéos enregistrées, sont intégrées directement dans l'outil d'analyse de parcours présenté précédemment. Ces informations concernent les trajectoires, la position et la durée des arrêts pour chaque parcours, et les temps de début et de fin des parcours.

6.3. *Retranscription des trajectoires*

Il est nécessaire de rapporter les trajectoires en essayant d'être le plus précis possible. A cet effet, l'angle de vision du caméscope devra permettre de disposer d'une vue globale sur l'espace concerné par l'étude. Aussi, nous nous servons de repères visuels tels que les éléments d'aménagement (arbres, bâtiments...) ou les tracés d'ombres (simulé par l'outil SOLENE) afin de retranscrire les trajectoires sur l'interface graphique de l'outil d'analyse.

La Figure 35 représente un exemple de trajectoire réelle observée sur un espace urbain, le cours Cambronne à Nantes³¹. Cette trajectoire est rapportée sur l'outil d'analyse tel qu'illustré dans la Figure 36. Le tracé des ombres ainsi que les éléments d'aménagement tels que les arbres nous ont servi de repères lors de la retranscription.



Figure 35. *Observation d'une trajectoire réelle (cours Cambronne, Nantes)*

³¹ Le cours Cambronne (à Nantes) sera l'espace urbain dans lequel nous procéderons à la mise en œuvre de notre méthode d'analyse au Chapitre 7.

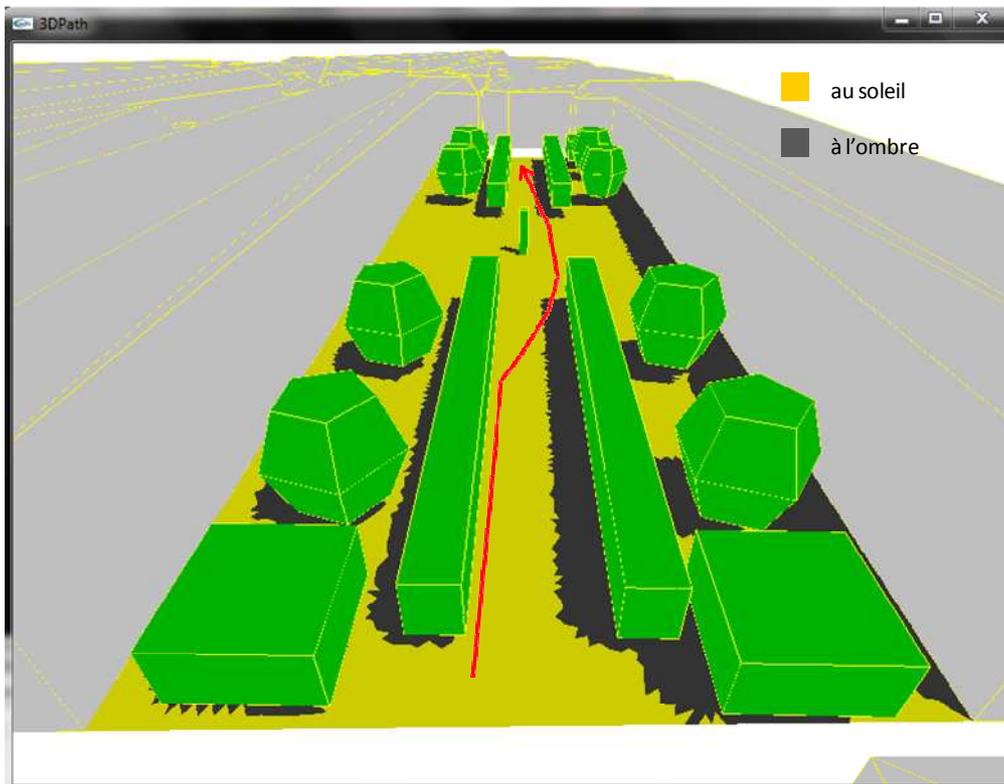


Figure 36. *Retranscription de la trajectoire observée au niveau de l'outil d'analyse des parcours (cours Cambronne, Nantes)*

6.4. Caractérisation comportementale des parcours

La méthode de caractérisation comportementale des parcours que nous proposons consiste en une évaluation, par l'intermédiaire de variables caractéristiques, des différents aspects comportementaux observés. Elle est fortement dépendante de la méthode de segmentation des parcours présentée dans le chapitre précédent (cf. § 5.3.1). En effet, nous serons amenés à évaluer les variables comportementales (nombre et durée des arrêts, distance parcourue...) au niveau des portions de parcours. Le but est de disposer à la fois des caractéristiques microclimatiques et des caractéristiques comportementales par rapport à une même segmentation de parcours. Ceci est primordial en vue de la mise en correspondance entre variables microclimatiques et variables comportementales.

Cette démarche implique aussi que les caractéristiques comportementales devront être évaluées pour chaque configuration de segmentation et donc pour chaque variable microclimatique.

6.4.1. Évaluation des longueurs de parcours et des portions de parcours

Une trajectoire, telle que nous l'avons évoquée au chapitre précédent (cf. § 5.2), consiste en une succession de points sélectionnés grâce à l'outil d'analyse des parcours. Etant donné que nous serons amenés à définir les variables comportementales au niveau des portions de parcours, nous devons être en mesure d'estimer aussi bien les longueurs des parcours que les longueurs des portions les composant.

La Figure 39 présente les différents points nécessaires à l'estimation des longueurs de portions et de parcours.

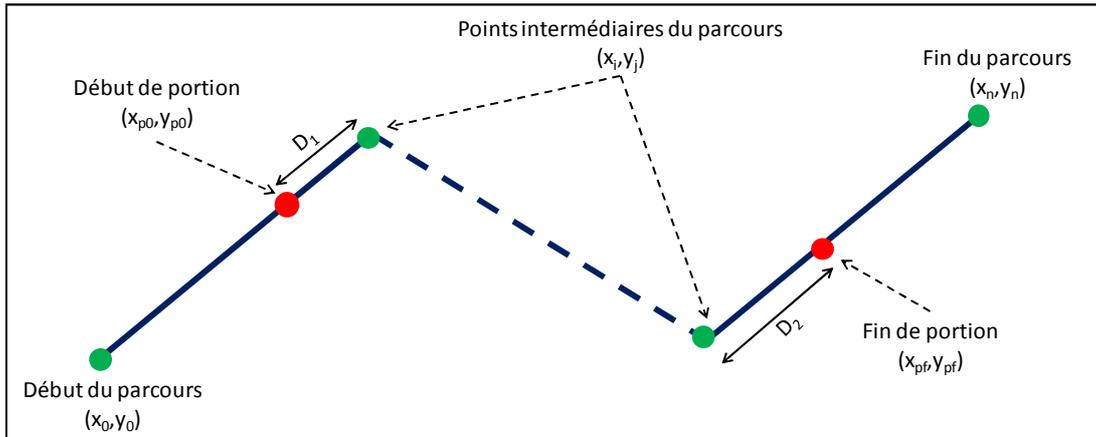


Figure 37. Représentation géométrique du parcours

Pour estimer la longueur d'un parcours P contenant $n+1$ points, nous proposons d'appliquer la formule suivante :

$$\text{Longueur}(P) = \sum_{i,j=0}^n \text{Dist}[(x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{j+1})]$$

Où Dist représente un opérateur de distance euclidienne.

Quant à la longueur d'une portion de parcours p , elle est évaluée par l'équation suivante :

$$\text{Longueur}(p) = D_1 + D_2 + \sum_{i,j=s}^t \text{Dist}[(x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{j+1})]$$

Où D_1 représente la distance entre le point de début de portion et le point intermédiaire du parcours qui lui succède, D_2 représente la distance entre le point de fin de portion et le point intermédiaire du parcours qui le précède. Enfin, les indices de s à t sont relatifs aux points intermédiaires du parcours situés entre le début et la fin de la portion.

Notons qu'à partir des longueurs de portions, nous sommes en mesure de déduire les durées passées par les piétons sur chaque portion, et ce, à condition de disposer de l'information relative à la vitesse moyenne de déplacement.

6.4.2. Evaluation des vitesses moyennes de déplacement

Pour des raisons de simplification, nous ne calculons que la vitesse moyenne de déplacement par rapport à la globalité d'un parcours. L'évaluation d'une vitesse instantanée sur les différents points d'un parcours n'était pas possible par l'intermédiaire de notre technique d'observation. Afin de disposer des vitesses instantanées, il aurait fallu employer des techniques plus sophistiquées telles que le suivi automatique des déplacements par l'intermédiaire de caméscopes et de logiciels de traitement d'images dédiés à cet effet.

Cette approximation implique que la vitesse au niveau des portions d'un parcours sera équivalente à la vitesse calculée sur la globalité du signal.

Pour rappel, la vitesse moyenne de déplacement est une variable qui a conditionné la discrétisation des parcours. Plus précisément, elle nous a permis de déterminer la taille des blocs rectangulaires auxquels ont été affectées les différentes valeurs des signaux microclimatiques.

L'estimation de la vitesse moyenne de déplacement est donnée par la formule suivante :

$$Vitesse(P) = \frac{Longueur(P)}{t_f(P) - t_i(P) - \sum t_a}$$

Où t_i est le temps de début de parcours et t_f est le temps de fin de parcours.

Lors du calcul de la vitesse moyenne nous ne tenons pas compte du temps passé par le piéton à l'arrêt, d'où la soustraction de la somme des durées des arrêts ($\sum t_a$) de la durée totale du parcours.

6.4.3. Nombre et durée des arrêts

Lors du recueil des données comportementales, nous comptabilisons le nombre d'arrêts effectués pendant les parcours ainsi que le temps passé lors de chaque arrêt.

L'évaluation de la « Durée Moyenne des Arrêts » (*DMA*) pour une portion p de parcours est donnée par le rapport entre la somme des durées (t_a) de ces arrêts et le nombre des arrêts effectués dans la portion p . Le calcul de la *DMA* par portion est donnée par l'équation suivante :

$$DMA(p) = \frac{\sum t_a}{N_a} \quad (s)$$

6.4.4. Exemple de caractérisation comportementale des portions de parcours

Nous exposons dans cette partie un exemple de caractérisation des portions de parcours du point de vue de leurs caractéristiques comportementales (longueur, vitesse moyenne de déplacement, nombre d'arrêts, durée moyenne des arrêts).

Le but est d'être en mesure de disposer, à la fois, des données microclimatiques et comportementales, au niveau de chaque portion de parcours.

Nous avons repris le même environnement urbain que dans l'exemple de classification microclimatique du chapitre précédent au niveau duquel nous avons inséré des informations relatives aux aspects comportementaux, recueillies lors de la phase d'observation. Ces informations peuvent être visualisées par l'outil d'analyse des parcours (voir Figure 38).

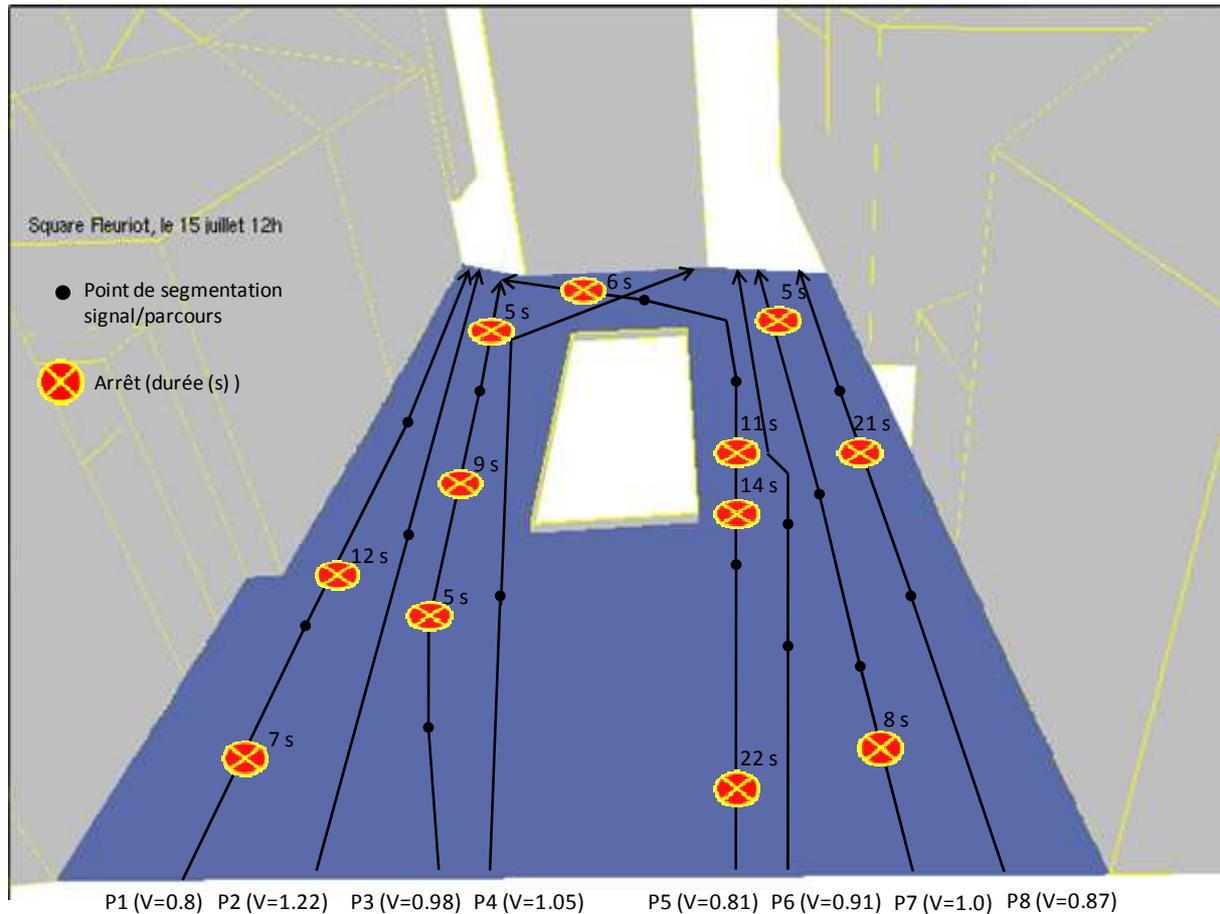


Figure 38. Visualisation des données comportementales (issues des observations) par l'outil d'analyse des parcours – Pour chaque parcours segmenté, correspond une vitesse moyenne de déplacement V - Environnement 3D représentant le square Fleuriot (Nantes)

Les variables caractéristiques comportementales sont évaluées au moyen des équations présentées précédemment. Le tableau suivant (Tableau 20) contient les valeurs obtenues pour chaque portion de parcours.

Parcours-Portion	Longueur (m)	Vitesse moyenne (m/s)	Nombre d'arrêts	Durée moyenne des arrêts (s)
P1-1	14.5	0.80	1	7
P1-2	20.6	0.80	1	12
P1-3	29.9	0.80	0	0
P2-1	20.5	1.22	0	0
P2-2	39.9	1.22	0	0
P3-1	8.0	0.98	0	0
P3-2	32.8	0.98	2	7
P3-3	22.2	0.98	1	5
P4-1	15.2	1.05	0	0

P4-2	54.0	1.05	0	0
P5-1	18.2	0.81	1	22
P5-2	22.9	0.81	2	12.5
P5-3	19.0	0.81	0	0
P5-4	9.5	0.81	1	6
P6-1	9.4	0.91	0	0
P6-2	11.0	0.91	0	0
P6-3	44.3	0.91	0	0
P7-1	9.6	1.00	1	8
P7-2	17.0	1.00	0	0
P7-3	35.7	1.00	1	5
P8-1	14.0	0.87	0	0
P8-2	23.6	0.87	1	21
P8-3	23.11	0.87	0	0

Tableau 20. *Calcul des variables caractéristiques comportementales pour chaque portion P_{i-j} (i désigne le numéro du parcours et j sa $j^{\text{ème}}$ portion)*

Rappelons qu'une segmentation des parcours telle que celle présentée dans la Figure 38 est le résultat d'une analyse effectuée sur les signaux relativement à une seule variable microclimatique (cf. § 5.3.1). L'analyse des signaux d'une autre variable microclimatique produirait une segmentation différente et nécessiterait de réévaluer les variables caractéristiques comportementales au niveau des nouvelles portions.

Suite au calcul des variables caractéristiques comportementales au niveau des portions de parcours, nous sommes en mesure de caractériser, du point de vue comportemental, les classes microclimatiques regroupant ces portions. En effet, pour chaque classe microclimatique, une description statistique des données comportementales relatives aux portions de parcours peut être proposée. Cette description devra être confrontée aux propriétés microclimatiques des classes en vue d'identifier d'éventuelles relations entre les facteurs microclimatiques et les comportements piétonniers liés à la mobilité.

6.5. Synthèse intermédiaire

Nous avons présenté dans ce chapitre une méthode de caractérisation comportementale des portions de parcours. Le point de départ de cette méthode est la retranscription des parcours. Les informations relatives aux temps de début et de fin de parcours ainsi qu'aux nombres et aux durées des arrêts effectués par le piéton sont, elles aussi, recueillies à partir des vidéos.

Nous procédons, dans une seconde étape, au calcul des différentes variables caractéristiques comportementales au niveau des portions de parcours issues de l'application de la méthode de segmentation.

Le but est d'être en mesure de disposer à la fois des données microclimatiques et des données comportementales au niveau des mêmes portions de parcours et de pouvoir analyser les relations entre ces deux catégories de données.

Chapitre 7. Mise en œuvre de la méthode d'analyse – Etude de cas : le cours Cambronne (Nantes)

7.1. Introduction

Après la description des méthodes de caractérisation microclimatique et comportementale des parcours piétonniers, nous nous intéressons dans ce chapitre à la mise en pratique de cette méthode dans le contexte d'une étude de terrain menée dans le cours Cambronne à Nantes.

L'objectif est de présenter une application de notre méthode sur un exemple concret en vue d'étudier les relations entre, d'une part, les données comportementales relatives à des parcours observés et, d'autre part, les caractéristiques relatives au facteur microclimatique « vitesse du vent » et à l'indicateur de confort « *PMV* ». Nous détaillerons en l'occurrence la méthode de double caractérisation microclimatique et comportementale qui permet de disposer pour chaque classe de parcours des données relatives aux indicateurs microclimatiques et de celles concernant les variables comportementales.

7.2. Présentation du site de l'étude : le cours Cambronne

Le site où se sont déroulées les observations ayant pour but de relever les trajectoires piétonnes et les données comportementales est le cours Cambronne (47.21° N, -1.56° O) de la ville de Nantes. Nous présentons dans ce qui suit la morphologie ainsi que les caractéristiques de ce site.

7.2.1. Description du site

Le Cours Cambronne est un square d'environ 180 m de longueur et 50 m de largeur orienté sud-ouest / nord-est, aménagé à partir de 1791 sur les plans de l'architecte nantais Mathurin Crucy afin de relier la place Graslin au quai de la Fosse (voir Figure 39).

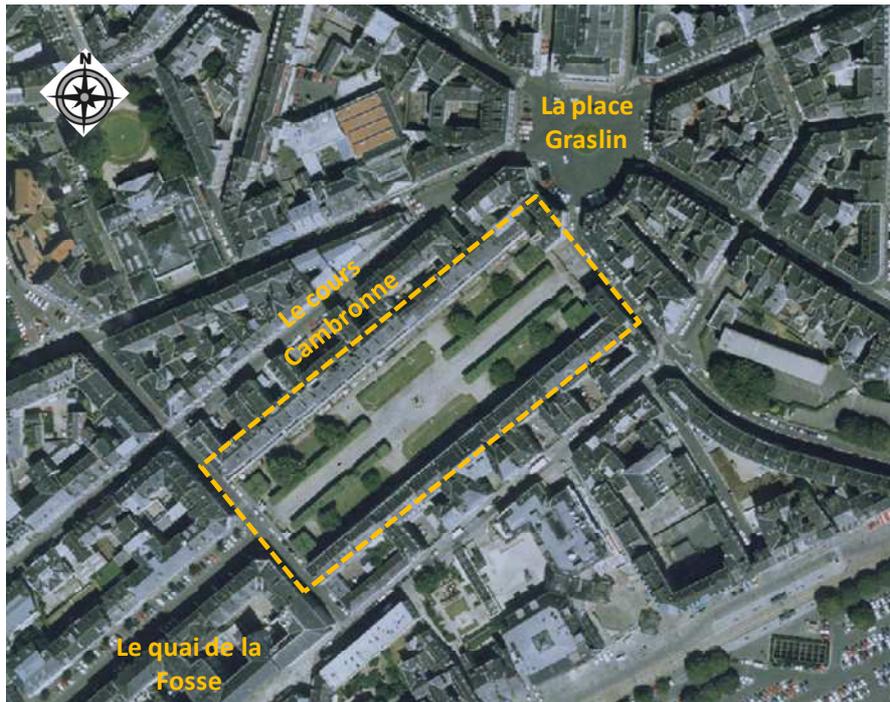


Figure 39. *Vue aérienne sur le cours Cambronne (Nantes)*

Il est bordé par une rangée d'immeubles identiques des deux côtés : un sous-sol (seul accès des bâtiments depuis le cours), un premier niveau sur terrasse, puis deux étages à colonnes ioniques, et enfin un étage supérieur derrière une balustrade (Figure 40).



Figure 40. *Le cours Cambronne (Nantes)*

Au centre du cours, trône une statue de Pierre Cambronne (Figure 40), due à Jean Debay et inaugurée le 28 juillet 1848. On y trouve également l'une des cinq fontaines Wallace de Nantes (sculptées par Charles Auguste Lebourg).

7.2.2. Particularités du site

Le cours Cambronne étant un cours de liaison entre deux rues et deux quartiers, il induit un transit piétonnier assez important pendant la journée. Le positionnement de bancs le long de ce cours invite à une occupation assise et un usage du type : halte repos ou de pause spectatrice du passage etc. (Lecorre, 2006).

De même, ce cours est fréquenté pour des promenades récréatives lorsqu'il fait beau en toute saison.

La particularité du cours c'est qu'il présente une double symétrie (longitudinale et transversale) (voir Figure 41). Cette symétrie est relative aussi bien à l'environnement bâti qu'aux éléments de la végétation. Ce qui fait que le cours présente les mêmes propriétés visuelles, parcouru dans un sens ou dans l'autre, du côté droit ou du côté gauche de l'allée centrale.

Ces particularités sont importantes dans le cadre de notre étude, car nous supposons que les piétons fréquentant ce cours peuvent être amenés à faire des choix non pas par rapport à des critères visuels mais des choix privilégiant d'autres critères tels que les conditions microclimatiques et de confort.

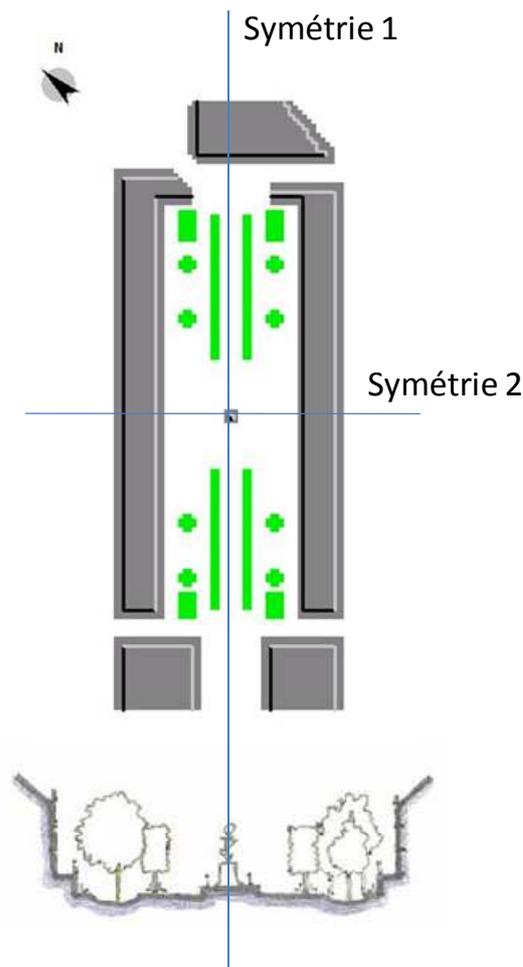


Figure 41. *Les symétries longitudinale et transversale du cours Cambronne*

7.3. Le recueil des données

7.3.1. Les données météorologiques

La session d'observation que nous avons menée s'est déroulée le 9 août 2008 entre 14h00 et 16h00 dans un contexte météorologique que nous avons essayé d'évaluer, d'une part, par l'intermédiaire de mesures réalisées *in situ* et, d'autre part, en ayant recours à des observations météorologiques répertoriées dans un site Internet (meteociel.fr³²).

Une station de mesure portable³³ a permis de mesurer une vitesse moyenne du vent, une valeur moyenne de la température de l'air, et une valeur moyenne de l'humidité relative (calculées sur une période de dix minutes au début de la session d'observation au niveau de plusieurs points du site).

Le tableau (Tableau 21) présente les données météorologiques recueillies *in situ* et observées au moment de la session d'observation. Ces deux catégories de données (sensiblement proches) ont permis, entre autres, de paramétrer les logiciels de simulation (Solene et Envi-met).

	Mesures <i>in situ</i>	Observations météo.
Température de l'air	22°C	22.5°C
Vitesse du vent	4.2 m/s	4 m/s
Humidité relative	62%	65%

Tableau 21. *Données météorologiques mesurées in situ et observés au début de la session d'observation*

7.3.1. Les données relatives au parcours

Nos observations vidéo ont été menées à partir d'un point surélevé situé dans un bâtiment avoisinant l'extrémité sud-ouest du cours Cambronne (voir Figure 42). Ainsi, nous avons pu disposer d'un champ de vision très large et d'une vue sur la quasi-intégralité du cours (voir Figure 43) permettant de filmer les parcours d'un bout à l'autre du cours.

³² meteociel.fr : site d'observations et de prévisions météorologiques donnant accès à une base de données d'observations horaires historiques couvrant plusieurs années.

³³ Appareil enregistreur multifonction de marque Testo 400 (www.testo.fr) raccordé à une sonde à fil chaud pour la mesure de la vitesse de l'air (plage de mesure : 0...20m/s) et une sonde thermo-hygrométrique (plages de mesure : -20...+70°C, 0%...100%)



Figure 42. Localisation de l'observateur



Figure 43. Vue sur le cours Cambronne à partir du point d'observation

Nous nous intéressons, lors du visionnage des enregistrements vidéo, aux trajectoires, effectuées par une personne marchant seule, d'un bout à l'autre du cours (dans les deux sens de parcours). Chaque parcours visionné est tracé au niveau de la composante graphique de l'outil d'analyse de parcours en vue de procéder aux méthodes de caractérisation microclimatique et comportementale. Au total trente trajets ont été observés (filmés *in situ* puis visionnés). La figure ci-dessous (voir Figure 44) illustre l'ensemble de ces parcours.

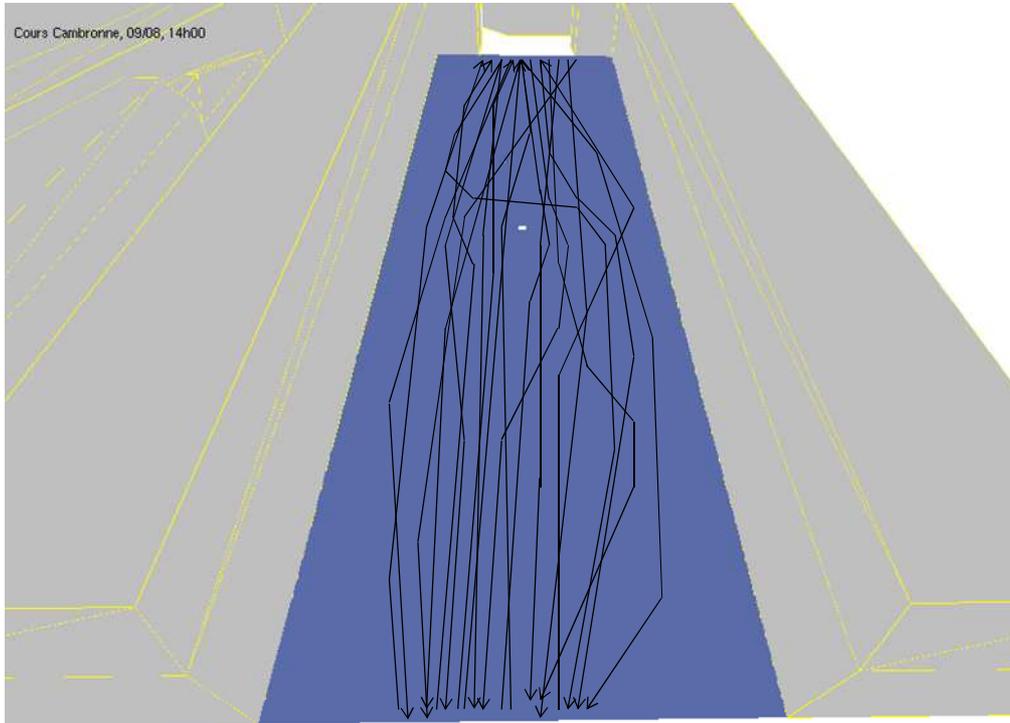


Figure 44. Ensemble des parcours observés (dans les deux sens) d'un bout à l'autre du cours Cambronne

Chacun des parcours effectués est caractérisé par : (1) un temps de début et un temps de fin de parcours permettant de déduire la durée; (2) une longueur calculée au niveau de l'outil d'analyse de parcours (cf. § 6.4.1) ; (3) Une vitesse moyenne calculée en fonction de la durée et de la longueur parcourue, (4) le nombre des arrêts effectués pendant le parcours et (4) les durées des arrêts.

Le Tableau 22 représente les données comportementales évaluées au niveau des parcours.

Parcours	Durée (s) (hors arrêts)	Longueur (m)	Vitesse moyenne (m/s)	Nombre des arrêts	Durées des arrêts (s)
P1	210	176	0,84	3	30 ; 40 ; 25
P2	155	177	1,14	0	0
P3	180	190	1,06	2	29 ; 22
P4	140	174	1,24	0	0
P5	145	177	1,22	1	15
P6	138	175	1,27	0	0
P7	142	176	1,24	0	0

P8	129	177	1,37	0	0
P9	134	176	1,31	0	0
P10	120	176	1,47	0	0
P11	156	192	1,23	3	18 ; 28 ;8
P12	170	176	1,04	0	0
P13	125	176	1,41	0	0
P14	130	181	1,39	2	38 ; 12
P15	160	181	1,13	0	0
P16	203	182	0,90	1	28
P17	211	183	0,87	3	19 ; 13 ; 32
P18	120	180	1,50	0	0
P19	120	176	1,47	0	0
P20	149	180	1,21	2	21 ; 7
P21	125	177	1,42	0	0
P22	164	184	1,12	2	12 ; 9
P23	140	180	1,29	1	8
P24	181	181	1,00	0	0
P25	134	177	1,32	0	0
P26	178	175	0,98	1	27
P27	130	173	1,33	0	0
P28	148	181	1,22	0	0
P29	220	202	0,92	2	13 ; 7
P30	142	175	1,23	0	0

Tableau 22. Les données comportementales relatives aux parcours observés

7.4. La simulation des données microclimatiques

Les données physiques proviennent de simulations numériques effectuées à la date et à l'heure de début de la session d'observation, selon les mêmes conditions climatiques relevées pendant le créneau horaire des observations.

Les données sont simulées par les logiciels SOLENE pour la simulation des ombres portées et du rayonnement solaire et ENVI-MET pour la simulation aéraulique et pour l'évaluation du confort thermique.

7.4.1. Le modèle urbain 3D du site

Deux modèles urbains 3D équivalents on été élaborés : un modèle sur SOLENE et un autre sur ENVI-MET. Ces modèles sont présentés dans la figure suivante (Figure 45)

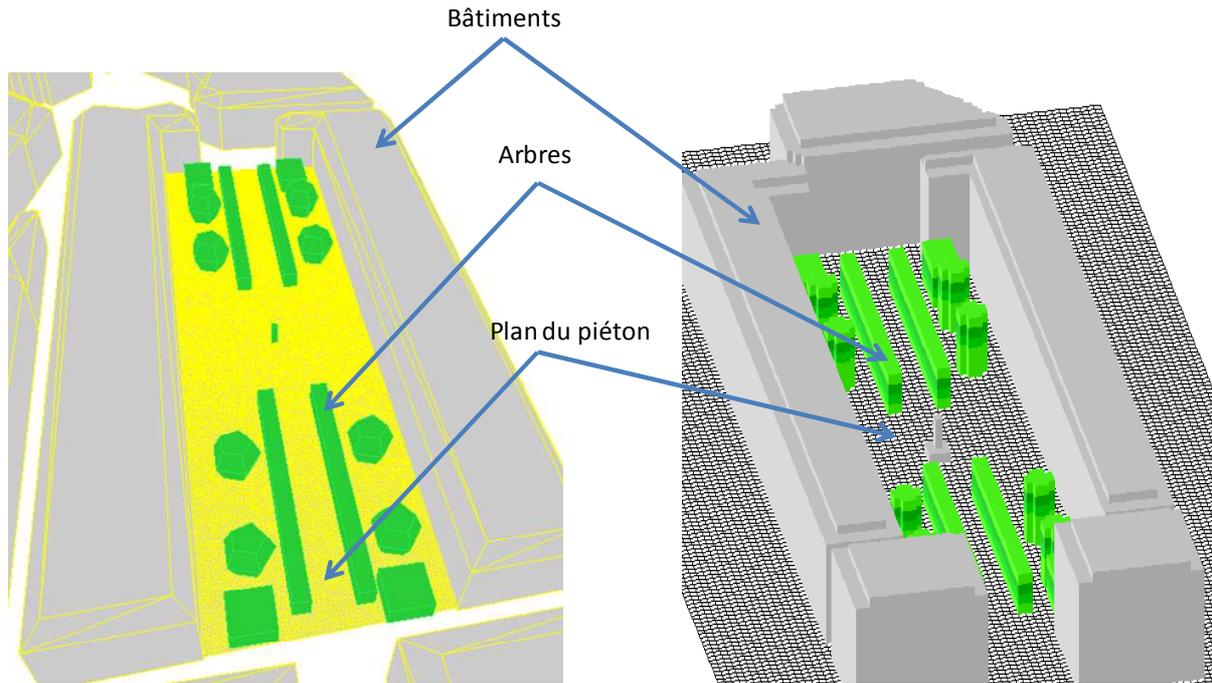


Figure 45. Les modèles urbains 3D SOLENE (à gauche) et ENVI-MET (à droite)

Les données microclimatiques sont simulées au niveau du plan virtuel du piéton situé à 1.5 mètre du sol. La discrétisation de ce plan sur SOLENE (discrétisation par triangulation) est différente de celle proposée par ENVI-MET (discrétisation par quadrillage). Il a donc fallu appliquer une méthode d'interpolation permettant de fédérer les données provenant des deux logiciels de simulation au niveau de notre outil graphique d'analyse de parcours, dans lequel le plan du piéton est discrétisé en facettes triangulaires.

7.4.2. La simulation de la « vitesse du vent » et du *PMV*

Nous nous intéressons dans cette étude de cas à deux variables que nous proposons de simuler puis d'analyser le long des parcours observés. Ces deux variables sont la « vitesse du vent » et l'indicateur de confort thermique « *PMV* ».

Une simulation des données relatives aux deux variables est menée dans les mêmes conditions climatiques que celles présentes lors de l'observation.

Nous procédons, dans un premier temps, à la simulation de la variable microclimatique « vitesse de vent » (*m/s*) au niveau du plan du piéton. Le résultat de cette simulation est présenté dans la Figure 46.

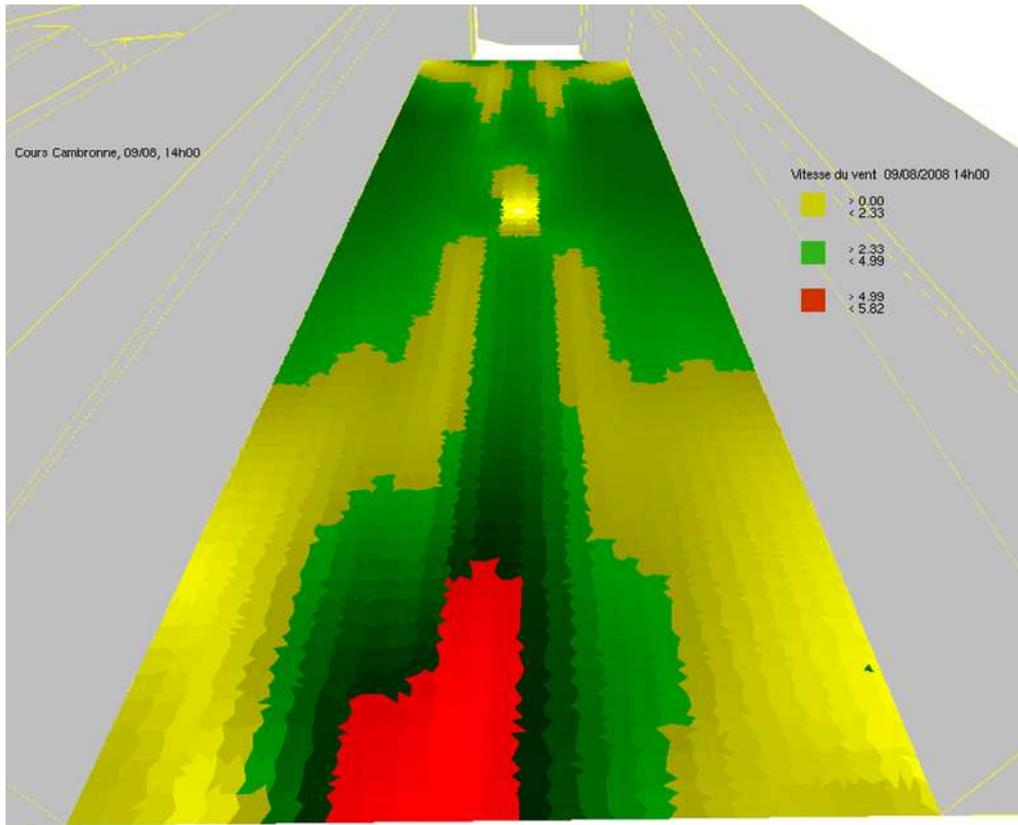


Figure 46. Simulation de la vitesse du vent au niveau du plan du piéton selon les conditions climatiques du 09/08/2008 à 14h (cours Cambronne)

La Figure 47 présente le résultat de la simulation de l'indicateur de confort thermique *PMV* au niveau du plan du piéton. Rappelons que le *PMV* est calculé en fonction de plusieurs variables (cf. § 3.3.2.1) dont la température moyenne radiante, la température de l'air, l'humidité relatives, etc. C'est ce qui explique que des zones de valeurs très hétérogènes peuvent être adjacentes.

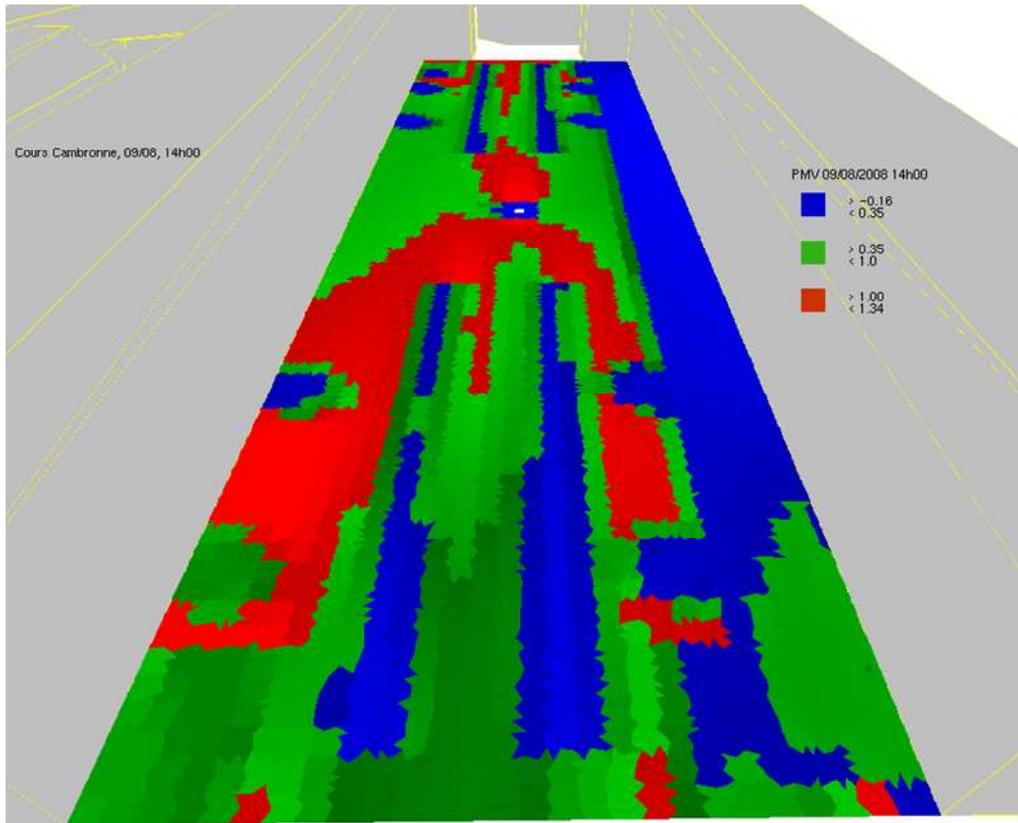


Figure 47. Simulation de l'indicateur de confort PMV au niveau du plan du piéton selon les conditions climatiques du 09/08/2008 à 14h (cours Cambronne)

7.5. La caractérisation des portions de parcours

A ce stade, nous appliquons la méthode de caractérisation des portions de parcours du point de vue des variables « vitesse du vent » et « PMV ». Les portions de parcours sont obtenues au moyen de la technique de segmentation précédemment présentée (cf. § 5.3.1), basée sur la détection des changements de sens de variation des signaux microclimatiques.

La méthode de caractérisation est menée par rapport à une seule variable microclimatique à la fois. Elle consiste en une description des portions de parcours par l'intermédiaire d'indicateurs numériques relatifs à l'intensité moyenne, à la fréquence de dépassement d'une valeur seuil et au sens de variation du signal représentant la portion de parcours.

Les variables comportementales sont, elles aussi, évaluées pour chacune des portions en vue leur mise en correspondance ultérieure avec les variables microclimatiques.

7.5.1. Caractérisation des portions de parcours en fonction de la « vitesse du vent »

Les valeurs des indicateurs microclimatiques pour chaque portion de parcours ainsi que les caractéristiques comportementales correspondantes sont présentées dans l'Annexe C (voir Tableau C.1). Au total, 190 portions de parcours ont été obtenues suite à la procédure de segmentation des signaux / parcours en fonction de la variable « vitesse du vent » .

Le tableau 23 présente une description des données représentant les caractéristiques des signaux « vitesse du vent » au niveau des portions de parcours ainsi que les variables comportementales observées sur ces mêmes portions.

	Variables / Indicateurs	Nbre des portions de parcours	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Indicateurs caractéristiques des signaux de la « vitesse du vent »	I_{mov}	190	0,7	5,7	3,1	1,0
	Freq_{dep5+}	190	0,0	1,0	0,1	0,3
	Sens de variation du signal	190	-0,3	0,2	0,0	0,1
Variables comportementales	Vitesse	190	0,8	1,5	1,2	0,2
	Longueur	190	7,0	140,0	28,2	21,9
	Durée	190	4,7	115,7	24,0	18,4
	Nombre des arrêts	190	0,0	3,0	0,1	0,4
	Durée moyenne des arrêts	190	0,0	38,0	1,9	6,5

Tableau 23. Description des données des segments de parcours relativement à la vitesse du vent

7.5.2. Caractérisation des portions de parcours en fonction de l'indicateur de confort PMV

De la même manière que pour la vitesse du vent, les indicateurs caractéristiques des portions de parcours sont calculés relativement à la variable *PMV*.

Préalablement au calcul des indicateurs, une deuxième segmentation, cette fois basée sur l'analyse du sens de variation des signaux du *PMV*, a été menée sur l'ensemble des parcours et une réévaluation des variables comportementales a été effectuée au niveau des nouvelles portions. Le nombre total de portions obtenues est de 139.

Les indicateurs caractéristiques des portions relativement à la variable *PMV* sont présentés dans l'Annexe C (voir Tableau C.2).

Le tableau 24 présente une description des données représentant les caractéristiques des signaux « vitesse du vent » au niveau des portions de parcours ainsi que les variables comportementales observées sur ces mêmes portions.

	Variables / Indicateurs	Nbre des portions de parcours	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Indicateurs caractéristiques des signaux du PMV	I _{mov}	139	0,1	1,2	0,7	0,3
	Freq_dep ₁₊	139	0,0	1,0	0,3	0,3
	Sens de variation du signal	139	-0,1	0,1	0,0	0,0
Variables comportementales	Vitesse	139	0,9	1,5	1,2	0,2
	Longueur	139	7,0	119,0	38,1	26,4
	Durée	139	4,9	109,0	32,0	21,0
	Nombre des arrêts	139	0,0	2,0	0,2	0,4
	Durée moyenne des arrêts	139	0,0	38,0	2,7	7,3

Tableau 24. Description des données des segments de parcours relativement au PMV

7.6. La classification microclimatique des portions de parcours

Dans le but de regrouper les portions de parcours en classes de portions présentant des caractéristiques microclimatiques proches au sens d'un critère de similarité (cf. § 5.3.3.1), nous procédons à une classification (CAH) de l'ensemble des portions présentées dans les deux tableaux précédents.

7.6.1. Classification des portions de parcours relativement à la « vitesse du vent »

Une première classification est menée sur les portions de parcours relativement à la variable « vitesse du vent ». Préalablement à cette classification, nous avons normalisé les données par centrage-réduction afin de les rendre homogènes.

La classification a permis d'identifier cinq classes de portions de parcours dont la composition est donnée par le Tableau 25.

Classe 1	Classe 2	Classe 3				Classe 4	Classe 5
P1-1	P1-2	P1-3	P10-4	P16-2	P24-3	P1-7	P3-7
P2-1	P2-2	P1-4	P10-5	P16-4	P24-4	P3-6	P9-5
P4-4	P6-1	P1-5	P11-3	P16-5	P24-5	P4-3	P12-7
P7-1	P6-2	P1-6	P11-4	P17-1	P24-6	P5-4	P15-7
P9-6	P6-3	P2-3	P11-5	P17-2	P25-1	P8-2	P16-7
P10-1	P7-2	P2-4	P11-6	P17-3	P25-2	P9-4	P17-6
P11-1	P10-2	P2-5	P11-7	P17-4	P25-3	P11-8	P18-10
P12-8	P11-2	P3-1	P11-9	P18-1	P26-1	P12-5	P21-5
P13-1	P13-2	P3-2	P12-1	P18-2	P26-2	P12-6	P22-6
P19-1	P14-1	P3-3	P12-2	P18-3	P26-3	P15-6	P23-9
P27-1	P19-2	P3-4	P12-3	P18-4	P26-4	P16-3	P24-8
P29-9	P20-1	P3-5	P12-4	P18-5	P26-5	P16-6	P25-6
	P20-2	P4-1	P13-3	P18-6	P27-4	P17-5	P26-7
	P27-2	P4-2	P13-4	P18-7	P27-5	P18-8	P29-8

	P27-3	P5-1	P13-5	P19-3	P27-7	P18-9	
		P5-2	P13-6	P19-4	P27-8	P20-4	
		P5-3	P13-7	P19-5	P28-1	P22-5	
		P6-4	P14-2	P19-6	P28-2	P23-3	
		P6-5	P14-3	P19-7	P29-1	P23-6	
		P6-6	P14-4	P20-3	P29-2	P23-7	
		P7-3	P14-5	P21-1	P29-3	P23-8	
		P7-4	P14-6	P21-2	P29-5	P24-7	
		P7-5	P15-1	P21-3	P29-6	P25-4	
		P8-1	P15-2	P21-4	P30-1	P25-5	
		P9-1	P15-3	P22-1	P30-2	P26-6	
		P9-2	P15-4	P22-2	P30-3	P27-6	
		P9-3	P15-5	P22-3	P30-4	P28-3	
		P10-3	P16-1	P22-4	P30-5	P28-4	
		P24-1	P23-4	P23-1		P29-4	
		P24-2	P23-5	P23-2		P29-7	
						P30-6	

Tableau 25. *Composition des classes relatives à la vitesse du vent*

Par ailleurs, les classes, représentées par leurs éléments centraux, peuvent être interprétées en fonction des valeurs des indicateurs caractéristiques (voir tableau 26). Pour ce faire, nous nous basons sur le modèle de qualification des intervalles de valeurs des indicateurs, présenté précédemment (cf. § 5.3.3.2).

<i>Classe (élément central)</i>	<i>I_{moy}</i>	<i>Freq_dep₅₊</i>	<i>SV</i>	<i>Qualificatif</i>	<i>Description</i>
C1 (P29-9)	5,595	1,000	0,015	C₃₃₂	<ul style="list-style-type: none"> • Intensité moyenne élevée • Fréq. de dépassement du seuil de confort élevée • Signal constant
C2 (P13-2)	4,346	0,250	-0,113	C₃₃₁	<ul style="list-style-type: none"> • Intensité moyenne élevée • Fréq. de dépassement du seuil de confort modérée • Signal décroissant
C3 (P24-1)	2,548	0,000	-0,013	C₂₁₂	<ul style="list-style-type: none"> • Intensité moyenne modérée • Fréq. de dépassement du seuil de confort faible • Signal constant
C4 (P16-3)	3,158	0,000	0,054	C₂₁₃	<ul style="list-style-type: none"> • Intensité moyenne modérée • Fréq. de dépassement du seuil de confort faible • Signal croissant
C5 (P23-9)	5,059	0,474	0,092	C₃₃₃	<ul style="list-style-type: none"> • Intensité moyenne élevée • Fréq. de dépassement du seuil de confort élevée • Signal croissant

Tableau 26. *Interprétation des classes de portions de parcours sur la base de leurs éléments centraux (classification relative à la vitesse du vent)*

Pour avoir une meilleure idée sur ce que peuvent réellement présenter les classes obtenues, nous proposons de visualiser les éléments centraux représentatifs des classes au niveau de la cartographie des données relatives à la vitesse du vent (Figure 48).

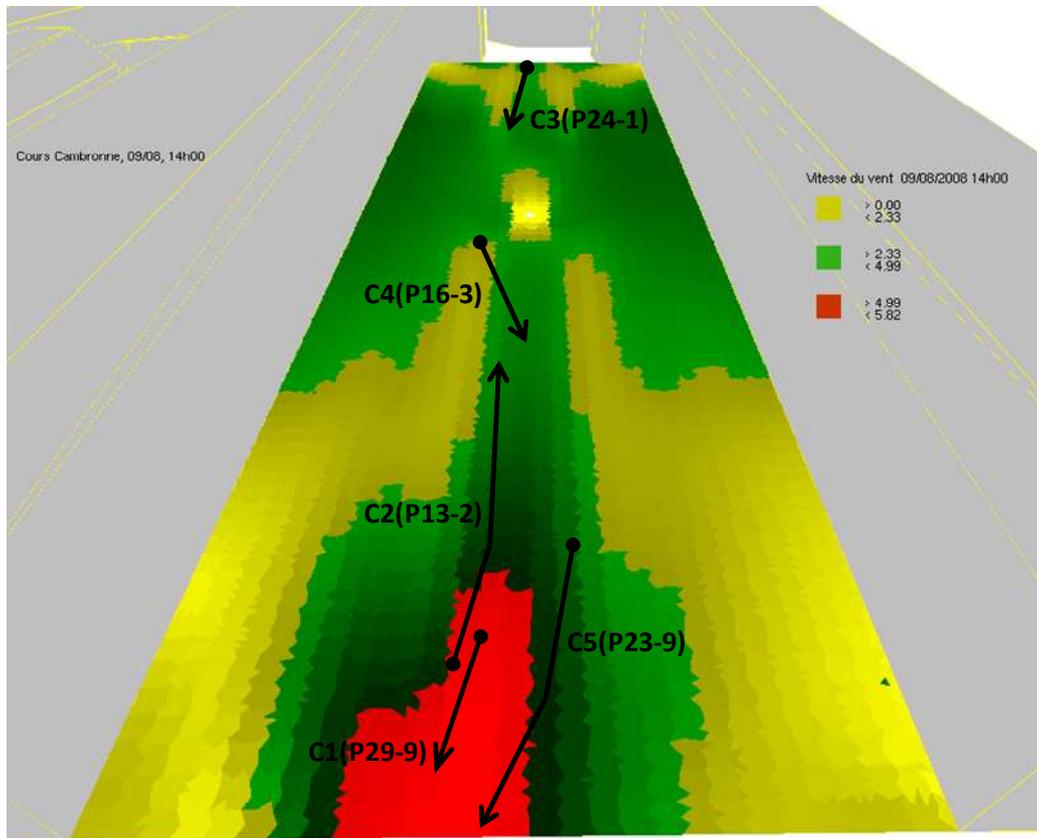


Figure 48. *Visualisation des portions de parcours « éléments centraux » des classes (classification relative à la vitesse du vent)*

7.6.2. Classification des portions de parcours relativement à l'indicateur de confort *PMV*

La même méthode de classification précédente est appliquée aux portions de parcours relatifs à la variable *PMV*. La composition des classes obtenues est donnée par le Tableau 27.

Classe 1		Classe 2			Classe 3		
P1-1	P16-8	P1-2	P11-6	P23-1	P1-4	P15-4	P24-3
P2-1	P17-2	P1-3	P12-1	P23-2	P1-5	P15-5	P24-4
P3-5	P17-6	P1-6	P13-2	P24-1	P3-2	P16-6	P24-7
P4-1	P18-1	P2-2	P13-3	P24-5	P3-6	P16-7	P24-8
P4-2	P18-6	P3-1	P14-2	P24-6	P3-7	P17-3	P26-2
P4-4	P18-7	P3-3	P14-3	P25-1	P5-2	P18-2	P26-3
P5-1	P19-1	P3-4	P14-4	P26-1	P5-5	P18-4	P26-5
P5-4	P22-4	P4-3	P15-3	P26-4	P5-6	P18-5	P29-5
P6-1	P22-6	P5-3	P16-3	P27-2	P6-2	P20-1	
P8-2	P23-3	P6-5	P17-1	P27-3	P6-3	P20-2	
P9-3	P25-2	P6-6	P17-4	P27-4	P6-4	P20-3	
P10-1	P26-6	P6-8	P17-5	P28-3	P6-7	P20-5	
P12-2	P27-1	P7-1	P18-3	P28-4	P11-1	P20-6	
P13-1	P28-1	P7-2	P19-2	P29-1	P11-2	P20-7	
P15-1	P28-2	P8-1	P20-4	P29-2	P11-3	P21-3	
P16-1	P28-5	P9-1	P21-1	P29-3	P11-4	P21-4	
P16-2	P29-6	P9-2	P21-2	P29-4	P11-7	P22-2	
P16-4	P30-2	P10-2	P22-1	P30-1	P14-1	P22-5	
P16-5		P11-5	P22-3		P15-2	P24-2	

Tableau 27. Composition des classes relatives au PMV

Les classes représentées par leurs éléments centraux ainsi que les qualificatifs qui leur sont attribués (sur la base du modèle de codage des intervalles de valeurs relatifs au PMV) sont présentés par le Tableau 28.

Classe (élément central)	I_{moy}	$Freq_dep_{1+}$	SV	Qualificatif	Description
C1 (P27-1)	0,800	0,122	0,013	C₅₂₂	<ul style="list-style-type: none"> • Légèrement chaud • Fréq. de dépassement du seuil de confort modérée • Signal constant
C2 (P14-4)	1,021	0,615	0,001	C₅₃₂	<ul style="list-style-type: none"> • Légèrement chaud • Fréq. de dépassement du seuil de confort élevée • Signal constant
C3 (P20-3)	0,386	0,042	0,007	C₄₁₂	<ul style="list-style-type: none"> • Neutre (équilibre énergétique) • Fréq. de dépassement du seuil de confort faible • Signal constant

Tableau 28. Interprétation des classes de portions de parcours sur la base de leurs éléments centraux (classification relative au PMV)

La Figure 49 présente, à titre indicatif, la localisation des portions de parcours (éléments centraux) représentant les classes du Tableau 28 au niveau du plan du piéton contenant les valeurs du *PMV*.

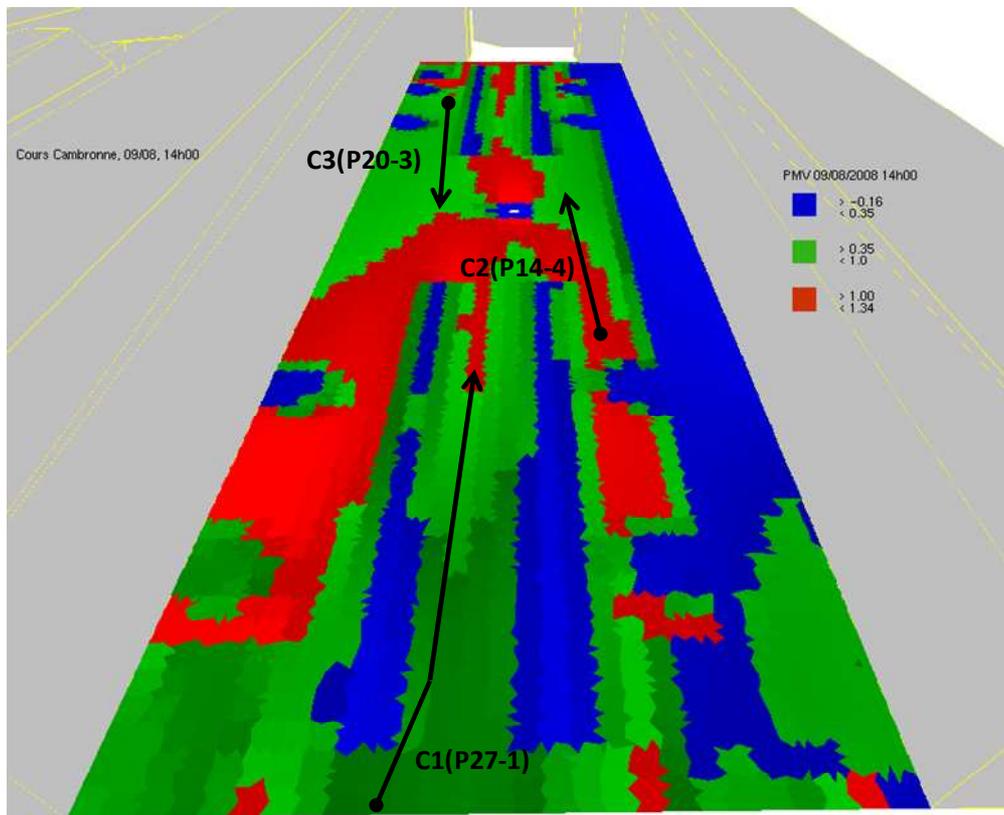


Figure 49. Visualisation des portions de parcours « éléments centraux » des classes (classification relative au PMV)

7.7. Mise en correspondance entre données microclimatiques et données comportementales

L'objectif à ce stade est d'étudier les relations entre, d'une part, les facteurs physiques : « vitesse du vent » et *PMV* et, d'autre part, les variables comportementales : « nombre d'arrêts », « durée moyenne des arrêts », « vitesse moyenne de déplacement », « durée de parcours » et « longueur de parcours ». Pour ce faire, nous proposons une analyse se déployant selon deux approches de mise en correspondance.

La première approche consiste à quantifier la relation entre les indicateurs caractéristiques des facteurs physiques et les variables comportementales, et ce, par l'intermédiaire du calcul des coefficients de corrélation entre ces deux catégories de variables.

Dans la seconde approche d'analyse nous avons recours à une mise en correspondance entre les classes de portions de parcours obtenues suite à l'application des méthodes de classification et de qualification, et les variables comportementales. Dans cette approche, nous proposons d'étudier quantitativement et pour chaque classe microclimatique, les caractéristiques comportementales des portions de parcours constituant ces classes.

7.7.1. Analyse corrélacionnelle

En prenant comme points de départ les tableaux présentant les variables caractéristiques des portions de parcours relativement à la « vitesse du vent » (Tableau C.1) et à l'indicateur « *PMV* » (Tableau C.2), nous proposons de procéder, dans une première phase, à une évaluation des coefficients de corrélation (*Pearson*) mettant en correspondance les variables caractéristiques des signaux de la vitesse du vent et les variables comportementales. Ces coefficients sont présentés dans le tableau 29.

Variables	Vitesse	Longueur	Durée	Nb. arrêts	Durée moy. Arrêts
$I_{moy}(Va)$	0,057	-0,212	-0,224	0,027	0,059
$Freq_dep_{5+}(Va)$	0,005	-0,239	-0,240	0,023	-0,012
$Sens\ de\ variation(Va)$	-0,100	0,044	0,063	-0,114	-0,121

Tableau 29. *Matrice de corrélation (Pearson) mettant en correspondance les indicateurs des signaux de la vitesse du vent et les variables comportementales- Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$*

Une première analyse de la matrice de corrélation présentée dans le tableau 29 nous permet de constater que les coefficients ont, pour la plupart, des valeurs faibles. Ces valeurs reflètent, dans le contexte restreint de notre étude de cas, une influence peu significative des caractéristiques du signal relatif à la vitesse du vent sur les comportements tels que nous les avons quantifiés. Nous remarquons, cependant, que les coefficients de corrélation entre, d'une part, les indicateurs I_{moy} et $Freq_dep$ et, d'autre part, les variables comportementales « longueur de parcours » et « durée de parcours » sont significatives malgré leurs valeurs relativement faibles. Ces coefficients sont, de plus, négatifs reflétant une relation de proportionnalité inversée entre les variables.

Ces coefficients pourraient représenter, d'un point de vue comportemental, une légère tendance des piétons à diminuer les temps de parcours ainsi que des distances parcourues lorsque la vitesse moyenne du vent augmente et lorsque celle-ci dépasse une valeur seuil estimée à 5m/s.

En élaborant, de la même façon, la matrice de corrélation entre les variables caractéristiques des signaux relatifs à l'indicateur de confort *PMV* et les variables comportementales (voir tableau 30), nous constatons, là aussi, que les valeurs des coefficients de corrélations sont relativement faibles voire très faibles. Il s'avère donc que dans le contexte de l'étude menée dans le « cours Cambronne » et par rapport à l'échantillon analysé, le confort thermique ne semble jouer qu'un rôle peu important dans la détermination des comportements liés à la mobilité.

Variables	Vitesse	Longueur	Durée	Nb. arrêts	Durée moy. arrêts
$I_{moy}(PMV)$	0,061	0,339	0,327	-0,076	-0,157
$Freq_dep_{1+}(PMV)$	0,020	0,214	0,210	-0,043	-0,104
Sens de variation (PMV)	0,075	0,119	0,116	0,027	0,053

Tableau 30. Matrice de corrélation (Pearson) mettant en correspondance les indicateurs des signaux du PMV et les variables comportementales- Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$

Notons, tout de même, qu'une corrélation significative existe entre le couple d'indicateurs caractéristiques du signal du PMV (I_{moy} , $Freq_dep$) et le couple de variables comportementales (Longueur du parcours, Durée du parcours). Contrairement au cas de la variable microclimatique « vitesse du vent », cette corrélation est, dans ce cas, positive reflétant une certaine tendance des piétons à augmenter la durée passée sur les parcours ainsi que la distance parcourue, lorsque les valeurs moyennes du PMV augmentent et dépassent un seuil de confort thermique fixé à $PMV=1$. Nous pouvons considérer cette tendance comme étant à l'inverse de ce à quoi nous aurions pu nous attendre. En effet, dans une ambiance thermique relativement chaude telle que celle caractérisant la période pendant laquelle s'est déroulée la session d'observation ($T=22,5^{\circ}C$), nous aurions pu nous attendre à ce que les piétons aient plutôt tendance à privilégier des valeurs du PMV relativement moins élevées et proche du niveau de neutralité thermique ($PMV=0$)³⁴.

7.7.2. Analyse des classes de portions de parcours

La seconde analyse que nous proposons concerne les classes de portions de parcours obtenues suite à l'application de la méthode de classification automatique (CAH) puis à la méthode de qualification des classes.

7.7.2.1. Analyse de classes relativement à la « vitesse du vent »

Dans un premier lieu, nous dressons le tableau mettant en correspondance, d'une part, les classes de portions de parcours relatives à la vitesse du vent et, d'autre part, la description statistique des données comportementales issues des observations (voir tableau 31). Ce tableau est censé nous servir de support en vue d'identifier des particularités d'ordre comportemental caractérisant les classes.

³⁴ Notons que les valeurs moyennes du PMV (I_{moy}) calculées le long des parcours, dans le contexte des observations effectuées le 9 août 2008 entre 14h et 16h, sont comprises entre 0.1 et 1.2 (voir tableau 23)

	C₃₃₂	C₃₂₁	C₂₁₂	C₂₁₃	C₃₃₃
Description des classes	<ul style="list-style-type: none"> • Intensité moyenne élevée • Fréq. de dépassement du seuil de confort élevée • Signal constant 	<ul style="list-style-type: none"> • Intensité moyenne élevée • Fréq. de dépassement du seuil de confort modérée • Signal décroissant 	<ul style="list-style-type: none"> • Intensité moyenne modérée • Fréq. de dépassement du seuil de confort faible • Signal constant 	<ul style="list-style-type: none"> • Intensité moyenne modérée • Fréq. de dépassement du seuil de confort faible • Signal croissant 	<ul style="list-style-type: none"> • Intensité moyenne élevée • Fréq. de dépassement du seuil de confort élevée • Signal croissant
Variables comportementales					
Nombre de portions	12	15	118	31	14
Nombre total arrêts	2	3	15	3	0
Nb moyen d'arrêts par portion	0,17	0,2	0,13	0,09	0
Durée moy. des arrêts (s)	23	29,67	22,25	19	0
Vitesse moyenne (m/s)	1,22	1,27	1,20	1,17	1,13
Longueur moyenne des portions de parcours (m)	10,15	21,19	32,64	29,49	20,30
Durée moyenne des portions parcours (s)	8,63	17,06	27,73	25,59	18,32

Tableau 31. *Mise en correspondance entre les classes liées à la vitesse du vent et les données comportementales*

Le premier élément intéressant à relever est la cardinalité des classes en termes de nombre de portions. Nous remarquons, en effet que la classe **C₂₁₂** est relativement surreprésentée (118 portions) alors que d'autres classes tels que **C₃₃₂**, **C₃₂₁** et **C₃₃₃** sont bien moins représentées.

La classe **C₂₁₂** est caractérisée par une intensité moyenne modérée de la vitesse du vent, une fréquence de dépassement du seuil d'inconfort (5 m/s) faible et un signal qui dans sa forme globale garde une allure constante. Nous pouvons donc admettre que cette classe représente les parcours et les portions de parcours vérifiant les critères du confort aéralique.

Nous pouvons aussi être tentés de penser que la cardinalité relativement importante de cette classe pourrait traduire une préférence des piétons à la qualité microclimatique (en l'occurrence aéralique) des portions de parcours que regroupe cette classe. D'autant plus que les classes **C₃₃₂**, **C₃₂₁** et **C₃₃₃** que nous pouvons considérer comme inconfortables du point de vue aéralique (intensité moyenne élevée, fréquence de dépassement du seuil d'inconfort modérée ou élevée) possèdent une faible cardinalité pouvant laisser penser que les piétons auraient volontairement évité d'emprunter les parcours susceptibles d'appartenir à ces classes.

Cette analyse, même si elle pourrait être en partie vraie, doit être relativisée. En effet, la surreprésentation de la classe **C₂₁₂** pourrait aussi s'expliquer par la forte proportion des zones de valeurs à faible intensité et à intensité modérée. Une proportion bien plus importante que celle des zones d'intensité élevée (Figure 48), ce qui, d'ailleurs, pourraient expliquer la faible représentation des classes **C₃₃₂**, **C₃₂₁** et **C₃₃₃**.

Cette analyse portant sur les cardinalités des classes microclimatiques pourrait donc être plus pertinente si une hétérogénéité des cardinalités des classes est constatée au même moment où une homogénéité de la répartition spatiale des zones de valeurs microclimatiques est constatée.

Concernant le nombre et la durée des arrêts, l'analyse du Tableau 31 nous permet d'identifier le fait que les portions de parcours de la classe C_{333} n'ont fait l'objet d'aucun arrêt de piétons contrairement aux portions des autres classes. On pourrait là aussi être amenés à penser que la classe C_{333} , caractérisée par des valeurs importantes de la vitesse du vent et qui, de plus, représente des portions à signal croissant, n'a pas fait l'objet d'arrêts du fait de ses caractéristiques aérodynamiques inconfortables. Cependant, même si cette information semble intéressante, elle est aussi à prendre avec précaution du fait de la faible proportion des zones à valeurs élevées comparativement aux autres zones de valeurs faibles.

Notons, ensuite, que la vitesse de déplacement moyenne, du moins telle qu'elle a été modélisée dans notre étude, ne semble pas constituer une information pertinente. Nous nous sommes en effet retrouvés avec des classes de portions de parcours ayant quasiment toutes les mêmes moyennes de vitesses. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que nous attribuons la même valeur de vitesse à toutes les portions d'un même parcours car ne disposant que de l'information temporelle relative au début et à la fin du parcours.

Enfin, concernant les longueurs et les durées passées sur les portions de parcours, nous constatons que les piétons parcourant les portions appartenant aux classes caractérisées par des intensités élevées (C_{332} , C_{321} et C_{333}), ont tendance à emprunter des portions plus courtes et qui, par conséquent, durent moins de temps que les portions de parcours appartenant aux classes à intensité modérée (C_{212} , C_{213}).

Ceci pourrait se traduire par le fait que les piétons ont tendance à raccourcir les distances parcourues lorsqu'ils sont confrontés à des conditions de gêne liées aux fortes intensités du vent. Mais là aussi, ce résultat pourrait être très lié au fait que les zones ayant des valeurs de la vitesse du vent élevées soient, dans cette étude de cas, moins représentées que les zones à valeurs modérées et faibles.

7.7.2.2. Analyse des classes relativement à l'indicateur *PMV*

De la même manière que pour l'analyse comportementale des classes relatives à la vitesse du vent, nous proposons un tableau croisant, d'une part, les données liées à la classification menée sur les signaux du *PMV* et d'autre part, les données comportementales dont la description statistique est donnée pour chaque classe (voir tableau 32).

	C₅₂₂	C₅₃₂	C₄₁₂
Description des classes	<ul style="list-style-type: none"> • Légèrement chaud • Fréq. de dépassement du seuil de confort modérée • Signal constant 	<ul style="list-style-type: none"> • Légèrement chaud • Fréq. de dépassement du seuil de confort élevée • Signal constant 	<ul style="list-style-type: none"> • Neutre (équilibre énergétique) • Fréq. de dépassement du seuil de confort faible • Signal constant
Variables comportementales			
Nombre de portions	37	56	46
Nombre total arrêts	4	8	11
Nb moyen d'arrêts par portion	0,11	0,14	0,24
Durée moy. Arrêts (s)	20,5	18,14	22,91
Vitesse moyenne (m/s)	1,17	1,17	1,15
Longueur moyenne des portions de parcours (m)	40,87	47,88	25,20
Durée moyenne des portions de parcours (s)	35,09	40,03	22,37

Tableau 32. *Mise en correspondance entre les classes liées à l'indicateur de confort PMV et les données comportementales*

En analysant le Tableau 32, nous constatons, tout d'abord, que contrairement à l'analyse précédente, il n'y a pas de classes sur/sous-représentées. Nous aurions pourtant pu nous attendre à ce que la classe **C₄₁₂** des portions classifiées comme étant neutres du point de vue du confort thermique *PMV*, soit surreprésentée.

Toutefois, la classe **C₄₁₂** présente un nombre total d'arrêts (11), un nombre moyen d'arrêts par portion (0,24) ainsi qu'une durée moyenne des arrêts (22,91 s) plus importante que pour les deux autres classes : **C₅₂₂** et **C₅₃₂** (caractérisées par une sensation thermique de chaud léger et par une fréquence de dépassement du seuil d'inconfort respectivement modérée et élevée). Nous estimons que ce résultat reflète le fait que les piétons peuvent être amenés à arrêter leur marche pour profiter de l'environnement visuel ou microclimatique lorsque les conditions de confort, notamment thermique, le permettent. Il faudrait dans ce cas qu'ils soient dans une situation de marche récréative plutôt que fonctionnelle.

Enfin, notons que par rapport à l'analyse du Tableau 32, et comme pour le précédent tableau, les informations relatives à la vitesse ne permettent de procéder à aucune interprétation. Alors que les informations sur les longueurs et moyennes des portions de parcours sont à l'inverse de ce que nous aurions pu attendre, dans le sens où les portions de la classe **C₄₁₂** sont globalement les plus courtes comparativement aux portions de parcours des deux autres classes.

7.8. Synthèse intermédiaire

Nous avons essayé dans ce chapitre de mettre en œuvre la méthode que nous avons proposée pour l'étude de l'influence des facteurs microclimatiques, particulièrement la vitesse du vent et le confort thermique, sur la mobilité des piétons.

Notre but, par l'intermédiaire de cette mise en œuvre, n'était pas tant de pouvoir disposer *in fine* de résultats significatifs concernant la relation entre l'environnement microclimatique et la pratique de la marche, mais plutôt de montrer la capacité de notre méthode à être appliquée sur un cas d'étude réel.

Nous avons, en effet, pu mettre en évidence la pertinence de la technique de la double caractérisation microclimatique et comportementale qui permet de disposer pour une même catégorie (classe) de parcours à la fois de données microclimatiques et comportementales, permettant ainsi de procéder à la mise en correspondance des deux catégories de données.

L'étude de cas que nous avons menée, a permis d'identifier quelques relations intéressantes notamment entre certains aspects liés au confort thermique et des aspects comportementaux tels que le nombre des arrêts effectués pendant le parcours ainsi que leurs durées. Il n'est cependant pas possible de tirer de conclusion sur l'effet direct d'un facteur ou de la combinaison de facteurs microclimatiques sur les comportements piétonniers.

Nous estimons que des résultats plus significatifs pourraient être obtenus si une mise en œuvre de notre méthode est menée sur des cas d'étude de plus grande envergure offrant une plus grande variété de situations, en multipliant les sites d'étude et en faisant appel à des techniques d'observation plus précises telles que le suivi automatique de piéton (tracking) permettant de disposer d'un nombre très importants de parcours et de données comportementales grâce à l'automatisation de la procédure de recueil des trajectoires.

Conclusion de la deuxième partie

Cette seconde partie nous a permis de présenter la méthodologie que nous avons élaborée afin de coupler des données microclimatiques et des données relatives au comportement piétonnier.

Cette proposition méthodologique s'articule autour de deux phases. La première phase aborde la caractérisation des parcours piétonniers du point de vue de leurs caractéristiques microclimatiques. Lors de cette phase, nous nous sommes basés sur la simulation numérique des phénomènes physiques ainsi que sur des techniques d'analyse du signal et de classification des données.

Le recours à la simulation numérique des données microclimatiques lors de cette phase est justifié par le fait que nous souhaitons disposer d'une estimation des conditions microclimatiques au niveau de la globalité de l'espace susceptible d'être occupé par les piétons en déplacement. Soulignons qu'une telle opération aurait été difficile à mener avec des outils de mesure classiques. En outre, les logiciels de simulation auxquels nous avons eu recours (SOLENE et ENVI-MET) sont des outils de simulation validés, ayant chacun fait l'objet de diverses publications et ayant servi de support à plusieurs études, notamment à des études ayant porté sur l'évaluation du confort.

La seconde phase consiste en une caractérisation des parcours du point de vue des comportements observés *in situ*. Afin de disposer des données comportementales nous nous sommes appuyés sur l'analyse d'enregistrements vidéo.

Le choix technique de l'observation lors de cette deuxième phase est motivé par notre objectif d'examiner l'influence des stimuli physiques sur les comportements piétonniers et non sur l'appréciation subjective des individus sur leur perception sensible et sur leur comportement. Ce choix d'analyser les comportements effectifs, et non ici leurs représentations subjectives, est selon nous d'autant plus justifié que le rôle que peuvent jouer certains facteurs microclimatiques serait plus de l'ordre de stimulations subliminales intervenant de manière inconsciente que de l'ordre d'une évaluation consciente de ces stimuli entraînant une décision consciente.

Sur le plan méthodologique, on pourrait nous objecter qu'en utilisant une technique d'observation, le problème de l'appréciation subjective pourrait être transféré de l'utilisateur enquêté à l'observateur. Pour minimiser un tel biais, nous avons essayé de mettre en place des techniques de quantification systématique (sous forme de variables caractéristiques) des phénomènes comportementaux observés.

Dans cette seconde partie du manuscrit, nous avons également présenté une mise en œuvre pratique de la méthode proposée sur un site urbain particulier : le cours Cambronne à Nantes. L'objectif de cette mise en œuvre n'est pas tant d'aboutir à une évaluation précise de la relation entre les données microclimatiques et le comportement piétonnier, que de mettre en évidence la capacité de la méthode que nous proposons, à rendre compte des caractéristiques microclimatiques et comportementales analysées au niveau des cheminements piétonniers.

Insistons cependant sur le fait que la méthode que nous proposons n'est pas propre au site particulier, le cours Cambronne, dans lequel a été effectuée l'étude de cas. Au contraire, elle est conçue pour être appliquée dans différents contextes géographiques. L'utilisation de cette méthode dans différents sites permettrait de constituer une importante base de données, permettant de préciser et d'affiner le modèle microclimatique dynamique intervenant dans les parcours piétonniers en milieu urbain. D'autre part, la même démarche pourrait être réutilisée pour étudier des facteurs environnementaux autres que microclimatiques, des facteurs, tels que les facteurs visuels, qu'il serait possible de mesurer ou simuler le long des parcours. On pourrait, par exemple, imaginer d'appliquer la même démarche pour analyser l'influence de la variation du facteur « ouverture du ciel » (Sarradin, 2004) le long des parcours sur le comportement piétonnier en termes de choix d'itinéraires

L'autre objectif inhérent à ce travail est de proposer un outil informatique fédérant, à l'image d'un SIG, des données provenant de différentes sources et dédié à l'analyse de signaux physiques le long des parcours. Nous estimons qu'un tel outil pourrait intéresser les aménageurs des espaces urbains qui seraient soucieux d'analyser l'impact de leurs projets sur la qualité environnementale des parcours pouvant être empruntés par les usagers.

Conclusion générale et perspectives

Nous avons abordé dans ce travail de thèse une question rarement traitée jusqu'à maintenant, la question de l'influence des facteurs microclimatiques sur le comportement piétonnier. Il a fallu, pour mener à bien ce travail, avoir recours à la « psychologie environnementale »³⁵, une discipline qui traite des différents aspects de la relation entre l'homme et son environnement.

En abordant l'influence des facteurs microclimatiques sur le comportement piétonnier, et particulièrement la marche en milieu urbain, nous avons voulu contribuer à une réflexion nécessaire sur les moyens d'intégration des éléments concernant l'individu, comme sa perception, et l'usage qu'il fait de l'espace, dans les préoccupations concernant la conception et l'aménagement des espaces urbains.

En effet, comme nous l'avons déjà signalé, on note chez les professionnels un intérêt croissant pour mieux prendre en compte les caractéristiques de l'environnement construit susceptibles d'influer sur les usages et le confort des habitants. Au cours de ces dernières années, ces préoccupations ont suscité le développement d'études prenant en compte les dimensions esthétiques des espaces, mais également la façon dont les propriétés morphologiques de ces espaces, en interaction avec le climat, affectent le confort et les pratiques des usagers. Cette problématique n'intéresse pas uniquement les aménageurs et les concepteurs des espaces urbains, elle interpelle aussi les professionnels de la santé, des transports ou du développement durable, qui essaient de proposer des solutions pour que l'environnement urbain contribue à favoriser la pratique de la marche à pieds et à limiter l'utilisation des modes de transports motorisés.

La démarche entreprise dans le cadre de ce travail de thèse s'inscrit dans les préoccupations actuelles et participe aux courants de recherche en émergence portant sur l'étude de l'impact de l'environnement physique sur les pratiques piétonnes et sur le confort des usagers des espaces urbains. En effet, nous avons proposé une méthode d'analyse de la qualité environnementale des cheminements piétonniers et du comportement des piétons se déplaçant dans un espace urbain.

Les facteurs environnementaux que nous avons abordés dans cette étude représentent le résultat de l'interaction entre l'environnement construit et le climat à une échelle qualifiée de microclimatique. Soulignons que cette échelle est particulièrement pertinente pour l'analyse du déplacement piétonnier. En effet, elle se situe au niveau de l'espace sensible dans lequel est immergé le piéton au cours de son déplacement et à partir duquel il peut décider d'infléchir ou modifier son parcours. Les facteurs microclimatiques font partie de la dimension physique et objective de la notion d'Ambiance abordée dans la première partie de ce manuscrit. Une notion qui intègre aussi des aspects sensibles liés aux formes perçues et représentées, et qui reflète la complexité de la relation entre l'homme et son environnement.

³⁵ Étant informaticien de formation, cette discipline m'était totalement nouvelle.

Par ailleurs, différentes méthodes de recueil et d'analyse des données physiques ont été abordées. Parmi ces méthodes, nous nous sommes surtout intéressés à celles basées sur la simulation numérique des phénomènes physiques. En effet, ces méthodes permettent de disposer d'une estimation des conditions microclimatiques et du confort au niveau d'une multitude de points de l'espace contrairement à des techniques de mesure pouvant s'avérer difficile à mettre en œuvre (coûts, calibrage, synchronisation..).

Notons cependant que les procédures de simulation des phénomènes physiques en milieu urbain nécessitent de prendre des précautions, essentiellement, lors de la modélisation 3D de l'environnement urbain ainsi que lors de la définition des conditions initiales.

Quant aux méthodes d'analyse des données physiques, elles se déclinent en deux catégories. La première catégorie concerne les méthodes d'analyse « statiques » se basant sur une cartographie des données physiques comme support d'analyse et destinées en premier lieu à des analyses spatiales des facteurs physiques des ambiances. La deuxième catégorie est celle des méthodes d'analyse « dynamiques » ayant recours aux cheminements piétonniers comme support d'analyse.

Cette deuxième catégorie d'analyses nous a inspirés aussi bien lors de la définition de la problématique de la thèse que lors de la mise en place notre approche exploratoire pour l'analyse de l'impact des facteurs microclimatiques sur la mobilité piétonne. En effet, cette technique s'inscrit dans la perspective de proposer des solutions aux concepteurs pour une meilleure prise en considération des aspects perceptifs et sensibles lors de l'aménagement des espaces urbains. Nous avons ainsi considéré le parcours et le signal physique perçu le long de ce parcours sont des éléments pertinents pour une analyse spatiale des facteurs physiques de l'environnement dans un contexte urbain.

Nous avons aussi évoqué diverses méthodes de recueil des données subjectives relatives à l'évaluation par l'individu de son environnement. Nous avons, par exemple, abordé la méthode des parcours commentés pour le recueil des impressions des usagers sur la qualité de leur environnement immédiat. Ensuite, lors de la présentation des modèles de confort, nous avons eu l'occasion de nous intéresser à l'approche psychologique pour l'évaluation du confort, basée sur la prise en compte des appréciations des piétons vis-à-vis de leur environnement thermique.

Ces méthodes de recueil, même si elles peuvent s'avérer efficaces dans certains contextes, semblent être inadaptées dans le contexte d'une étude telle que la notre. En effet, des décalages sont souvent observés entre les propos rapportés et la réalité. Des décalages notamment dus à la capacité de l'individu à s'adapter à l'environnement urbain et aux fluctuations plus ou moins importantes des stimuli physiques. Nous avons, par ailleurs, signalé que ces stimuli, de par leur faible intensité, sont susceptibles d'influer de manière inconsciente sur le processus de prise de décision. Ceci explique le fait que nous avons privilégié une approche de recueil basée sur l'observation du comportement.

Nous nous sommes ainsi focalisés sur les manifestations externes de l'organisme pour tenter d'appréhender l'influence des caractéristiques du contexte microclimatique, même si nous sommes parfaitement conscients du rôle majeur que peuvent jouer les facteurs personnels (expérience, besoins, attentes...) dans le processus décisionnel. L'hypothèse principale sur laquelle repose notre approche présume que les piétons peuvent être amenés, dans certains contextes tels qu'un contexte de marche récréative, à infléchir et ajuster leurs parcours par rapport à leur confort.

Ce que nous avons retenu, par ailleurs, de l'étude bibliographique, c'est qu'une multitude de facteurs, propres au milieu urbain, agissent sur l'individu, sa perception, son évaluation, ses attitudes... Cependant, il est difficile d'établir comment et dans quelle mesure notre environnement affecte nos pratiques et nos perceptions. En effet, les transactions qui s'établissent entre l'environnement urbain et le comportement et les perceptions des usagers lors d'un déplacement piétonnier, fait intervenir une multitude de facteurs et de paramètres physiques, sociologiques ou psychologiques qui interagissent les uns avec les autres ; il est donc particulièrement délicat de tenter de contrôler un ensemble de variables en interaction afin d'évaluer le rôle spécifique d'une dimension particulière comme le contexte microclimatique.

La complexité de ces phénomènes nous a amenés à simplifier nos questions. Ainsi la démarche analytique que nous avons proposée dans la seconde partie du rapport a consisté à mettre en place des indicateurs simples caractérisant le comportement en relation avec des indicateurs caractéristiques des signaux représentant les stimuli physiques perçus le long des parcours.

La technique de caractérisation des parcours du point de vue des facteurs microclimatiques et du confort constitue notre principale contribution. Un outil informatique dédié à cette caractérisation a été développé dans le contexte de cette étude. Cet outil permet d'analyser un ensemble de parcours (observés) par rapport aux signaux représentant l'évolution des caractéristiques microclimatiques et de confort le long de ces parcours.

L'analyse de ces signaux a permis de calculer des indicateurs quantitatifs relatifs à la forme des signaux, à leur variation et à leur intensité. Nous avons procédé ensuite à une classification permettant d'identifier des classes de signaux, où chaque classe contient des signaux considérés comme étant proches au sens d'une mesure de similarité. Enfin, la dernière étape de cette procédure nous a permis de qualifier chacune de ces classes microclimatiques. L'idée étant de mettre en correspondance des classes microclimatiques correspondant à des sections de parcours avec les données comportementales observées sur ces sections de parcours ou à leurs articulations.

Cette méthode d'analyse a fait l'objet d'une mise en œuvre *in situ* au cours Cambronne à Nantes. Cette mise en œuvre n'avait pas pour objectif de confirmer qu'il y ait ou non, une influence directe du microclimat sur les comportements liés à la marche en espace public, il aurait fallu pour cela un nombre beaucoup plus conséquent d'observations et par ailleurs la répétition des observations dans différents sites. Cependant, cette mise en œuvre a permis de montrer que la méthode était applicable à une situation réelle et de donner un aperçu des possibilités que cette méthode est susceptible d'offrir, notamment, pour identifier des stabilités dans la relation entre une catégorie microclimatique des parcours et les caractéristiques comportementales qui lui sont associées.

A travers l'application de la méthode d'analyse nous avons pu identifier certaines limites de celle-ci, et ce, essentiellement au niveau technique.

Ces limites concernent d'abord la méthode de caractérisation microclimatique des parcours qui s'est avérée être très dépendante des techniques d'analyse adoptées : transformée en ondelettes des signaux, segmentation, classification ascendante hiérarchique..., et plus particulièrement des différents seuils de décision choisis : seuil de sélection des coefficients d'ondelettes, sélection du nombre de classes, les différents seuils de qualification des classes de parcours...

Les limites concernent, d'autre part, la méthode d'analyse comportementale dans laquelle nous avons été amenés à mettre en place des variables caractéristiques des différents aspects comportementaux observés lors du déplacement des piétons. C'est ainsi que nous avons constaté qu'une vitesse de déplacement calculée sur la totalité du parcours ne permettait pas de procéder à une analyse efficace liée à cette variable. Cette variable est pourtant importante dans les études portant sur les déplacements piétonniers et nécessiterait d'être évaluée avec plus de précision (variation de la vitesse de long du parcours, identification des points d'accélération et de décélération). Ces limites nous amènent à évoquer les perspectives possibles de ce travail et des améliorations pouvant être apportées de manière à rendre encore plus précise l'analyse de l'impact du microclimat sur le comportement piétonnier.

Les perspectives envisagées pour ce travail concernent des aspects techniques et des aspects liés à la recherche.

Concernant les aspects techniques, nous estimons qu'il serait intéressant d'explorer le recours à des méthodes de suivi en temps réel des piétons, afin de disposer d'informations sur leurs cheminements encore plus précises que ce que permet une procédure d'observation par enregistrements vidéo. Cela permettrait notamment de disposer d'une information temporelle plus complète sur les parcours. En conséquence, des données précises sur les vitesses de déplacement et les variations de celles-ci au cours d'un même parcours, pourraient être obtenues.

On pourrait aussi envisager que cette méthode soit appliquée dans différents sites urbains, des sites qui pourraient être plus riches en termes de configurations microclimatiques, de situations urbaines et de choix (opportunités) d'itinéraires possibles. Ces variations au niveau des conditions d'observation permettraient, d'une part, de pouvoir associer les observations à des protocoles de quasi-expérimentation qui permettraient de comparer les comportements dans des situations variant selon une composante (variable) particulière (la vitesse du vent ou la température par exemple) tout en essayant d'appareiller ces situations sur leurs autres composantes.

Variation des conditions d'observation permettrait, d'autre part, de disposer d'un plus grand nombre de parcours à analyser. Une analyse statistique prendrait, dans ce cas, tout son sens.

Du point de vue de la mise en œuvre informatique de la méthode d'analyse proposée, nous estimons qu'il serait intéressant d'explorer la possibilité d'implémenter les différentes phases de la méthode d'analyse au niveau d'un véritable système d'information géographique (SIG) capable de fédérer différentes sources de données et d'appliquer divers traitements sur ces données tout en étant pourvu d'un moteur graphique permettant une restitution très précises des informations spatio-temporelles. A ce sujet, nous avons récemment entrepris un travail de recherche (Zaki et al., 2010)³⁶ visant à modéliser tous les concepts impliqués dans la méthode d'analyse des parcours et à les implémenter dans un SIG (OrbisGIS) développé au sein de l'IRSTV³⁷.

³⁶ Zaki, C., Zekri, E., Servièrès, M., Moreau, G. & Hégron, G. (2010). Urban Spatiotemporal Data Modeling: Application to the Study of Pedestrian Walkways. in : Gloria Phillips-Wren; Lakhmi C. Jain; Kazumi Nakamatsu & Robert J. Howlett, (ed.). *Advances in Intelligent Decision Technologies* : Springer. pp. 549-558.

³⁷ Institut de recherche en sciences et techniques de la ville. Fédération de recherche CNRS 2488 (www.irstv.cnrs.fr).

Du point de vue des perspectives liées aux domaines de la recherche, nous estimons qu'il serait intéressant d'enrichir la phase de caractérisation des parcours en intégrant de nouvelles variables relatives aux effets lumineux, paysagers, sonores, etc. L'analyse de ces facteurs permettrait d'explorer d'autres composantes des ambiances physiques qui sont susceptibles d'avoir une influence sur la perception et le comportement des usagers.

Par ailleurs, les données qualitatives liées à l'évaluation subjective de la qualité de l'environnement par les usagers (qui n'ont pas été intégrées dans la méthode d'analyse que nous avons proposée) pourraient venir compléter le travail que nous avons entrepris. En effet, ces informations, pouvant être recueillies par des questionnaires ou encore par l'intermédiaire de la méthode des parcours commentés, pourraient fournir des explications à certaines attitudes et comportements associés à la qualité de l'environnement. Les ambiances pourraient, ainsi, être explorées à travers, aussi bien, leurs formes physiques et sensibles que leurs formes représentées.

Ces perspectives montrent que ce domaine de recherche émergent offre de nouveaux développements possibles et de nouvelles pistes de recherches que nous avons modestement essayé d'explorer dans ce travail. Nous estimons qu'il continuera à connaître un fort intérêt aussi bien de la part des chercheurs que de la part des professionnels de l'aménagement du territoire, des architectes, etc., particulièrement dans le contexte actuel de l'émergence des préoccupations environnementales et du développement durable.

Annexes

Annexe A : La théorie Space Syntax

Les fondements de la théorie Space Syntax (Hillier & Hanson, 1984) se résument dans l'hypothèse que l'architecture du réseau urbain (d'un point de vue géométrique et topologique) représente l'aspect le plus important dans le façonnement des modèles de la mobilité pédestre.

D'autre part, la théorie Space Syntax décrit et mesure quantitativement les propriétés relationnelles et « syntaxiques » d'un espace urbain. De telles propriétés relationnelles reposent sur des hypothèses stipulant qu'« un grand champ de vision, peu de changements de direction, une connectivité importante et une grande capacité à atteindre des points à partir de chaque autre point de l'espace », sont des propriétés appréciées par le piéton.

D'un point de vue méthodologique, afin d'extraire les mesures quantitatives syntaxiques, la structure spatiale des rues est d'abord transcrite en une représentation appelée « carte axiale ». Cette « carte axiale » est un réseau de lignes interconnectées qui représentent les plus importants champs de vision contenus dans l'environnement urbain (voir Figure A.1). Intuitivement, deux individus situés de part et d'autre d'une ligne de la « carte axiale » sont capables de se voir mutuellement.

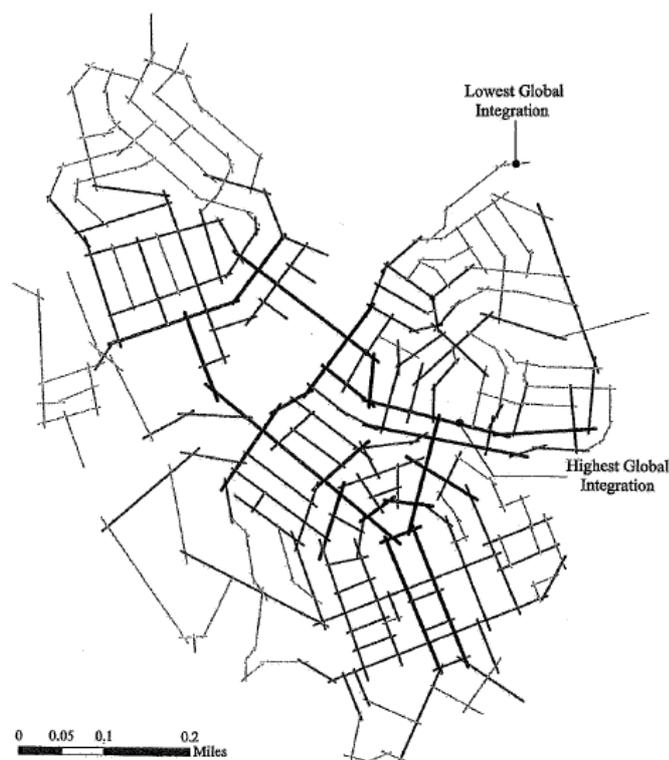


Figure A.1 - Carte axiale – Indicateur d'intégration globale (Baran et al., 2008)

Le choix d'une telle représentation de l'espace est motivé par le fait que les changements de direction et la présence de rues qui s'entrecoupent sont susceptibles d'affecter le sens de l'orientation de l'individu.

Mais surtout, les lignes de la « carte axiale » servent à calculer un certain nombre d'« indicateurs syntaxiques » liés aux propriétés de l'espace. Chaque indice (ou mesure) est affecté à chaque ligne de la « carte axiale ». Ces indicateurs sont :

- La connectivité d'une ligne : c'est le nombre de lignes qui lui sont directement connectées.
- Le contrôle d'une ligne : cet indicateur représente le degré d'importance d'une ligne pour accéder aux lignes voisines. Une valeur relativement grande du « contrôle » d'une ligne reflète le rôle important, voire nécessaire, que joue cette ligne vis-à-vis de l'accès aux lignes avoisinantes. Cet indicateur prend en compte la connectivité de la ligne concernée ainsi que les connectivités des lignes avoisinantes.
- L'intégration d'une ligne: c'est un indicateur décrivant la facilité (ou la difficulté) pour quelqu'un d'atteindre une ligne (rue) spécifique de la « carte axiale ». Mathématiquement, l'intégration d'une ligne est fonction du nombre de lignes qui doivent être traversées par quelqu'un se déplaçant à partir de chaque ligne de la « carte axiale » pour atteindre la ligne en question. Plus la valeur de l'intégration d'une ligne est grande, moins le nombre de connexions nécessaires afin d'y accéder sont nombreuses.
- L'intégration se décline en une intégration globale (en termes d'accès à la ligne à partir de toutes les autres lignes du réseau) et en une intégration locale (en termes d'accès à partir des lignes situées sur un rayon donné).

Annexe B : Comparaison entre données simulées et données réelles le long d'un parcours

Afin de nous assurer de la fiabilité des approches barycentriques et surfaciques et dans la perspective d'identifier quelle méthode d'extraction des données est la plus performante, nous avons procédé à une comparaison entre les résultats obtenus par ces deux méthodes d'interpolation et des résultats provenant de mesures réelles effectuées *in situ*.

Le facteur physique de l'environnement ayant servi dans cette comparaison est le facteur de l'éclairement mesuré en Lux (lx) par un luxmètre. En effet, ce facteur est l'un des facteurs les plus simples à simuler puisque ne dépendant que de la morphologie de l'espace urbain, de l'heure de simulation et de la nébulosité du ciel. D'autres facteurs comme la température sont plus complexes à simuler. Celle-ci est liée, à la fois, à la vitesse de l'air et à la température des façades et du sol.

Afin de géolocaliser les points de mesures, un appareil GPS a aussi été utilisé. Ainsi, la base de données des mesures réelles obtenues est un ensemble de points géolocalisés le long de parcours, où à chaque point correspond une mesure liée à l'éclairement.

La figure suivante (voir Figure B.1) représente des signaux décrivant l'évolution du facteur physique « éclairement » le long d'un parcours. Parmi ces signaux, deux sont issus de l'application des méthodes d'extraction présentées précédemment, et un signal provient de mesures réelles *in situ*.

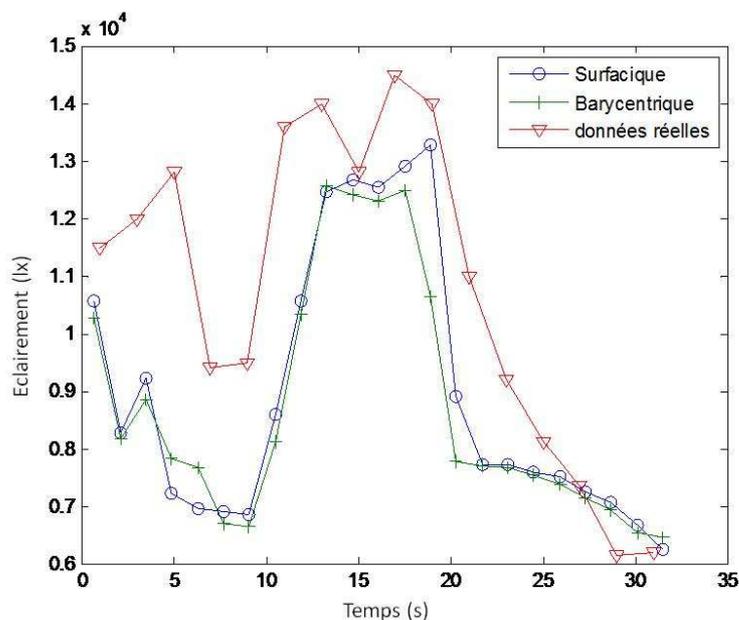


Figure B.1 - Signaux simulés et signal réel représentant l'évolution de l'éclairement le long d'un parcours

Les taux d'erreur calculé entre le signal issu des mesures réelles et le signal produit par la méthode barycentrique est de 17,76%. Quant à l'écart entre le signal réel et le signal issu de la méthode surfacique, il est de 15,90%.

Les écarts entre les courbes des données simulées et la courbe des données réelles s'expliquent, en premier lieu, par les approximations qui existent au niveau du modèle urbain tridimensionnel et plus exactement au niveau de la modélisation du milieu bâti (hauteurs des bâtiments, détails d'aménagement, etc.) et de la modélisation des arbres. Ces écarts pourraient s'expliquer aussi par les erreurs de géolocalisation pouvant atteindre plusieurs mètres (de 2 à 12 mètres selon le appareils). Cependant, et malgré ces écarts, nous pouvons estimer que le signal « virtuel » calculé au moyen de chacune des deux méthodes d'extraction des données physiques à partir du modèle informé, est fiable.

La méthode surfacique semble être légèrement plus fiable que la méthode barycentrique, mais elle présente l'inconvénient d'être plus complexe à implémenter et plus exigeante que la méthode barycentrique en termes de temps d'exécution.

Annexe C : Résultats de la caractérisation microclimatiques et comportementale des portions de parcours

Dans le contexte de l'étude de cas (cours Cambronne) du Chapitre 7, les deux tableaux suivants présentent les résultats du calcul des indicateurs caractéristiques du signal et les variables comportementales pour les parcours observés et segmentés en portions.

Les résultats sont présentés relativement à une analyse effectuée :

- 1) du point de vue de la variable « vitesse du vent » (voir Tableau C.1) ;
- 2) du point de vue de l'indicateur de confort *PMV* (voir Tableau C.2).

<i>Parcours-Portion</i>	<i>Caractéristiques du signal « vitesse du vent »</i>			<i>Caractéristiques comportementales évaluée sur les portions de parcours</i>				
	<i>I_{moy}</i>	<i>Freq_{dep5+}</i>	<i>SV</i>	<i>Vitesse</i>	<i>Longueur</i>	<i>Durée</i>	<i>Nb. arrêts</i>	<i>Durée moy. Arrêts</i>
P1-1	5,64	1,00	-0,04	0,84	12,6	15,0	0	0
P1-2	3,89	0,11	-0,10	0,84	39,2	46,7	1	30
P1-3	2,84	0,00	-0,02	0,84	16,8	20,0	0	0
P1-4	2,62	0,00	0,03	0,84	22,4	26,7	0	0
P1-5	2,67	0,00	-0,03	0,84	11,2	13,3	0	0
P1-6	2,29	0,00	-0,03	0,84	56	66,7	2	32,5
P1-7	1,97	0,00	0,06	0,84	18,2	21,7	0	0
P2-1	5,48	1,00	-0,01	1,14	12,6	11,1	0	0
P2-2	4,96	0,50	-0,09	1,14	11,2	9,8	0	0
P2-3	3,11	0,00	-0,04	1,14	61,6	54,0	0	0
P2-4	2,71	0,00	-0,06	1,14	16,8	14,7	0	0
P2-5	2,70	0,00	0,00	1,14	74,2	65,1	0	0
P3-1	2,48	0,00	-0,04	1,06	7	6,6	0	0
P3-2	2,41	0,00	0,02	1,06	33,6	31,7	0	0
P3-3	2,52	0,00	0,04	1,06	22,4	21,1	0	0
P3-4	2,14	0,00	-0,08	1,06	28	26,4	0	0
P3-5	2,90	0,00	-0,04	1,06	28	26,4	1	29
P3-6	3,25	0,00	0,04	1,06	56	52,8	1	22
P3-7	4,42	0,20	0,15	1,06	14	13,2	0	0
P4-1	2,68	0,00	0,00	1,24	85,4	68,9	0	0
P4-2	2,59	0,00	-0,03	1,24	16,8	13,5	0	0
P4-3	3,57	0,05	0,06	1,24	61,6	49,7	0	0
P4-4	5,36	1,00	0,04	1,24	9,8	7,9	0	0
P5-1	2,48	0,00	0,02	1,22	63	51,6	0	0
P5-2	2,67	0,00	-0,01	1,22	33,6	27,5	0	0
P5-3	2,98	0,00	0,03	1,22	50,4	41,3	1	15
P5-4	3,46	0,00	0,04	1,22	9,8	8,0	0	0
P6-1	4,65	0,00	-0,03	1,27	7	5,5	0	0

P6-2	4,47	0,00	-0,08	1,27	11,2	8,8	0	0
P6-3	3,60	0,00	-0,09	1,27	16,8	13,2	0	0
P6-4	2,68	0,00	-0,01	1,27	50,4	39,7	0	0
P6-5	2,50	0,00	-0,05	1,27	16,8	13,2	0	0
P6-6	2,76	0,00	-0,01	1,27	72,8	57,3	0	0
P7-1	5,57	1,00	-0,07	1,24	12,6	10,2	0	0
P7-2	4,52	0,13	-0,16	1,24	11,2	9,0	0	0
P7-3	2,75	0,00	-0,03	1,24	56	45,2	0	0
P7-4	2,69	0,00	-0,03	1,24	16,8	13,5	0	0
P7-5	2,68	0,00	0,00	1,24	78,4	63,2	0	0
P8-1	2,71	0,00	0,00	1,37	102,2	74,6	0	0
P8-2	3,77	0,17	0,06	1,37	74,2	54,2	0	0
P9-1	2,63	0,00	0,01	1,31	96,6	73,7	0	0
P9-2	2,29	0,00	-0,02	1,31	11,2	8,6	0	0
P9-3	2,68	0,00	0,05	1,31	16,8	12,8	0	0
P9-4	3,31	0,00	0,06	1,31	22,4	17,1	0	0
P9-5	4,69	0,25	0,12	1,31	16,8	12,8	0	0
P9-6	5,62	1,00	0,05	1,31	11,2	8,6	0	0
P10-1	5,61	1,00	-0,06	1,47	12,6	8,6	0	0
P10-2	4,83	0,38	-0,11	1,47	11,2	7,6	0	0
P10-3	3,07	0,00	-0,03	1,47	61,6	41,9	0	0
P10-4	2,62	0,00	-0,05	1,47	22,4	15,2	0	0
P10-5	2,74	0,00	-0,01	1,47	68,6	46,7	0	0
P11-1	5,65	1,00	-0,13	1,23	7	5,7	2	23
P11-2	3,06	0,04	-0,14	1,23	33,6	27,3	0	0
P11-3	2,13	0,00	0,01	1,23	16,8	13,7	0	0
P11-4	2,16	0,00	-0,02	1,23	16,8	13,7	0	0
P11-5	2,06	0,00	-0,06	1,23	16,8	13,7	0	0
P11-6	2,92	0,00	0,01	1,23	16,8	13,7	1	8
P11-7	2,48	0,00	-0,06	1,23	11,2	9,1	0	0
P11-8	2,81	0,00	0,09	1,23	11,2	9,1	0	0
P11-9	2,43	0,00	-0,02	1,23	61,6	50,1	0	0
P12-1	2,46	0,00	-0,01	1,04	18,2	17,5	0	0
P12-2	2,87	0,00	0,02	1,04	39,2	37,7	0	0
P12-3	2,71	0,00	0,01	1,04	39,2	37,7	0	0
P12-4	2,17	0,00	0,00	1,04	33,6	32,3	0	0
P12-5	2,80	0,00	0,05	1,04	11,2	10,8	0	0
P12-6	4,06	0,00	0,13	1,04	16,8	16,2	0	0
P12-7	5,15	0,50	0,12	1,04	11,2	10,8	0	0
P12-8	5,74	1,00	0,05	1,04	7	6,7	0	0
P13-1	5,68	1,00	-0,01	1,41	7	5,0	0	0
P13-2	4,35	0,25	-0,11	1,41	33,6	23,8	0	0
P13-3	2,86	0,00	-0,05	1,41	11,2	7,9	0	0
P13-4	2,53	0,00	-0,02	1,41	28	19,9	0	0
P13-5	2,81	0,00	0,00	1,41	11,2	7,9	0	0

P13-6	2,64	0,00	0,04	1,41	44,8	31,8	0	0
P13-7	2,56	0,00	-0,02	1,41	39,2	27,8	0	0
P14-1	3,86	0,00	-0,04	1,39	35	25,2	1	38
P14-2	2,74	0,00	-0,05	1,39	50,4	36,3	0	0
P14-3	2,67	0,00	-0,06	1,39	22,4	16,1	1	12
P14-4	2,64	0,00	0,01	1,39	33,6	24,2	0	0
P14-5	2,40	0,00	-0,03	1,39	16,8	12,1	0	0
P14-6	2,37	0,00	0,02	1,39	22,4	16,1	0	0
P15-1	2,52	0,00	0,03	1,13	7	6,2	0	0
P15-2	2,12	0,00	-0,07	1,13	16,8	14,9	0	0
P15-3	2,25	0,00	0,04	1,13	39,2	34,7	0	0
P15-4	2,88	0,00	-0,01	1,13	44,8	39,6	0	0
P15-5	2,25	0,00	0,00	1,13	28	24,8	0	0
P15-6	2,88	0,00	0,09	1,13	16,8	14,9	0	0
P15-7	4,79	0,45	0,11	1,13	28	24,8	0	0
P16-1	2,02	0,00	0,01	0,9	35	38,9	0	0
P16-2	2,96	0,00	0,00	0,9	39,2	43,6	0	0
P16-3	3,16	0,00	0,05	0,9	11,2	12,4	0	0
P16-4	3,01	0,00	-0,06	0,9	22,4	24,9	0	0
P16-5	2,22	0,00	0,00	0,9	22,4	24,9	0	0
P16-6	3,59	0,00	0,11	0,9	33,6	37,3	1	28
P16-7	5,43	0,92	0,09	0,9	18,2	20,2	0	0
P17-1	2,51	0,00	-0,03	0,87	7	8,0	0	0
P17-2	2,43	0,00	0,01	0,87	78,4	90,1	3	21,3
P17-3	2,88	0,00	0,02	0,87	16,8	19,3	0	0
P17-4	2,32	0,00	-0,01	0,87	22,4	25,7	0	0
P17-5	2,55	0,00	0,07	0,87	28	32,2	0	0
P17-6	4,58	0,38	0,13	0,87	29,4	33,8	0	0
P18-1	2,46	0,00	0,04	1,5	7	4,7	0	0
P18-2	2,24	0,00	-0,08	1,5	11,2	7,5	0	0
P18-3	2,03	0,00	0,00	1,5	11,2	7,5	0	0
P18-4	2,13	0,00	0,03	1,5	11,2	7,5	0	0
P18-5	2,67	0,00	0,04	1,5	28	18,7	0	0
P18-6	2,95	0,00	0,00	1,5	28	18,7	0	0
P18-7	2,38	0,00	-0,01	1,5	33,6	22,4	0	0
P18-8	3,23	0,00	0,07	1,5	16,8	11,2	0	0
P18-9	4,08	0,00	0,11	1,5	11,2	7,5	0	0
P18-10	5,21	0,73	0,10	1,5	21	14,0	0	0
P19-1	5,55	1,00	0,01	1,47	7	4,8	0	0
P19-2	3,78	0,15	-0,08	1,47	56	38,1	0	0
P19-3	2,39	0,00	-0,06	1,47	11,2	7,6	0	0
P19-4	2,75	0,00	0,04	1,47	22,4	15,2	0	0
P19-5	2,45	0,00	-0,04	1,47	11,2	7,6	0	0
P19-6	2,76	0,00	-0,01	1,47	50,4	34,3	0	0
P19-7	2,30	0,00	0,01	1,47	18,2	12,4	0	0

P20-1	4,87	0,20	-0,12	1,21	7	5,8	1	21
P20-2	3,36	0,00	-0,18	1,21	16,8	13,9	0	0
P20-3	2,30	0,00	0,00	1,21	140	115,7	1	7
P20-4	2,18	0,00	0,07	1,21	15,4	12,7	0	0
P21-1	2,77	0,00	0,02	1,42	57,4	40,4	0	0
P21-2	2,68	0,00	-0,08	1,42	11,2	7,9	0	0
P21-3	2,63	0,00	0,05	1,42	22,4	15,8	0	0
P21-4	2,12	0,00	0,00	1,42	67,2	47,3	0	0
P21-5	4,57	0,31	0,21	1,42	18,2	12,8	0	0
P22-1	2,30	0,00	-0,03	1,12	12,6	11,3	0	0
P22-2	2,82	0,00	0,02	1,12	56	50,0	0	0
P22-3	3,05	0,00	-0,03	1,12	39,2	35,0	1	12
P22-4	2,50	0,00	-0,04	1,12	22,4	20,0	0	0
P22-5	2,54	0,00	0,09	1,12	39,2	35,0	0	0
P22-6	5,44	0,90	0,10	1,12	14	12,5	1	9
P23-1	2,64	0,00	0,02	1,29	46,2	35,8	0	0
P23-2	2,78	0,00	-0,04	1,29	28	21,7	1	8
P23-3	2,72	0,00	0,07	1,29	11,2	8,7	0	0
P23-4	2,92	0,00	-0,02	1,29	11,2	8,7	0	0
P23-5	2,36	0,00	-0,08	1,29	11,2	8,7	0	0
P23-6	2,25	0,00	0,06	1,29	16,8	13,0	0	0
P23-7	2,93	0,00	0,07	1,29	16,8	13,0	0	0
P23-8	3,73	0,00	0,08	1,29	11,2	8,7	0	0
P23-9	5,06	0,47	0,09	1,29	26,6	20,6	0	0
P24-1	2,55	0,00	-0,01	1	7	7,0	0	0
P24-2	2,12	0,00	0,00	1	28	28,0	0	0
P24-3	2,71	0,00	0,04	1	33,6	33,6	0	0
P24-4	2,52	0,00	-0,08	1	16,8	16,8	0	0
P24-5	0,70	0,00	-0,26	1	11,2	11,2	0	0
P24-6	2,43	0,00	0,05	1	28	28,0	0	0
P24-7	2,93	0,00	0,05	1	44,8	44,8	0	0
P24-8	5,14	0,63	0,13	1	11,2	11,2	0	0
P25-1	2,70	0,00	0,00	1,32	79,8	60,5	0	0
P25-2	2,74	0,00	-0,04	1,32	22,4	17,0	0	0
P25-3	2,08	0,00	-0,01	1,32	16,8	12,7	0	0
P25-4	2,71	0,00	0,09	1,32	11,2	8,5	0	0
P25-5	3,71	0,00	0,09	1,32	28	21,2	0	0
P25-6	5,34	0,85	0,09	1,32	18,2	13,8	0	0
P26-1	2,47	0,00	0,00	0,98	35	35,7	0	0
P26-2	2,80	0,00	0,03	0,98	28	28,6	0	0
P26-3	2,93	0,00	-0,02	0,98	11,2	11,4	0	0
P26-4	2,53	0,00	-0,01	0,98	11,2	11,4	0	0
P26-5	2,66	0,00	0,01	0,98	44,8	45,7	1	27
P26-6	3,72	0,00	0,09	0,98	22,4	22,9	0	0
P26-7	5,32	0,75	0,08	0,98	22,4	22,9	0	0

P27-1	5,64	1,00	-0,04	1,33	12,6	9,5	0	0
P27-2	4,92	0,38	-0,12	1,33	11,2	8,4	0	0
P27-3	3,71	0,00	-0,12	1,33	16,8	12,6	0	0
P27-4	2,86	0,00	-0,03	1,33	16,8	12,6	0	0
P27-5	2,42	0,00	-0,05	1,33	16,8	12,6	0	0
P27-6	2,65	0,00	0,07	1,33	16,8	12,6	0	0
P27-7	2,65	0,00	-0,04	1,33	11,2	8,4	0	0
P27-8	2,71	0,00	0,00	1,33	68,6	51,6	0	0
P28-1	2,67	0,00	0,00	1,22	85,4	70,0	0	0
P28-2	2,69	0,00	-0,04	1,22	22,4	18,4	0	0
P28-3	2,63	0,00	0,09	1,22	11,2	9,2	0	0
P28-4	4,10	0,27	0,08	1,22	61,6	50,5	0	0
P29-1	2,77	0,00	0,02	0,92	63	68,5	0	0
P29-2	1,93	0,00	-0,08	0,92	28	30,4	1	13
P29-3	2,52	0,00	-0,08	0,92	16,8	18,3	0	0
P29-4	2,68	0,00	0,07	0,92	11,2	12,2	0	0
P29-5	2,35	0,00	-0,04	0,92	22,4	24,3	0	0
P29-6	1,89	0,00	0,00	0,92	16,8	18,3	1	7
P29-7	2,18	0,00	0,06	0,92	11,2	12,2	0	0
P29-8	4,13	0,25	0,18	0,92	22,4	24,3	0	0
P29-9	5,60	1,00	0,02	0,92	9,8	10,7	0	0
P30-1	2,29	0,00	-0,01	1,23	23,8	19,4	0	0
P30-2	2,39	0,00	0,02	1,23	16,8	13,7	0	0
P30-3	2,57	0,00	0,00	1,23	44,8	36,4	0	0
P30-4	2,64	0,00	0,00	1,23	11,2	9,1	0	0
P30-5	2,50	0,00	0,03	1,23	16,8	13,7	0	0
P30-6	3,93	0,25	0,08	1,23	61,6	50,1	0	0

Tableau C.1 - Indicateurs caractéristiques calculés pour les portions de parcours relativement à la variable « vitesse du vent »

Parcours-Portion	Caractéristiques du signal PMV			Caractéristiques comportementales évaluée sur les portions de parcours				
	I_{moy}	$Freq_{dep_{1+}}$	SV	Vitesse	Longueur	Durée	Nb. arrêts	Durée moy. arrêts
P1-1	0,95	0,30	0,01	1,06	28,0	26,4	1	29
P1-2	0,87	0,50	-0,09	1,06	11,2	10,6	0	0
P1-3	0,63	0,00	0,04	1,06	16,8	15,8	0	0
P1-4	0,32	0,00	-0,02	1,06	42,0	39,6	1	22
P1-5	0,93	0,32	-0,01	1,24	51,8	41,8	0	0
P1-6	0,57	0,00	-0,02	1,24	11,2	9,0	0	0
P2-1	1,01	0,58	-0,01	1,24	50,4	40,6	0	0
P2-2	0,72	0,00	-0,01	1,24	60,2	48,5	0	0
P3-1	0,53	0,00	-0,03	1,22	18,2	14,9	0	0

P3-2	0,23	0,00	0,00	1,22	50,4	41,3	0	0
P3-3	0,97	0,42	-0,01	1,22	50,4	41,3	0	0
P3-4	0,78	0,00	-0,03	1,22	16,8	13,8	1	15
P3-5	0,40	0,00	-0,03	1,22	11,2	9,2	0	0
P3-6	0,12	0,00	-0,02	1,22	9,8	8,0	0	0
P3-7	0,30	0,00	-0,14	1,27	7,0	5,5	0	0
P4-1	0,17	0,00	0,00	1,27	11,2	8,8	0	0
P4-2	0,16	0,00	0,00	1,27	16,8	13,2	0	0
P4-3	0,29	0,08	0,02	1,27	33,6	26,5	0	0
P4-4	1,02	0,71	0,00	1,27	33,6	26,5	0	0
P5-1	1,01	0,75	-0,04	1,27	11,2	8,8	0	0
P5-2	0,69	0,00	0,02	1,27	16,8	13,2	0	0
P5-3	0,96	0,34	0,01	1,27	44,8	35,3	0	0
P5-4	0,93	0,48	0,01	1,24	91,0	73,4	0	0
P5-5	1,00	0,48	0,00	1,24	84,0	67,7	0	0
P5-6	1,00	0,48	0,00	1,37	96,6	70,5	0	0
P6-1	0,82	0,16	-0,01	1,37	79,8	58,2	0	0
P6-2	1,02	0,74	0,00	1,31	91,0	69,5	0	0
P6-3	1,09	0,83	0,02	1,31	16,8	12,8	0	0
P6-4	0,83	0,17	-0,01	1,31	67,2	51,3	0	0
P6-5	0,87	0,15	0,01	1,47	91,0	61,9	0	0
P6-6	1,00	0,53	0,00	1,47	85,4	58,1	0	0
P6-7	0,46	0,00	-0,07	1,23	12,6	10,2	2	23
P6-8	0,36	0,00	0,03	1,23	16,8	13,7	0	0
P7-1	0,49	0,00	-0,01	1,23	28,0	22,8	0	0
P7-2	0,79	0,50	0,10	1,23	16,8	13,7	0	0
P8-1	1,10	0,92	-0,01	1,23	16,8	13,7	0	0
P8-2	1,00	0,42	0,01	1,23	33,6	27,3	1	8
P9-1	0,30	0,02	0,01	1,23	67,2	54,6	0	0
P9-2	1,03	0,61	0,00	1,04	113,4	109,0	0	0
P9-3	0,85	0,24	-0,01	1,04	63,0	60,6	0	0
P10-1	0,78	0,08	0,01	1,41	51,8	36,7	0	0
P10-2	1,03	0,82	-0,01	1,41	39,2	27,8	0	0
P11-1	1,04	0,62	0,00	1,41	84,0	59,6	0	0
P11-2	0,18	0,00	0,02	1,39	40,6	29,2	1	38
P11-3	0,96	0,25	0,01	1,39	44,8	32,2	0	0
P11-4	1,00	0,38	0,01	1,39	22,4	16,1	1	12
P11-5	1,02	0,62	0,00	1,39	72,8	52,4	0	0
P11-6	0,77	0,39	-0,08	1,13	18,2	16,1	0	0
P11-7	0,39	0,00	0,00	1,13	56,0	49,6	0	0
P12-1	0,97	0,34	0,00	1,13	44,8	39,6	0	0
P12-2	0,27	0,00	-0,01	1,13	33,6	29,7	0	0
P13-1	0,44	0,00	0,02	1,13	28,0	24,8	0	0
P13-2	0,99	0,20	-0,04	0,9	7,0	7,8	0	0
P13-3	0,77	0,00	-0,03	0,9	16,8	18,7	0	0

P14-1	1,01	0,50	0,01	0,9	11,2	12,4	0	0
P14-2	0,89	0,08	-0,01	0,9	33,6	37,3	0	0
P14-3	0,91	0,23	0,00	0,9	56,0	62,2	0	0
P14-4	0,24	0,00	-0,02	0,9	16,8	18,7	0	0
P15-1	0,55	0,00	0,06	0,9	11,2	12,4	0	0
P15-2	0,67	0,00	-0,01	0,9	29,4	32,7	1	28
P15-3	1,06	0,89	0,01	0,87	12,6	14,5	0	0
P15-4	0,54	0,13	-0,10	0,87	11,2	12,9	0	0
P15-5	0,26	0,06	0,01	0,87	44,8	51,5	1	19
P16-1	1,08	1,00	0,01	0,87	16,8	19,3	2	22,5
P16-2	1,04	0,71	0,00	0,87	67,2	77,2	0	0
P16-3	0,75	0,00	-0,02	0,87	29,4	33,8	0	0
P16-4	0,78	0,46	-0,08	1,5	18,2	12,1	0	0
P16-5	0,30	0,00	0,00	1,5	50,4	33,6	0	0
P16-6	0,96	0,33	0,00	1,5	50,4	33,6	0	0
P16-7	0,29	0,00	-0,03	1,5	11,2	7,5	0	0
P16-8	0,58	0,00	0,09	1,5	11,2	7,5	0	0
P17-1	0,80	0,00	-0,01	1,5	16,8	11,2	0	0
P17-2	0,67	0,00	-0,01	1,5	21,0	14,0	0	0
P17-3	0,85	0,19	0,01	1,47	74,2	50,5	0	0
P17-4	1,03	0,62	0,00	1,47	102,2	69,5	0	0
P17-5	0,12	0,00	0,00	1,21	7,0	5,8	1	21
P17-6	0,28	0,00	0,02	1,21	22,4	18,5	0	0
P18-1	0,39	0,04	0,01	1,21	33,6	27,8	0	0
P18-2	0,99	0,53	-0,01	1,21	50,4	41,7	0	0
P18-3	0,41	0,00	0,01	1,21	16,8	13,9	0	0
P18-4	0,43	0,00	0,00	1,21	33,6	27,8	1	7
P18-5	0,69	0,36	0,09	1,21	15,4	12,7	0	0
P18-6	0,97	0,44	-0,01	1,42	57,4	40,4	0	0
P18-7	1,07	0,75	0,00	1,42	56,0	39,4	0	0
P19-1	0,38	0,00	-0,01	1,42	56,0	39,4	0	0
P19-2	0,57	0,00	0,04	1,42	7,0	4,9	0	0
P20-1	1,04	0,67	-0,01	1,12	46,2	41,3	0	0
P20-2	0,40	0,00	-0,05	1,12	16,8	15,0	0	0
P20-3	0,94	0,39	0,01	1,12	61,6	55,0	1	12
P20-4	0,79	0,25	-0,05	1,12	16,8	15,0	0	0
P20-5	0,78	0,00	0,04	1,12	11,2	10,0	0	0
P20-6	0,73	0,00	-0,02	1,12	30,8	27,5	1	9
P20-7	1,03	0,57	0,00	1,29	119,0	92,2	1	8
P21-1	1,06	1,00	-0,01	1,29	11,2	8,7	0	0
P21-2	0,77	0,03	-0,01	1,29	49,0	38,0	0	0
P21-3	1,01	0,60	-0,02	1	7,0	7,0	0	0
P21-4	0,43	0,00	-0,07	1	11,2	11,2	0	0
P22-1	0,28	0,00	0,00	1	16,8	16,8	0	0
P22-2	0,23	0,00	0,00	1	33,6	33,6	0	0

P22-3	0,94	0,60	-0,03	1	28,0	28,0	0	0
P22-4	0,97	0,81	-0,01	1	22,4	22,4	0	0
P22-5	0,20	0,00	0,00	1	50,4	50,4	0	0
P22-6	0,43	0,00	0,06	1	11,2	11,2	0	0
P23-1	1,02	0,38	0,00	1,32	113,4	85,9	0	0
P23-2	0,83	0,13	-0,01	1,32	63,0	47,7	0	0
P23-3	0,93	0,47	-0,03	0,98	23,8	24,3	0	0
P24-1	0,40	0,00	-0,06	0,98	11,2	11,4	0	0
P24-2	0,30	0,00	0,02	0,98	33,6	34,3	0	0
P24-3	0,97	0,59	0,00	0,98	44,8	45,7	0	0
P24-4	0,28	0,00	0,03	0,98	16,8	17,1	1	27
P24-5	0,68	0,00	0,00	0,98	44,8	45,7	0	0
P24-6	0,80	0,12	0,01	1,33	57,4	43,2	0	0
P24-7	1,11	1,00	0,01	1,33	16,8	12,6	0	0
P24-8	1,03	0,58	-0,02	1,33	16,8	12,6	0	0
P25-1	1,01	0,56	0,00	1,33	79,8	60,0	0	0
P25-2	0,91	0,00	-0,01	1,22	46,2	37,9	0	0
P26-1	0,62	0,00	-0,02	1,22	11,2	9,2	0	0
P26-2	0,94	0,60	0,04	1,22	28,0	23,0	0	0
P26-3	1,03	0,58	0,00	1,22	33,6	27,5	0	0
P26-4	0,78	0,00	-0,01	1,22	61,6	50,5	0	0
P26-5	0,98	0,42	0,00	0,92	63,0	68,5	0	0
P26-6	1,15	0,80	0,01	0,92	28,0	30,4	1	13
P27-1	1,03	0,69	0,01	0,92	22,4	24,3	0	0
P27-2	1,06	0,90	0,00	0,92	28,0	30,4	0	0
P27-3	0,65	0,00	0,04	0,92	22,4	24,3	1	7
P27-4	0,76	0,00	-0,02	0,92	37,8	41,1	0	0
P28-1	0,99	0,57	0,00	1,23	96,6	78,5	0	0
P28-2	0,86	0,34	-0,01	1,23	78,4	63,7	0	0
P28-3	0,95	0,30	0,01	1,06	28,0	26,4	1	29
P28-4	0,87	0,50	-0,09	1,06	11,2	10,6	0	0
P28-5	0,63	0,00	0,04	1,06	16,8	15,8	0	0
P29-1	0,32	0,00	-0,02	1,06	42,0	39,6	1	22
P29-2	0,93	0,32	-0,01	1,24	51,8	41,8	0	0
P29-3	0,57	0,00	-0,02	1,24	11,2	9,0	0	0
P29-4	1,01	0,58	-0,01	1,24	50,4	40,6	0	0
P29-5	0,72	0,00	-0,01	1,24	60,2	48,5	0	0
P29-6	0,53	0,00	-0,03	1,22	18,2	14,9	0	0
P30-1	0,23	0,00	0,00	1,22	50,4	41,3	0	0
P30-2	0,97	0,42	-0,01	1,22	50,4	41,3	0	0

Tableau C.2 - Indicateurs caractéristiques calculés pour les portions de parcours relativement à la variable PMV