



HAL
open science

Génération d'un squelette informé et application à l'étude aéraulique de la forme urbaine

Houda Belgacem

► **To cite this version:**

Houda Belgacem. Génération d'un squelette informé et application à l'étude aéraulique de la forme urbaine. Architecture, aménagement de l'espace. École centrale de Nantes, 2019. Français. NNT : 2019ECDN0060 . tel-03237407

HAL Id: tel-03237407

<https://theses.hal.science/tel-03237407v1>

Submitted on 26 May 2021

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

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

THESE DE DOCTORAT DE

L'ÉCOLE CENTRALE DE NANTES
COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ÉCOLE DOCTORALE N° 602
Sciences pour l'Ingénieur
Spécialité : « *Architecture et études urbaines* »

Par

Houda BELGACEM

Génération d'un squelette informé et application à l'étude aérodynamique de la forme urbaine

Thèse présentée et soutenue à Nantes, le 12 décembre 2019
Unité de recherche : UMR 1563, Ambiances Architectures Urbanités (AAU)

Rapporteurs avant soutenance :

Sidonie CHRISTOPHE

Directrice de recherche, IGN, Saint-Mandé

Composition du Jury :

Président : Christophe CLARAMUNT

Professeur des universités, École Navale, Brest

Examineurs : Isabelle CALMET-GUIDONI
Bertrand CARISSIMO

Maître de conférences HDR, École Centrale de Nantes
Chargé de recherche HDR, EDF, CEREVA, Marne-la-Vallée

Dir. de thèse : Marjorie MUSY

Directrice de recherche, CEREMA, Nantes

Co-encadrant de thèse : Thomas LEDUC

Ingénieur de recherche, ENSA, Nantes

Invité

Sylvain AGUINAGA

Ingénieur, CSTB, Nantes

À *mes parents*,
en témoignage de ma profonde affection,
de ma gratitude pour la force et la confiance
qu'ils m'ont accordées,

À *Rami et Selma*
pour leur soutien constant,

À la mémoire d'*Imen*,
pour m'avoir toujours poussée à aller plus loin.

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du Centre de Recherche Nantais Architectures Urbanités (CRENAU), composante du laboratoire AAU à l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes. Il a été dirigé par Madame Marjorie Musy, Directrice de recherche au Cerema, et par Monsieur Thomas Leduc Ingénieur de recherche CNRS. Qu'ils trouvent ici mes plus vifs et sincères remerciements pour leur disponibilité scientifique, les fructueuses discussions durant des réunions marathon et l'intérêt qu'ils n'ont cessé de me témoigner tout au long de ce travail. C'est grâce à leurs conseils judicieux que j'ai pu mener à bien ces recherches. Je suis très heureuse de leur exprimer ma gratitude pour m'avoir accueillie et intégrée dans leurs équipes. Je les remercie aussi pour la correction et la mise au point de ce mémoire. Monsieur Thomas Leduc n'a cessé de m'accorder l'appui de son expérience, je le remercie pour le calme et la patience avec lesquels il répondait à mes questions quotidiennes.

Je suis très sensible à l'honneur que m'a fait le professeur Christophe Claramunt de l'Institut de Recherche de l'École Navale en acceptant de rapporter ce travail et de présider le jury. Je prie également Madame Sidonie Christophe, Directrice de Recherche Responsable de l'équipe Géovisualisation du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Information Géographique à l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière à Paris, d'accepter l'expression de ma reconnaissance pour l'honneur qu'elle a bien voulu me faire en rapportant ce travail et en participant à mon jury de thèse.

Que Madame Isabelle Calmet, Maître de conférence à l'École Centrale de Nantes, trouve ici l'expression de mes sentiments très respectueux et reconnaissants pour ses conseils, ses encouragements constants et pour sa participation au jury. Je la remercie également ainsi que Monsieur Frédéric Bonneaud, professeur à l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse, pour avoir accepté de faire partie de mon comité de suivi individuel de thèse, et pour leurs critiques constructives.

Je remercie également Monsieur Bertrand Carissimo, Chercheur au Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique (CE-REA), pour le temps qu'il m'a consacré et pour ses conseils pertinents pour mener à bien mes travaux de thèse. Je le remercie aussi pour sa participation au jury.

Je remercie Monsieur Sylvain Aguinaga, chercheur au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) à Nantes, non seulement pour sa participation au jury mais aussi pour notre étroite et enrichissante collaboration. Nos échanges m'ont effectivement permis d'atteindre certains objectifs importants du travail de la thèse.

J'adresse également mes sincères remerciements à Madame Sophie Moreau, Directrice de l'Institut Carnot CSTB Paris et à Monsieur Fabrice de Oliveira, ingénieur de recherche au CSTB Nantes, pour nos discussions intéressantes.

Je saisis cette heureuse occasion pour dire un grand merci à toute l'équipe CRENAU, et plus particulièrement aux doctorants, pour leur soutien moral et scientifique, pour l'ambiance agréable et le bon esprit de coopération amicale.

Je remercie chaleureusement mes ami(es), pour leur disponibilité et pour chaque beau et triste moment que nous avons partagé. Je pense particulièrement à Ketaki Meshra, Hanen Mbarek, Emmanuelle Gangloff, Malek Monastiri, Sophie Provost, Fadwa Belkhir, Xenia Lafaille, Soumaya Boukattaya et le groupe '*filles*'. Sans oublier également mes chers proches Zied Said, Slaheddine Ben Zina et Marwa Ben Zina pour leur indispensable soutien moral.

Merci au Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique tunisien et à la Fondation des Treilles qui ont assuré le financement de ma thèse. Mes remerciements vont également à Monsieur Ahmed Loukili pour avoir rendu possible la réalisation de cette thèse, merci vivement pour cette marque de confiance.

Table des matières

I	Introduction	20
1	Introduction	21
1.1	Problématique	25
1.2	Objectif	27
1.3	Méthodologie	27
1.4	Plan de la thèse	28
II	Étude de la forme de la ville	30
1	État de l’art : caractérisation de la forme urbaine	31
1.1	Lectures de la forme urbaine	31
1.2	Système du bâti, système des espaces libres et interrelations	33
1.2.1	Approche urbanistique	33
	Du <i>no-man’s-land</i> au “ <i>found</i> ” <i>space</i>	33
	Deux composantes régulatrices	34
	Définitions	34
1.2.2	Interrelations vide-plein	36
1.2.3	Approche ontologique	36
1.3	Analyse du vide urbain	37
1.3.1	Approches par partitionnement	38
1.3.2	Cartes axiales	38
1.3.3	Approches orientée champ	39
	Carte de vue du ciel	39
	Isovist et champ d’isovist	40
1.4	Synthèse	41
2	État de l’art : caractérisation de dynamiques en ville	42
2.1	Temps court, temps long	42
2.2	Perspective de mouvement	43
2.3	Squelette et analyse du <i>streetscape</i>	43

2.4	Synthèse	44
3	Méthodologie : simplifier l'espace, capter l'espace, mesurer l'espace	46
3.1	Simplifier l'espace	47
3.1.1	Réduction dimensionnelle : de la ville en volume à la ville <i>flatland</i>	47
3.1.2	Des empreintes de bâtiments au vide urbain	47
3.1.3	Réduction dimensionnelle : extraction du squelette de la forme en plan du vide urbain	47
3.1.4	Réduction dimensionnelle : du squelette au réseau de points	48
3.2	Capter l'espace	48
3.2.1	Captation ponctuelle	48
3.2.2	Délimitations des zones sources pour les capteurs du squelette pour nos applications	49
3.2.3	Directivité	49
3.3	Mesurer l'espace (41 indicateurs)	50
3.3.1	Compléments relatifs à la mise en oeuvre technique	52
	Échantillonnage par abscisse curviligne	52
	Lancer de rayons	52
	Détermination de la zone source	53
3.3.2	Indicateurs statiques	54
	Indicateurs statiques a-directionnels	54
	Indicateurs statiques panoptiques	55
	Indicateurs statiques directionnels	57
3.3.3	Indicateurs « dynamiques » ou « regroupés »	62
	Approche différentielle de la forme locale de l'espace ouvert	62
	Regroupement des capteurs par tronçons du squelette	62
3.3.4	Tableau synoptique des indicateurs morphologiques	63
3.3.5	Préparation de la géométrie pour la détermination du squelette	64
3.4	Conclusion	64
III	Étude du vent en ville	66
1	État de l'art de l'influence du bâti sur la circulation du vent en ville	67
1.1	Échelle de travail	67

1.2	Mécanismes du vent dans le milieu urbain	68
1.2.1	pression et mouvement du vent	68
1.2.2	Notions aérodynamiques	69
	Profil de vent	69
	Vitesse turbulente, vitesse moyenne	70
1.3	Influence d'un bâtiment unique	70
1.3.1	Phénomènes aérodynamiques	71
1.3.2	Règles empiriques	72
	Zone d'influence d'un bâtiment	72
	Brise-vent, facteur de protection, zone d'isoprotection	72
1.4	Influence d'une paire de bâtiments	73
1.4.1	Deux bâtiments de même hauteur	74
	Bâtiments côte à côte face au vent	74
	Effet Venturi	75
	Deux bâtiments de hauteur identique et parallèle au vent, effet de canalisation	75
	Deux bâtiments de hauteur identique, vent transverse	75
	Effet d'entonnoir	77
	Effet de chicane (<i>draught effect</i> et <i>back pressure effect</i>)	77
	Deux bâtiments décalés	77
1.4.2	Deux bâtiments de hauteur différente, effet <i>Wise</i>	78
1.5	Influence d'un groupe de bâtiments	78
1.5.1	Circulation du vent dans une configuration « en damier »	79
	Objectifs	79
	Indicateurs géométriques impliqués dans les règles empiriques	80
1.5.2	Extension à la circulation du vent dans une configuration urbaine complexe	81
	Objectifs	81
1.5.3	Indicateurs morphologiques utilisés pour décrire le vent en ville	82
	Importance d'étudier la distribution du vent dans la maille urbaine	82
1.6	Analyse des tissus urbains par simulation aérodynamique	83
1.6.1	CFD : paramétrage du modèle et simulations numériques aérauliques	84
	Modèles de turbulence	84
	Validité de l'outil	84
1.7	Synthèse	84

2	Méthodologie : injection de l'information aéraulique dans le contexte du SIG	86
2.1	Construction et maillage du vide aéraulique	86
2.1.1	Simplification et translation des données topographiques	86
2.1.2	Construction de la veine numérique	87
	Zone d'intérêt, zone de rugosité, zone d'étude	87
	Dimensions de la veine aéraulique	87
2.1.3	Soustraction des bâtiments	89
2.1.4	Maillage du vide aéraulique	90
2.2	Simulations de mécanique des fluides numériques	91
2.2.1	Paramétrage CFD et résolution numérique des équations de la mécanique des fluides	91
2.2.2	Post-traitement dans ParaView	91
2.3	Traitement dans QGIS	92
2.3.1	Importation et translation des données aérauliques	92
2.3.2	Jointure spatiale des capteurs aérauliques au plus proche capteur morphologique	92
2.3.3	Homogénéité de l'information aéraulique par cellule morphologique	93
2.4	Conclusion	94
IV	Applications	95
1	Intérêt du squelette informé pour la signature morphologique de la forme urbaine à l'échelle d'un groupe d'îlots	96
1.1	Compléments méthodologiques	96
1.2	Cas d'étude	97
1.3	Résultats et discussion	100
1.3.1	Lecture horizontale du tableau	100
	Cas 1 : Le château de Rezé	100
	Cas 2 : Saint-Sébastien-sur-Loire	100
	Cas 3 : La Bouvardière	100
	Cas 4 : Les Hauts-Pavés	100
	Cas 5 : Dalby	103
	Cas 6 et 8 : Place Graslin et Bouffay	103
	Cas 7 : Hôtel-Dieu	103
1.3.2	Lecture verticale du tableau	103
1.3.3	Discussions et limites	104
	Ambivalence du rapport d'aspect	104
	Sensibilité à la taille du réseau de capteurs	104

1.3.4	Signature morphologique	105
1.4	Synthèse	106
2	Intérêt du squelette informé pour l'identification des composantes de la forme urbaine	107
2.1	Complément méthodologique	108
2.1.1	Détection des espaces de jonction	108
2.1.2	Détection des zones de canalisation	109
2.1.3	Détection des zones de collection	110
	Pré-requis	110
	Distinction en fonction de la valeur de Card_{3_i}	111
	Distinction en fonction de la valeur de $\overline{r'}$	111
2.2	Cas d'étude	112
2.2.1	Secteur de la Part-Dieu à Lyon	113
2.2.2	Place Graslin à Nantes	113
2.2.3	Secteur Hôtel-Dieu à Nantes	114
2.3	Résultats et discussion	114
2.3.1	Reconnaissance des espaces de jonction	116
2.3.2	Séparation des zones de canalisation et des zones de collection	117
2.3.3	Qualification des zones de collection	118
2.3.4	Principales limites identifiées	120
	Détermination empirique arbitraire des valeurs de seuil ϵ	120
	Détection et qualification inappropriée de certaines esplanades	120
	Un processus inadapté aux tissus péri-urbains	120
2.4	Synthèse	121
3	Utilisation du squelette informé pour établir des corrélations forme-vent	124
3.1	Une hypothèse de directionnalité	124
3.2	Un phénomène complexe avec une multiplicité de paramètres	125
3.3	Compléments méthodologiques	125
3.3.1	Paramétrage du « moteur » morphologique	125
	Pas d'échantillonnage de l'abscisse curviligne	126
	Pas d'échantillonnage de l'abscisse angulaire	126
	Étendue de la zone source ou longueur du rayon	128
	Angle d'ouverture β (dans le cas directionnel)	128
3.3.2	Construction de la matrice de corrélation	128
	Deux tables attributaires en données d'entrée	128
	Matrice de corrélation	131

3.3.3	Paramétrage et traitement statistique	132
	Un regroupement par zone de canalisation vs. zone de collection	132
	Choix de l'algorithme	133
	Filtrage des indicateurs morphologiques pertinents par régression linéaire univariée	133
3.4	Cas d'étude - secteur de la Place de Mexico à Paris	133
3.4.1	Préparation de la maquette	133
3.4.2	Caractérisation morphologique	135
	Une signature morphologique de tissu compact	135
	Identification des composantes	135
3.4.3	Passage de la maquette en veine numérique	137
3.5	Résultats et discussion	138
3.5.1	Corrélation à la vitesse moyenne \bar{v}	138
3.5.2	Corrélation à l'écart-type de la vitesse σ_v	139
3.5.3	Corrélation à l'énergie cinétique \bar{k}	139
3.5.4	Observations marquantes	139
3.5.5	Représentations graphiques et cartographiques des cor- rélations	141
	Principaux diagrammes de dispersion	141
	Des corrélations positives :	141
	Effets de peigne :	141
	Effet additif :	142
	Corrélation par le biais de représentations cartogra- phiques	143
	Corrélation par superposition cartographique	143
3.6	Discussion	146

V Conclusion 148

1	Discussion conclusive et perspectives	149
1.1	Conclusion générale	149
1.2	Perspectives	151
1.3	Remerciements au CSTB	153
1.3.1	Un échange direct sur trois réunions	154
	Première réunion le 14 novembre 2016	154
	Deuxième réunion le 15 janvier 2018	154
	Troisième réunion le 27 septembre 2019	154
1.3.2	Contribution du CSTB	155
	Les données aérauliques livrées par le CSTB	155

Le retour expert issu de la réunion du 27 septembre 2019155

VI Annexes	157
A Tableaux des coefficients de corrélation	158
B Tests de significativité	162
Bibliographie	169

Table des figures

1.1	Tracés urbains et stratégies d'adaptation au vent : a) cotés Est et Nord de Venise, fermeture et blocage au vent (source <i>Google Earth</i>), b) sud de Venise, des canaux plus larges facilitent la pénétration du vent (source <i>Google Earth</i>), c) quartier de San Juan à Porto Rico (source : <i>Les cahiers de la recherche architecturale</i> 42/43), d) architecture traditionnelle arabe (source : cours Olivier FLAMAND 2015), e) Valette, Malta (source : <i>Cities of Wind</i> , Grosso et al. 2000).	24
3.1	Deux méthodes de délimitation des zones sources : (a) par <i>buffer</i> circulaire, (b) par isovist. Images extraites de (RODLER et LEDUC 2019).	50
3.2	Deux adaptations de la méthode dite de lancer de rayons : (a) seul le premier point d'impact est significatif, (b) c'est le bâtiment qui « bouche l'horizon » qui importe, celui-ci peut-être éventuellement placé à l'arrière-plan. Images extraites de (RODLER et LEDUC 2019).	53
3.3	(a) L'angle solide du masque bâti de hauteur h_i , placé à une distance w_i du capteur, et d'écart angulaire égal à $\frac{2\pi}{nRays}$ dans le plan horizontal d'observation, est égal à $\frac{2\pi}{nRays} \sin\left(\arctan\left(\frac{h_i}{w_i}\right)\right)$, (b) dans une modélisation hémisphérique du ciel, le SVF est le rapport entre l'aire d'hémisphère vu depuis le capteur et celle de l'hémisphère correspondant complet. Images extraites de (RODLER et LEDUC 2019).	57

3.4	Dans cette figure, le vent est orienté de E-SE vers W-NW (cf. flèche située sur le bord droit) et l'ouverture d'angle des isovists partiels est arbitrairement fixée à 30°. La plus grande des deux zones rouges est appelée isovist partiel au vent et la plus petite des deux zones rouges est appelée isovist partiel sous le vent. Le segment de droite en pointillés rouges correspond au plus grand diamètre inscrit dans l'isovist généré à partir de la position du capteur.	59
3.5	Tableau récapitulatif des indicateurs morphologiques. La mention (*) indique que l'indicateur se décline dans une version au vent, sous le vent ou simultanément au et sous le vent. . . .	65
1.1	Deux types de décollement de couche limite (HÉMON 2004, p. 12)	68
1.2	Passage du profil du vent d'un milieu rural à un milieu urbain. Changement du profil du vent au niveau de la canopée urbaine (<i>Urban canopy</i>) située en bas de la couche limite urbaine (<i>Urban Boundary Layer</i> , UBL) (BOZONNET, BELARBI et ALLARD 2006).	70
1.3	Flux du vent et zone d'influence pour un bâtiment de dimension $b \times l \times h = 20m \times 80m \times 70m$, b étant l'épaisseur du bâtiment, l sa largeur et h sa hauteur (BERANEK 1984a, p. 29)	73
1.4	Influence de la distance entre deux bâtiments ($b \times l \times h = 10m \times 80m \times 50m$, b étant l'épaisseur du bâtiment, l sa largeur et h sa hauteur), a) <i>discomfort map</i> pour une distance $t = 80m$, b) flux du vent pour une distance $t = 80m$, c) <i>discomfort map</i> pour une distance $t = 10m$, d) flux du vent pour une distance $t = 10m$	74
1.5	(a) Bâtiments côte à côte face au vent, (b) Effet de Venturi, (c) Effet de canalisation, (d) Effet d'entonnoir, (e) Effet de chicane, (f) Deux bâtiments décalés.	76
2.1	Délimitation de la zone d'intérêt et de rugosité d'un exemple urbain	88
2.2	Illustration du <i>blockage ratio</i> extrait de BLOCKEN (2015). . . .	89
2.3	Veine numérique utilisée par le CSTB pour les simulations de mécanique des fluides numériques (crédit : Sylvain Aguinaga, CSTB, Nantes).	89

2.4	Chaque maille tétraédrique porte une information de vitesse (un vecteur de \mathbb{R}^3) qui est interpolée aux sommets du tétraèdre. Les valeurs interpolées en chacun des sommets sont ensuite projetées sur le plan de coupe horizontal.	92
2.5	Regroupement des capteurs aérauliques sous forme de cellules aérauliques autour de chaque capteur morphologique	93
2.6	(a) Homogénéité de l'indicateur \bar{v} sur les cellules aérauliques, (b) Homogénéité de l'indicateur k sur les cellules aérauliques.	94
1.1	Localisation de l'ensemble des cas d'étude de l'agglomération nantaise (France), dans une progression de la périphérie vers le centre urbain : (1) Le château de Rezé, (2) Saint-Sébastien-sur-Loire, (3) La Bouvardière, (4) Dalby, (5) Les Hauts Pavés, (6) Place Graslin, (7) Hôtel-Dieu, (8) Bouffay.	98
1.2	Profils par histogrammes de fréquence pour les indicateurs \bar{h} , \bar{w} , h/w et svf. Cas tests 1 à 4.	101
1.3	Profils par histogrammes de fréquence pour les indicateurs \bar{h} , \bar{w} , h/w et svf. Cas tests 5 à 8.	102
1.4	Signatures morphologiques théoriques pour a) un tissu urbain diffus, b) un tissu intermédiaire, c) un tissu urbain dense.	105
2.1	Variation de r et de r'' le long d'une rue qui débouche sur une intersection. r'' est non nulle aux points d'inflexion et marque une « accélération » dans l'évolution de r	109
2.2	Variation de $ r' $ selon la localisation du capteur, $ r' < \epsilon$ détection d'une rue	110
2.3	Détermination empirique du type d'espace de collection en fonction de l'indicateur Card_{3_i} (a) de 1 à 3 points d'articulation, carrefour; (b) pour 4 points d'articulation, configuration en place ou placette, pour 5 points d'articulation ou plus, configuration en esplanade.	111
2.4	Localisation des cas d'étude.	112
2.5	Plan masse du secteur de la Part-Dieu à Lyon.	114
2.6	Plan masse du secteur de la Place Graslin à Nantes	115
2.7	Plan masse du secteur Hôtel-Dieu à Nantes	115
2.8	Représentation de l'indicateur $ r'' $ sur nos trois terrains d'étude (a) secteur de la Part-Dieu à Lyon, (b) secteur de la Place Graslin à Nantes, (c) secteur Hôtel-Dieu à Nantes.	116
2.9	Les zones de transition (celles pour lesquelles $ r'' > \epsilon$) mettent en évidence les anfractuosités du front bâti.	117

2.10	Distribution de la dérivée r' dans le vide urbain pour les trois cas d'étude. Ce que nous présentons ici sont des fragments de chacun des cas afin d'avoir une vue détaillée sur l'évolution de la dérivée première le long du squelette informé (a) secteur la Part-Dieu, (b) secteur de la Place Graslin, (c) secteur Hôtel-Dieu.	118
2.11	Classification des zones de collection telles que détectées par la méthode basée sur la valeur de l'indicateur Card_{3_i} et la valeur de l'indicateur \bar{r}'	119
2.12	Limite de la détection automatiques des zones de collection via $ r' > \epsilon$	121
2.13	Dans le péri-urbain, le squelette informé met en évidence la prédominance des zones de collection. Les zones de canalisation disparaissent, les capteurs d'articulation étant très proches.	122
2.14	Illustration du pouvoir de synthèse du squelette informé. En l'absence des empreintes de bâtiments, l'espace urbain reste « lisible ».	123
3.1	Le pas d'échantillonnage des capteurs est égal à $\min(r, \frac{l}{2})$	127
3.2	L'étendue de la zone source est fixée à la plus grande des longueurs des tronçons de rues de la zone d'étude.	129
3.3	Choix du pas d'échantillonnage angulaire ou nombre de rayons lancés pour la détermination de l'isovist (à droite) et choix de l'angle d'ouverture β dans le cas directionnel (à gauche).	130
3.4	Composition de la matrice de corrélation \mathfrak{M}	132
3.5	Secteur de la Place de Mexico à Paris.	134
3.6	Représentation du secteur de la Place de Mexico à Paris en : (a) un plan masse à 613 empreintes de bâtiments, (b) une maquette simplifiée à 24 empreintes de blocs.	134
3.7	Profils morphologiques du (a) secteur de la Place de Mexico pour (b) l'indicateur \bar{h} , (c) l'indicateur \bar{w} , (d) l'indicateur h/w et (e) l'indicateur svf.	135
3.8	(a) Détection des zones de canalisation par la méthode décrite dans le chapitre ?? ($ r' < 0.2$), (b) Détection des zones de collection par « dilatation-érosion » avec un <i>buffer</i> fixé à 12 mètres, (c) Détection des zones de canalisation par la méthode décrite dans le chapitre ?? ($ r' \geq 0.2$), (d) Ces zones de collection sont obtenues par la conjonction des méthodes à l'origine des deux cartes (b) et (c). Pour mieux représenter les zones, nous avons reconstruit les plus grandes boules inscrites en chaque capteur morphologique.	136

3.9	Visualisation des résultats de simulation de mécanique des fluides numériques dans Paraview.	137
3.10	Diagrammes de dispersion et droites de régression (en rouge) entre différentes paires de variables morphologiques explicatives (en abscisse) et variables aérauliques expliquées (en ordonnée) : (a) pperim_bwd et \bar{v}_{vide} , (b) parea et \bar{v}_{canal} , (c) pperim_bwd et \bar{v}_{collec} , (d) svf et \bar{k}_{vide} , (e) svf et \bar{k}_{canal} , (f) svf et \bar{k}_{coll} , (g) Kurt(r) et $\sigma_{v_{vide}}$, (h) pmaxraylen_bwd et $\sigma_{v_{canal}}$	142
3.11	« Cartes de chaleur » pour l'ensemble des capteurs du vide urbain et pour une direction de vent orientée à 40°. Les indicateurs morphologiques sont représentés par taux de corrélation décroissant : (a) \bar{v}_{vide} , (b) pperim_bwd, (c) pmaxraylen_bwd, (d) pmaxraylen_*wd, (e) parea_bwd, (f) pavgraylen_bwd, (g) pperim_fwd.	144
3.12	(a) Carte de chaleur de la vitesse de vent moyenne pour les 32915 capteurs aérauliques, (b) Carte de chaleur de \bar{v}_{vide} pour les 900 capteurs morphologiques, (c) Superposition des 14 cartes de chaleur morphologiques pour les indicateurs corrélés à \bar{v}_{canal} (en mauve) et \bar{v}_{collec} (en orange).	147
1.1	(a) Le modèle implémenté dans la thèse, (b) Le modèle en perspective. Les nombres qui figurent dans la case <i>Mesurer</i> correspondent, dans chacun des cas, au nombre d'indicateurs à calculer effectivement.	153

Liste des tableaux

3.1	Présentation synthétique des 41 indicateurs.	51
1.1	Liste de quelques indicateurs proposés dans le chapitre 3 en référence aux indicateurs issus de l'état de l'art.	85
1.1	Présentation synthétique des cas d'étude.	99
2.1	Détermination empirique du type d'espace de collection en fonction de l'indicateur Card_{3_i}	111
3.1	Tableau récapitulatif des indicateurs morphologiques pour lesquels la corrélation avec l'un des indicateurs aéraulique est supérieure ou égale à 30% en valeur absolue et pour lesquels le test $p_{\text{val}} < 0.05$ est vrai. Les valeurs inscrites dans ce tableau correspondent à des taux de corrélation en %.	140
3.2	Tableau des valeurs (taille du noyau et taux de transparence) utilisées pour superposer les diverses cartes de chaleur explicatives de la variable aéraulique $\overline{v_{\text{canal}}}$	145
3.3	Tableau des valeurs (taille du noyau et taux de transparence) utilisées pour superposer les diverses cartes de chaleur explicatives de la variable aéraulique $\overline{v_{\text{coll}}}$	145
A.1	Coefficients de corrélation des indicateurs morphologiques à la vitesse moyenne du vent \bar{v}	159
A.2	Coefficients de corrélation des indicateurs morphologiques à l'énergie cinétique \bar{k}	160
A.3	Coefficients de corrélation des indicateurs morphologiques à l'écart-type de la vitesse σ_v	161
B.1	Coefficients de corrélation à la vitesse moyenne du vent \bar{v} , $\geq 30\%$ (en valeur absolue), avec test de significativité p_{val} . Les cases colorées en vert sont celles pour lesquelles l'hypothèse $p_{\text{val}} < 0.05$ est vérifiée.	163

B.2	Coefficients de corrélation à l'énergie cinétique \bar{k} , $\geq 30\%$ (en valeur absolue), avec test de significativité pval. Les cases colorées en vert sont celles pour lesquelles l'hypothèse pval < 0.05 est vérifiée.	164
B.3	Coefficients de corrélation à l'écart-type de la vitesse σ_v , $\geq 30\%$ (en valeur absolue), avec test de significativité pval. Les cases colorées en vert sont celles pour lesquelles l'hypothèse pval < 0.05 est vérifiée.	165

Première partie

Introduction

Chapitre 1

Introduction

The city is a mean not an end (la ville est un moyen et non une fin) est une citation extraite de (FRY 2014) où l’auteur analyse et critique notre compréhension actuelle des villes et de leurs conditions qui ne sont pas durables. Il explique que la rapidité de l’expansion urbaine mène à une croissance permanente de la concentration démographique, ce qui génère des méga-cités. Cette expansion urbaine, corrélée au changement climatique et à ses incidences multiples complique la planification des villes. Selon (FRY 2014), il faut articuler les projets d’avenir des villes non pas de façon à obtenir des solutions instantanées ou utopiques, mais plutôt dans la vision d’un *climate-sensitive design*, en mettant en oeuvre des actions de prévention de manière à éviter les actions de réparation, sauf quand celles-ci sont inévitables.

Cette perspective exige d’intégrer des enjeux environnementaux et notamment microclimatiques dans la conception des quartiers mais aussi des îlots et des bâtiments afin de ménager le confort des habitants. BENTLY et al. (1985) propose ainsi la notion de *responsive environment*, comme environnement urbain réactif ou adaptatif ménageant le confort du piéton. L’environnement s’entend ici à une échelle très proche de l’usager, de sa vie quotidienne, de son usage des lieux, de son déplacement.

Dans un registre proche, CARMONA (2010) mentionne Francis TIBBALDS, architecte anglais auteur de l’ouvrage *Making People Friendly Towns* (publié en 1992) dans lequel il souligne l’importance de se soucier de l’effet des formes sur l’appropriation de l’espace par les individus.

Enfin, ELLIN (2006) évoque la notion d’urbanisme intégral, *integral urbanism*, où l’intégralité se manifeste dans l’idée que les individus et la nature qui les environne doivent être étudiés comme un ensemble étroitement lié. L’environnement urbain est, ici, un milieu hybride où les composantes ne sont pas séparées l’une de l’autre.

Pour résumer, nous ne pouvons que souscrire au principe selon lequel la

planification urbaine est l'art de concevoir des milieux pour les citoyens : *the art of [urban design's] concern is about making places for people* (CARMONA et al. 2012, p. vi).

Pour explorer cette relation milieu-individu du point de vue du confort vis-à-vis du microclimat urbain, nous nous focalisons, dans le cadre de ce travail de thèse, sur sa seule composante aéraulique. L'état d'esprit qui sous-tend notre recherche vise à produire des méthodes et outils qui puissent garantir une bonne conception des espaces publics au sens de la perception du vent par les piétons.

L'organisation et la configuration spatiale de la ville conditionnent l'atmosphère urbaine. La forme des villes, des quartiers et des rues influe sur les conditions climatiques, et produit des microclimats particuliers à ces différentes échelles (MOONEN et al. 2012). La disposition des bâtiments, leurs dimensions et leurs espacements modifient les conditions micro-climatiques à l'intérieur comme à l'extérieur des bâtiments.

Les décisions de planification urbaine, les réglementations qui régissent la construction en ville, ont une forte influence pour modifier le microclimat et rendre l'espace plus ou moins confortable.

L'espace urbain est soumis à différentes nuisances. Qu'il s'agisse de pollutions atmosphériques ou polliniques à l'intérieur comme à l'extérieur des bâtiments, d'amplification locale du phénomène d'îlot de chaleur urbain du fait de la dissipation insuffisante de l'excès de chaleur, de confort athermique ou aérodynamique insatisfaisant, etc. les désordres sont explicables, pour une part importante d'entre eux, par la mauvaise circulation du vent en ville ou, au contraire, par des effets de rafales importantes mal maîtrisés.

Le vent en ville est un phénomène complexe qui varie au fil du temps, en vitesse comme en direction (phénomène de rafales). Quand l'air afflue d'un territoire rural périphérique vers un espace urbanisé, il est confronté aux obstacles que présente le milieu urbain et auxquels il doit s'adapter. Il s'infiltré entre les masses bâties. Cette infiltration crée des phénomènes aérodynamiques variés (SANTAMOURIS et ASIMAKOPOULOS 2001) tels que des accélérations locales, des ralentissements ou des changements de direction. Le vent fait partie des facteurs micro-climatiques qui affectent d'une manière significative l'atmosphère urbaine et le confort extérieur. Il interagit avec les autres phénomènes climatiques : il facilite ou non le rafraîchissement ou le refroidissement des surfaces, l'extraction de l'humidité, le transport de la chaleur, de la vapeur d'eau et des polluants, etc. Pour Alain GUYOT¹, « élément d'agrément, de jeu, de nuisance et aussi de risque et de dégradation, le vent

1. Cf. <https://fr.calameo.com/read/000356208c8511af8779b> (consulté en juin 2019).

est un des facteurs climatiques qui modifie nos activités et qualifie l'ambiance de l'aménagement urbain et du confort des espaces extérieurs »

Selon E. JOHANSSON (2006), le vent est le deuxième paramètre, après le rayonnement solaire, en termes d'influence sur le microclimat. Ce paramètre est généralement négligé par les concepteurs d'espace bien qu'il soit avéré que la vitesse de vent au niveau du piéton compte parmi les paramètres les plus déterminants pour le confort dans l'espace ouvert (STATHOPOULOS 2006). Nous identifions deux voies par lesquelles le vent modifie notre perception. Le vent agit sur le confort aérodynamique du piéton – notion mécanique – par le biais de la gêne liée à l'écoulement jusqu'à la perte de stabilité. Le vent modifie aussi le ressenti thermique du piéton. Il peut amplifier la sensation de froid, ou atténuer celle de chaleur. En été, il peut donc rendre un espace plus confortable mais le rendre très désagréable en hiver. Dans les recherches de BOUSSOUALIM (2002), relatives à l'incidence du microclimat sur l'usage et les activités en espace public extérieur, le vent est évoqué, en première position, comme facteur de gêne climatique limitant l'usage de l'espace. Elle cite : « 37,5 % ont déclaré que le vent est le premier élément gênant et limitant leurs activités divertissantes, surtout place des Marronniers, 25 (24%) personnes ont évoqué le vent fort comme élément gênant » (BOUSSOUALIM 2002, p. 133).

Une évaluation de la trajectoire du vent autour des bâtiments peut modifier radicalement notre manière de concevoir les espaces extérieurs. Elle peut permettre de déterminer l'emplacement du mobilier urbain afin de le rendre protecteur et de localiser les zones adaptées à chaque type d'activité sociale. Lors la conception de l'aménagement urbain il ne suffit donc pas uniquement d'imaginer les perspectives les plus attrayantes mais d'anticiper aussi les conditions de confort les plus favorables.

Le vent agit aussi sur d'autres éléments qui touchent à la santé et à la qualité de vie des individus. C'est le cas de la pollution qui dépend notamment des mouvements d'air. La dispersion des polluants et leur infiltration dans les constructions sont gouvernées par la trajectoire et la vitesse du vent.

La question est alors posée de savoir comment et à quelle échelle il faut gérer le vent dans le cadre d'un projet urbain ?

A l'échelle de la ville on peut par l'expérience constater que le tracé des villes et la composition des masses construites peut protéger les quartiers du vent en y ralentissant l'infiltration ou, au contraire, les exposer en la facilitant. L'obstacle au vent est très lié au gabarit de la ville, à son « micro-relief ». Certaines villes déploient une trame viaire dans l'objectif de laisser le vent s'infiltrer (c'est par exemple le cas du quartier de San Juan à Porto Rico, Fig. 1.1a), en alignant les rues selon la direction du vent dominant. Diriger les rues suivant une direction opposée à celle du vent dominant permet de réduire

voire d'annuler l'effet des rafales de vent. Venise est un exemple concret de ces deux cas (Fig. 1.1b et 1.1c). Les tissus des villes arabes médiévales contrôlent aussi l'intensité des fluctuations du vent dans l'espace ouvert à travers le choix des directions des rues (Fig. 1.1d). De même pour la ville de Valette, Malte, sa trame urbaine orthogonale est positionnée en concordance avec la rose des vents pour permettre une ventilation naturelle maximale (Fig. 1.1e). L'idée est d'atténuer l'effet de chaleur par le biais de la forme architecturale et urbaine, en amplifiant, déphasant ou protégeant contre le vent.

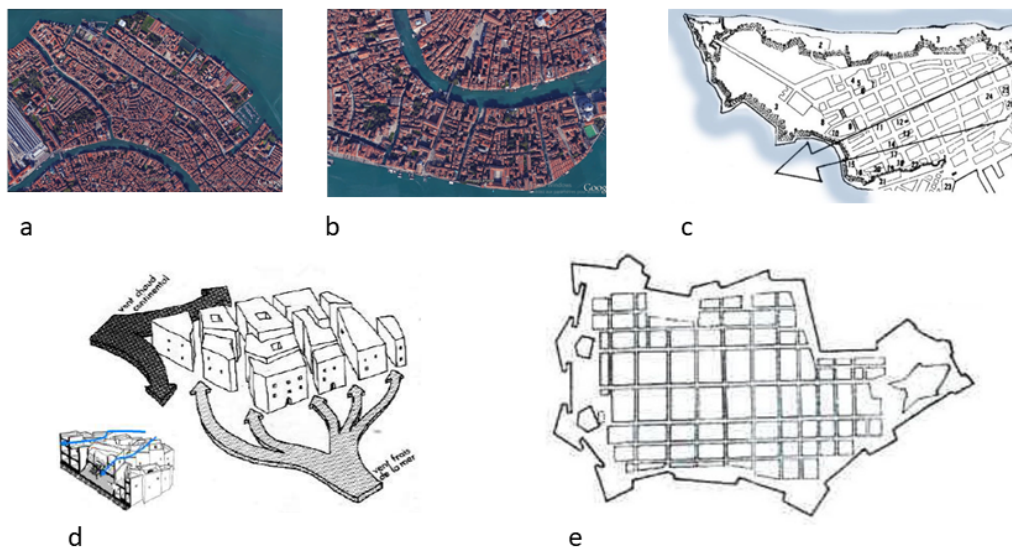


FIGURE 1.1 – Tracés urbains et stratégies d'adaptation au vent : a) cotés Est et Nord de Venise, fermeture et blocage au vent (source *Google Earth*), b) sud de Venise, des canaux plus larges facilitent la pénétration du vent (source *Google Earth*), c) quartier de San Juan à Porto Rico (source : *Les cahiers de la recherche architecturale* 42/43), d) architecture traditionnelle arabe (source : cours Olivier FLAMAND 2015), e) Valette, Malte (source : *Cities of Wind*, Grosso *et al.* 2000).

Dans le domaine aéraulique, la ville est décrite comme une résistance à l'écoulement du vent, un champ de rugosité ou un groupement d'obstacles de hauteurs variables ou non. Ces obstacles qui sont arrangés selon différents schémas entravent la circulation de l'air, la freinent, la ralentissent, mais peuvent aussi l'accélérer localement.

À une échelle proche de celle du piéton, gérer des effets d'accélération du vent qui ont par exemple lieu au coin de bâtiments, ou ceux de canalisation dans les corridors, présente de réelles difficultés lorsque les formes sont construites. Implanter des arbres dans des cours ou des patios, des arbustes

dans les angles pour réduire les nuisances engendrées par des rafales de vent, sont des solutions coûteuses et assez peu pérennes car la végétation est fragilisée par le vent et peut générer des risques liés à la chute de branches. La construction de brise-vent pose notamment des problèmes esthétiques, mais aussi de gestion des flux de personnes et de maintenance.

Comment connaître les conditions de vent locales ?

A l'heure actuelle, deux approches numériques sont appliquées pour évaluer le vent en ville : le recalage de profils de vent ou la simulation aéraulique. La première solution permet d'obtenir des profils moyens qui rendent compte de l'effet d'une forme urbaine sur la vitesse de vent à différentes altitudes, mais pas des effets locaux tels que des effets de coins ou de canalisations. La seconde basée sur la mécanique des fluides demande une expertise importante et des temps de calcul très longs. Entre ces deux approches, il n'existe pas de méthode qui permette de qualifier le vent localement dans un tissu urbain. Des solutions expérimentales sont également disponibles comme les simulations en soufflerie mais restent coûteuses et demandent une expertise externe.

Pendant, si l'on n'anticipe pas, en phase de conception, d'éventuels troubles d'usages liés au vent, alors des actions correctives à l'issue incertaine sont requises ultérieurement. Celles-ci sont dues à la non prise en compte de l'implication des formes urbaines dans le microclimat. Dans une démarche de conception urbaine vertueuse, il faudrait disposer très amont d'outils itératifs permettant de caractériser l'effet des formes sur le vent en ville.

Une des conséquences de l'absence d'outil adapté à cette phase et aux contraintes de fonctionnement des agences impliquées dans la conception architecturale et urbaine est que, au lieu d'une approche préventive, ce sont des mesures correctives qui sont requises, augmentant les coûts des projets pour remédier aux zones d'inconfort caractérisé.

1.1 Problématique

Anticiper la circulation du vent dans le projet urbain, très tôt en phase de conception, est manifestement indispensable à une conception soucieuse de l'impact des formes sur le bien-être et la santé des futurs habitants. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi de nous intéresser à la mise à disposition d'outils pour les urbanistes et concepteurs pour prévoir l'impact de leur *design* sur l'environnement aéraulique dès la phase d'esquisse.

Parlant du processus de *design urbain*, (SCHÖN 2017) le décrit comme

une « conversation » ou un dialogue entre définition et compréhension du « problème » et des réponses ou « solutions » possibles, qui prend place au fil du temps, au cours duquel la compréhension du problème et les réponses possibles évoluent. Les concepteurs modifient constamment leurs résultats à la lumière de nouvelles informations et des influences qui apparaissent, ce qui provoque un processus de *design* répétitif et itératif au travers duquel les solutions sont progressivement affinées (ZEISEL et EBERHARD 2006). Un processus de *design urbain* réussi est le produit d'une combinaison de fonctionnalités et d'objectifs environnementaux et sociaux. C'est dans ce sens que l'on s'engage en développant un outil, qui sera intégré dans une telle démarche de façon à garantir la prise en compte de la dimension microclimatique aéraulique au niveau du piéton et de son confort.

Lors d'un *Workshop UDCW (Urban Design Climate Workshop)* en août 2018, à New York, un groupe mondial et pluridisciplinaire d'experts du climat urbain (*IAUC International Association on Urban Climate*) et une équipe basée à New York (urbanistes, architectes et collectivités locales) ont présenté un prototype d'intervention pour le site new yorkais stratégique de *Sunnyside*. Comme relevé par Edward Ng lors de cette réunion, la perméabilité et la fluidité de la circulation de l'air sont importantes pour dissiper l'excès de chaleur urbain. L'accent a ainsi été mis sur la disposition de la trame viaire, qui doit être mieux connectée, avec des rues qui doivent être plus larges et reliées aux îlots avoisinants. Ce *workshop* a permis de confirmer que l'un des enjeux consiste à savoir façonner les « pores » urbains et disposer les bâtiments de manière à garantir un environnement extérieur confortable et sain pour les usagers du lieu.

La question que pose notre travail de thèse est la suivante : peut-on trouver une solution pour prévoir les fluctuations du vent et détecter d'éventuelles zones d'inconfort ou de confort à l'échelle du piéton ? Cette solution doit en outre ne reposer que sur les seules caractéristiques morphologiques du tissu urbain, sans nécessiter de mesures de vent en soufflerie ou par simulation.

Pour ce faire, il faut se focaliser sur l'enveloppe urbaine complexe qui contribue, par sa forme et ses dispositions, à modeler la vitesse du vent et sa direction.

On suppose donc que l'on peut proposer un outil d'aide à la conception basé sur l'analyse morphologique du tissu urbain, qui permettra de rendre compte des effets de cette forme sur le vent.

Au préalable, on fait l'hypothèse qu'étudier et interpréter les variations de forme, dans le plan horizontal comme en volume, doit permettre d'identifier des configurations urbaines selon leurs formes et d'en dériver des classifications. Ces configurations peuvent ensuite être associées à leurs impacts sur le vent, déterminant ainsi des zones de confort et d'inconfort. Cette démarche

peut être rapprochée des méthodes d'identification par les effets d'ambiance développées au CERMA, au début des années 2000, dans un ensemble de thèses relatives à l'étude d'autres phénomènes comme la lumière ou le soleil.

Nous supposons également que si de telles configurations peuvent être rapprochées d'effets réels sur le vent, leur détection peut être intégrée dans des outils d'aide à la conception accessibles aux architectes et aux urbanistes soucieux de concevoir les espaces publics extérieurs propices à la ventilation urbaine et au confort des habitants.

1.2 Objectif

L'objectif principal de cette thèse est de contribuer à la production d'une aide à la conception dédiée à l'étude du vent en ville lors des phases amont des projets urbains. Le démonstrateur que nous avons mis en oeuvre est basé sur la qualification géométrique, planimétrique et volumétrique des tissus urbains.

Pour atteindre cet objectif principal, nous identifions les objectifs méthodologiques suivants :

- Production d'un outil de lecture de la forme urbaine qui a pour rôle de documenter le terrain d'étude.
- Identification des différentes composantes du vide urbain à partir de leurs caractéristiques morphologiques.
- Proposition d'un ensemble d'indicateurs morphologiques à différentes échelles susceptibles de rendre compte des effets du vent.
- Identification et sélection, par comparaison aux résultats issus de simulations aérauliques, des indicateurs qui caractérisent le mieux les formes urbaines par rapport aux écoulements qu'elles produisent.

1.3 Méthodologie

L'approche développée dans le cadre de ce travail doctoral est exclusivement numérique – voire même géomatique – au sens où elle ne repose pas sur des dispositifs d'enquête, de la mesure sur site ou des expérimentations en veine aéraulique. Il ne s'agit pas d'une classique approche de mécanique des fluides numériques, puisque les simulations en veine numérique ont été délibérément confiées à un partenaire extérieur pour bénéficier de son expertise métier. Nous nous sommes volontairement placés dans le contexte d'un Système d'Information Géographique ou SIG pour 1) nous calquer sur le contexte et les contraintes opérationnelles d'un service ou d'une agence

d'urbanisme, 2) bénéficier du pouvoir de représentation et de synthèse des cartes thématiques.

Deux grandes étapes jalonnent ce travail de thèse :

- La première est dédiée à la conception de méthodes et d'un outil support pour la caractérisation géométrique d'un tissu urbain au niveau d'échelle du piéton.
- La seconde est dédiée à l'utilisation de ces méthodes pour qualifier la forme urbaine et identifier d'éventuelles corrélations entre données aérauliques issues des simulations de mécanique des fluides numériques (*Computational Fluid Dynamics* ou CFD) et caractéristiques morphométriques.

L'ensemble des travaux a été implémenté dans le contexte du système d'information géographique QGIS. Cet outil, largement utilisé dans le cadre des études urbaines, a été sélectionné pour ses propriétés cartographiques, sa capacité de géotraitement de gros volumes de données à composante spatiale, mais aussi son accessibilité tant pour le développement que pour l'usage (outil *open source*).

Pour ce qui concerne les simulations en veine numérique et comme nous l'avons écrit précédemment, elles ont été délibérément confiées à un partenaire extérieur – le CSTB en l'occurrence – pour bénéficier de son expertise métier.

1.4 Plan de la thèse

Ce manuscrit est découpé en trois parties et huit chapitres (introduction et conclusion exceptées).

La première des trois parties, dédiée à l'étude de la forme de la ville, est composée de trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à un état de l'art de caractérisation de la forme urbaine, ensemble de concepts, méthodes et outils de lecture de la ville à partir de son « systèmes des espaces libres ». Le second chapitre présente un état de l'art relatif à la caractérisation de dynamiques en ville. Ces deux chapitres d'état de l'art nous permettent d'introduire, dans le troisième chapitre, le concept de « squelette informé » qui permet de « simplifier », « capter » et « mesurer » les variation du vide urbain.

La seconde partie, dédiée à l'étude du vent en ville, est composée de deux chapitres. Le premier d'entre eux présente un état de l'art sur l'écoulement du vent autour des bâtiments. Le second présente la méthode que nous avons mis en oeuvre pour intégrer des données aérauliques issues de simulations CFD dans notre outil de lecture de la forme urbaine.

La troisième et dernière partie est dédiée aux trois applications de nos

travaux. Nous les développons dans autant de chapitre. Le chapitre 1 illustre l'efficacité du squelette informé pour analyser l'homogénéité (ou l'hétérogénéité) de la forme urbaine. Le chapitre 2 montre que ce même squelette informé peut aussi être utilisé pour identifier les composantes élémentaires du vide urbain (rue canyon, place, croisement de rues). Enfin, la troisième et dernière application présentée dans le chapitre 3 s'attache à établir des corrélations entre les informations morphologiques ponctuelles et les caractéristiques du vent aux positions correspondantes.

Deuxième partie

Étude de la forme de la ville

Chapitre 1

État de l'art : caractérisation de la forme urbaine

Anatomie n.f. : Science qui a pour objet l'étude de la forme et de la structure des êtres organisés, et celle des rapports des organes qui les constituent

Dictionnaire Larousse

Physiologie n.f. : Partie de la biologie qui étudie les fonctions et les propriétés des organes et des tissus des êtres vivants.

Dictionnaire Larousse

La caractérisation de la forme urbaine que nous proposons dans ce manuscrit dissocie « la forme physique et spatiale de l'objet urbain » (HILLIER et HANSON 1988), de l'ensemble des pratiques et processus sociaux, économiques, politiques, etc. qui la traversent. Cette impasse sur l'ensemble des pratiques et processus est délibérée et nous la justifions par notre ambition de recherche qui s'attache à l'étude du vent en ville.

1.1 Lectures de la forme urbaine

Dans l'ensemble des très nombreux travaux relatifs à l'analyse de la forme urbaine, deux nous semblent à distinguer. Le premier que l'on doit à BORIE et DENIEUL (1984), le second à LÉVY (2005).

Pour (BORIE et DENIEUL 1984, p. 3), « on peut distinguer quatre systèmes : le système parcellaire¹, le système viaire², le système du bâti, le

1. Comme ensemble de relations entre les parcelles.

2. Comme ensemble de relations entre les rues.

système des espaces libres ». Cette approche correspond à « une vision physiologique découpant l'organisme en fonctions et systèmes » par opposition à une « vision anatomique découpant l'organisme en différents membres et organes ».

Pour (LÉVY 2005) et, en analogie à la distinction entre ethnographie et ethnologie, l'étude de la forme urbaine « ne doit pas être réduite à une "morphographie" urbaine ». Pour dépasser la seule description et proposer explication, interprétation voire articulation à ses significations, il identifie cinq registres de forme : « l'approche de la forme urbaine comme forme du paysage urbain »³, « comme forme sociale »⁴, « comme forme bioclimatique »⁵, « comme forme des tissus »⁶ et « comme forme des tracés »⁷.

L'étude de l'écoulement du vent en ville, à l'image du sang dans les veines, relève plus d'une vision physiologique qu'anatomique justifiant que nous nous intéressions aux quatre systèmes évoqués par BORIE et DENIEUL (1984).

Pour autant, l'atomicité de la parcelle est inadaptée. Elle est effectivement, potentiellement, simultanément occupée par un bâtiment et un espace libre où le vent est susceptible de s'écouler. Cette hétérogénéité au regard du comportement aéraulique rend de fait, l'approche par système parcellaire inexploitable. Il nous semble que, pour cette même raison, son dual, le système viaire, est disqualifié. A contrario, les limites qui accompagnent le système bâti et le système des espaces libres nous semblent compatibles avec la circulation du vent en ville. Les espaces qu'elles enserrant présentent en effet, en termes d'écoulement du vent, une plus grande homogénéité.

La grille de lecture proposée par (LÉVY 2005) présente une plus grande diversité. Mais, d'évidence, l'analyse du vent en ville et sa corrélation à la forme urbaine, relèvent du registre « de la forme urbaine comme forme bioclimatique ».

3. « c'est-à-dire l'espace urbain visuellement saisi dans sa tridimensionnalité et dans sa matérialité plastique (texture, couleur, matériaux, styles, volume, gabarits... du bâti et des espaces publics) » (LÉVY 2005, p. 30).

4. « c'est-à-dire l'espace urbain étudié dans son occupation par les divers groupes sociaux, démographiques, ethniques, les types de famille, ou la distribution des activités et des fonctions dans la ville » (LÉVY 2005, p. 30).

5. « c'est-à-dire l'espace urbain étudié dans sa dimension environnementale, comme micro-climat (urbain), tant dans ses variations géographiques par quartier, que dans sa diversité liée aux types de tissu (ouvert/fermé/semi-ouvert), selon l'orientation (héliothermique), selon le site (eau, relief, végétation) » (LÉVY 2005, p. 31).

6. « consiste [...] en l'étude des interrelations entre les éléments composants : parcellaire/viaire/espace libre/espace bâti, constitutifs de tout tissu, en rapport avec le site, ou en focalisant l'analyse sur certains composants particulièrement privilégiés » (LÉVY 2005, p. 31).

7. « renvoie à la forme géométrique du plan de la ville (plan organique/plan géométrique ; plan orthogonal/plan radioconcentrique) » (LÉVY 2005, p. 32)

Précisons maintenant les composantes qui concernent notre objet d'étude.

1.2 Système du bâti, système des espaces libres et interrelations

1.2.1 Approche urbanistique

Le système bâti et le système des espaces libres, qui sont constitutifs de la ville, s'imbriquent étroitement et ne peuvent se concevoir isolément. Pour autant, la manière de penser la ville, soit en se concentrant principalement sur le système bâti, soit en se concentrant principalement sur le système des espaces libres, soit enfin en intégrant les deux systèmes simultanément donne à voir des villes très différentes. Pour RENAUDIE (2011, p. 37), qui compare les villes occidentales aux villes asiatiques, « en Occident, nous posons et nous organisons souvent d'abord le bâti [le système bâti], les pleins, et le vide [système des espaces libres] est ce qui reste ». A contrario, dans les villes asiatiques RENAUDIE (2011, p. 37) estime que le vide « est considéré comme plein [...] Le vide ne se contente pas d'être une absence de constructions, il est ce qui permet, autorise, accepte les constructions, il est ce qui gère la ville. Le vide inclut les pleins tout autant que le non-plein ».

Dans cette partie nous ne cherchons pas à développer une approche comparative de la lecture du vide selon l'origine géographique, mais bien plutôt à montrer les différentes lectures du système des espaces libres selon qu'ils sont pensés comme composante urbaine, élément structurant en termes de conception, ou qu'ils sont pensés comme un « espace raté », un « inattribué », un « inachevé » que les concepteurs cherchent à « contextualiser » et auquel il s'agit de « donner du sens » (RENAUDIE 2011, p. 37-38).

Du *no-man's-land* au *"found" space*

Lorsque le bâti prévaut, lorsque la ville n'est pensée que par rapport à son système bâti, le système des espaces libres devient un ensemble de « résidus provenant de la division du terrain en blocs rectangulaires » (SITTE 1980, p. 135). Il ne présente alors plus qu'« une vacuité », « un trou dans le tissu », « un espace entre les objets » qui « n'a ni forme ni fonction » (RENAUDIE 2011).

SITTE (1980, p. 93) le compare à un « reste [...] baptisé rue ou place », avec des irrégularités qui ne composent pas avec le système du bâti, des rues sans unité, un réceptacle des contraintes topographiques et des impensés du site. Cette lacune de la forme produit une lacune du sens. Ainsi, pour

(TRANCIK 1986), le système des espaces libres est un *no-man's-land*, un espace délaissé (*lost space*), dédié notamment au parcage de la voiture dans les zones commerciales des périphéries de la ville moderne, ou aux friches militaire ou industrielle. Il l'oppose au système du bâti qu'il qualifie de *positive urban space* voire même de "*found*" *space*.

Deux composantes régulatrices

Les rues et les places font partie du vide urbain. Elles sont parfois, dans certains tracés, des composantes essentielles. HATZFELD (2012) rapporte ainsi que « lorsqu'en 1748, Nolli représente la ville de Rome, son célèbre plan met en évidence la relation entre vides et pleins. Les vides [système des espaces libres] donnent la structure urbaine [...] leurs proportions (vides/bâti) sont très lisibles, qu'ils soient tracés par une volonté régulatrice, ou qu'ils soient négociés par les pas et les flux humains dans une longue histoire ». Elle évoque une interrelation entre les deux systèmes régulée par « une relation ordonnée ».

SITTE (1980, p. 92) partage l'idée des deux systèmes qui fonctionnent ensemble et qui constituent « une totalité close dont la forme [est] déterminée en vue de l'effet [que le système des espaces libre doit] produire ». Cette approche par la fonction est d'ailleurs partagée par Lao Tseu pour qui « la matière est utile mais c'est de son absence que naît le fonctionnement des choses » (Le Livre de la Voie, Lao Tseu, traduit par Jean Lévi, Albin Michel, extrait de (RENAUDIE 2011, p. 37)).

Pour BORIE et DENIEUL (1984, p. 27), dans ces formes urbaines, le système des espaces libres « entaille » le plein. Son importance apparaît alors dans l'homogénéité et la complémentarité de sa forme vis-à-vis du système bâti. Il prend alors généralement une forme de grille orthogonale, radio-concentrique, triangulaire, etc. qui ordonne l'agencement du bâti.

Ces villes tracées à partir du système des espaces libres, divisent ce dernier en un espace public et un espace privé. Elles peuvent ainsi donner une image de « ville contrainte », qui appelle alors en retour à *libérer les villes de la contrainte, de la tyrannie de la rue!* (CORBUSIER 1946, p. 83).

Définitions

Ces deux visions de la ville et de ses systèmes bâti et des espaces libres s'opposent. Posons quelques définitions pour objectiver le propos.

En référence à (BORIE et DENIEUL 1984), on appelle **système du bâti**** ou **plein**** l'ensemble des masses construites de la zone urbaine étudiée. Cet ensemble est traité dans une vision « plan de masse » simplifié. Dans cette ap-

proche, seules les masses construites apparaissent comme des blocs opaques, vus du ciel, indépendamment d'éventuels niveaux « vides » tels qu'un rez-de-chaussée de bâtiment sur pilotis.

Conscients de la complexité intrinsèque des formes architecturales et de l'« encore plus grande complexité des tissus urbains », BORIE et DENIEUL (1984, p. 3) proposent « de procéder à une décomposition du tissu urbain en "systèmes" », de préférence à une « décomposition par parties constitutives » (subdivision itérative du territoire, en quartiers, îlots, etc.). Ils relèvent en effet que, dans un tel découpage en zones géographiques, « la difficulté essentielle réside dans le fait que chaque secteur géographique est constitué de composants hétérogènes : on trouve dans un îlot à la fois des bâtiments, des espaces laissés libres, un système parcellaire, toutes choses qui sont différentes sur le plan de l'analyse morphologique » (*ibid.*).

BORIE et DENIEUL (1984, p. 3) définissent alors un système « par la manière dont sont organisées les relations entre les composants de même nature morphologique » et introduisent en p. 20 une classification fonction de « la continuité ou la discontinuité de l'ensemble des masses construites » :

- On appelle **bâti ponctuel**** un bâti discontinu qui donne à voir une représentation fragmentée de l'espace construit. Les tissus pavillonnaires contemporains sont des exemples de bâti ponctuel.
- On appelle **bâti linéaire**** un ensemble de bâtiments mitoyens, formant une seule ligne continue, dans une seule direction. Un tel bâti donne à voir une représentation hiérarchisée et progressive de l'espace construit dans laquelle on n'identifie pas individuellement les bâtiments mais plutôt une masse entière. Dans cette classe de bâti, seules deux façades délimitent chaque bâtiment, les autres cotés sont mitoyens. Le coron relève d'un tel bâti.
- On appelle **bâti planaire**** une configuration dans laquelle les bâtiments sont accolés les uns aux autres de presque tous les côtés, de manière à former une masse continue uniquement interrompue par les rues. C'est une disposition dans laquelle il y a continuité du bâti dans plusieurs directions de l'espace. Le bâti planaire est généralement perforé par des cours plus ou moins importantes qui ne compromettent pas sa continuité. La Médina est un exemple d'un tel bâti.

Pour (BORIE et DENIEUL 1984, p. 25), une « typologie des espaces libres est nécessairement fonction directe de celle du système bâti ». En référence à leurs travaux, nous appelons **système des espaces libres**** mais aussi **espace ouvert****, **espace non construit**** ou encore **vide urbain****, l'espace interstitiel laissé vide par les bâtiments (le plein) « qui lui sont adjacents ». Ils « apparaissent [alors] comme le négatif (au sens photographique du terme) du système bâti ». Comme le relève HATZFELD (2012), cet espace est pluriel

au sens où il comprend des « rues et autres voies de circulation (voies ferrées), quais, places, jardins, parcs, et tous les interstices. . . ».

1.2.2 Interrelations vide-plein

Comme le remarquent BORIE et DENIEUL (1984, p. 25), « dans un tissu urbain, les caractéristiques respectives du bâti et des espaces libres semblent donc croître ou décroître en raison inverse les unes des autres ». Pour évoquer ce rapport inverse, TELLER (2001, p. 179) écrit : « l'espace ouvert partage une relation de stricte dualité avec la forme bâtie qui l'entoure ».

Plus précisément, pour BORIE et DENIEUL (1984, p. 25), « un degré croissant de continuité de masses bâties va entraîner un degré croissant de discontinuité des espaces libres, et vice versa. Plus les éléments bâtis sont discontinus, c'est-à-dire fragmentés en un grand nombre de bâtiments isolés les uns des autres, plus l'espace libre est continu tout autour, c'est-à-dire indifférencié a priori. Au contraire, plus les éléments bâtis sont continus, c'est-à-dire s'ils ont tendance à être accolés les uns aux autres, plus l'espace libre est discontinu, c'est-à-dire fragmenté en un grand nombre d'espaces plus petits et donc différenciés a priori ».

Pour TELLER (2001, p. 179), la relation de rapport inverse permet de distinguer deux types d'espace : « les espaces pour lesquels cette relation est de domination (les espaces dominants) et ceux pour lesquels cette relation est de subordination (les espaces résiduaux) ». Dans le même registre, BORIE et DENIEUL (1984, p. 27) évoquent ainsi les côtoiements suivants :

- Passivité du plein et activité du vide : le vide impose sa forme, le bâti s'adapte avec des formes résiduelles surtout au niveau du pourtour immédiat.
- Passivité du vide et activité du plein : les limites du vide sont définies par la disposition du bâti qui a une forme parfaitement géométrique. L'espace libre est une résultante de ce qui « reste » comme espace non bâti. Le construit s'impose au vide.
- Activité et passivité réciproque : ce dernier type correspond à ce que les auteurs appellent des places à géométries déformées ou organiques, ou encore à des places à géométries équilibrées.

Dans la suite de ce manuscrit, le système des espaces libres est fusionné, sans différenciation entre les espaces privés et les espaces publics.

1.2.3 Approche ontologique

Pour COUCLELIS (1992), la géographie est confrontée, pour décrire l'espace, à une tension entre l'« objet » (un point, un segment de droite, une

surface plane, etc.) et le « champ » (donnée de type image ou *raster*). Selon l'auteur, cette tension – elle évoque une controverse – est analogue à l'opposition entre ontologies *atomiste* et *plenum* dans le registre de la philosophie de la physique.

Dans une conception *atomiste*** de l'espace urbain, ce dernier est peuplé d'une collection d'« objets » discrets, bien identifiés, parfaitement circonscrits, insécables, qui « peuvent être manipulés dans l'espace [...] sans que leur identité soit de ce fait altérée » (TELLER 2001, p. 182). Le système des espaces libres dont les « limites ne sont pas matérielles » ne relève généralement pas de cette catégorie.

La conception *plenum*** de l'espace urbain a été définie en référence à la notion de champ utilisée dans l'étude des milieux continus. Dans cette acception, l'espace est assimilé à un ensemble de potentiels et paramètres qui permettent de décrire la structure et l'évolution d'une grandeur étudiée (comme par exemple un champ scalaire de températures d'air ou un champ vectoriel de vitesses des particules d'un fluide). Appliquée à l'étude de la ville, et comme le remarque (SARRADIN 2004, p. 58), dans une conception *plenum*, « l'espace n'existe pas a priori », il « résulte d'une combinaison singulière de toute une série de facteurs, comme les axes dominants, la répartition des masses construites, etc. ». Cette approche ontologique simplifie la compréhension et la formalisation du système des espaces libres comme lieu où « les limites d'un espace ouvert urbain [sont] floues et fortement liées à des contraintes externes — toute modification de la masse construite en un point du système, par exemple, intervient indirectement sur les espaces ouverts urbains qui l'entourent » (*ibid.*). Elle rend aussi possible « le chevauchement de différents espaces ouverts » (*ibid.*).

1.3 Analyse du vide urbain

Pour (TELLER 2001, p. 175), « l'espace ouvert urbain est par nature continu [...] De ce fait, les limites d'une place ou d'une rue sont en partie virtuelles et demeurent souvent assez ambiguës à la différence de celles des composants discrets, matériels du monde physique »⁸. Dans cette perspective, face à la proposition que « l'espace ouvert continu [soit] assimilé à autant de "boîtes urbaines", délimitées par des murs (les façades environnantes), un plancher (le sol) et un plafond (le ciel au-dessus de l'espace) », il objecte que cette juxtaposition de « boîtes urbaines relève d'une certaine abstraction [...] qui [...] est loin d'être neutre » (TELLER 2001, p. 182).

8. L'auteur ajoute cependant qu'il existe « quelques exceptions notables à cette affirmation » tel le Forum de Pompéi.

Pour s'affranchir de cet arbitraire, plusieurs méthodes ont été proposées visant, pour les premières, à découper l'espace en surfaces, pour les secondes à découper l'espace en segments, et pour les dernières à représenter l'espace par un champ continu (ou non) de valeurs. Nous présentons ces diverses méthodes dans les sous-sections qui suivent.

1.3.1 Approches par partitionnement

Dans le cadre d'un ensemble de travaux fondateurs de la *Space Syntax*, HILLIER et HANSON (1988) ont proposé une méthode de partition de l'espace ouvert à partir du plus petit ensemble de convexes les plus volumineux couvrant le plan⁹.

Cette approche ne permettant pas d'obtenir une solution unique¹⁰, PE-PONIS et al. (1997) proposent un découpage en partitions convexes basées sur la notion d'information visuelle stable. Ces techniques dites du s- ou du e-partitionnement présentent toutefois l'inconvénient d'être « mal adaptée[s] pour des espaces urbains, pour lesquels le partitionnement risque de devenir inintelligible » (SARRADIN 2004, p. 52). Pour (TELLER 2001, p. 191), « plus grave encore, tout manque d'homogénéité dans le niveau de détail de l'ensemble du modèle est susceptible d'induire des aberrations assez importantes ».

1.3.2 Cartes axiales

L'idée des cartes axiales et plus généralement du courant de la *Space Syntax* repose sur le principe de conceptualisation de l'espace urbain à travers le « perçu » hérité de (LYNCH 1960). Dans cette acception, le système des espaces libres est appréhendé par l'entremise d'un piéton qui y circule. Il n'est donc plus ici question de partition en un ensemble de surfaces élémentaires, mais plutôt de portée, ligne ou axe de perception visuelle. Ce modèle axial de la ville, développé par (HILLIER et HANSON 1988), repose sur un ensemble de « lignes axiales [qui] représentent les plus longues lignes de visibilité à travers la trame urbaine » (HAMAINA 2013, p. 54). Pour PIOMBINI (2013), cette

9. « *the least set of fattest spaces that covers the system* » (HILLIER et HANSON 1988, p. 92).

10. « *A number of questions are raised by the degree of completion and rigor of the definition.* » (PEPONIS et al. 1997, p. 764), mais aussi « cette méthode ne fournit pas de solution unique, comme le montre la figure 2.4. Dans cette figure, nous cherchons à diviser un environnement en forme de T en espaces convexes. Si nous cherchons le plus petit ensemble des espaces convexes, nous obtenons la configuration à gauche. Par contre, si nous recherchons le plus grand disque maximal, nous obtenons la configuration de droite » (SARRADIN 2004, p. 48-49)

approche présente l'avantage « de questionner les relations entre conception des espaces (formes construites, objets matériels mesurés...) et expérience sensorielle des individus (perceptions, représentations, usages...) ».

Toutefois, comme le relève notamment RATTI (2004), l'approche proposée en *Space Syntax* par lignes et cartes axiales ne fait pas consensus : elle n'est pas déterministe (sélection arbitraire des plus grands axes dans certaines configurations particulières), une petite perturbation des alignements peut produire un *short-circuiting effect*, elle ne prend pas en compte la 3e dimension, une seule approche topologique des distances indépendamment de toute considération métrique est inconsistante. etc.

1.3.3 Approches orientée champ

Pour TELLER (2001), les cartes axiales comme ensemble de lignes axiales forment un « réseau, singulier certes, mais néanmoins marqué par toutes les limites de ce type de représentation ». Il leur oppose un ensemble de représentations de « l'espace ouvert comme champ d'attributs » et constate que « cette nouvelle définition de l'espace ouvert urbain appelle un renversement complet de notre cadre de réflexion : il s'agit non plus de décrire la forme d'un espace, mais bien d'analyser la distribution de l'espace induite par un ensemble de formes (les bâtiments) » (TELLER 2001, p. 183).

Cette approche « orientée champ » se décline, dans le cadre de l'analyse de la forme des espaces libres, avec plusieurs outils méthodologiques parmi lesquels nous distinguons la carte de vue du ciel et l'isovist.

Carte de vue du ciel

Comme le rappellent DUPAGNE et TELLER (1999), « la perception de l'espace dépend de la capacité que l'on a de la rendre visible dans la totalité des trois cent soixante degrés horizontaux qui circonviennent l'observateur. Ce qui ne manque pas de poser un sérieux problème de représentation puisque l'être humain lui-même est bien incapable de percevoir un espace sous un angle de plus de cent cinquante degrés horizontaux ». En s'appuyant sur la « mémoire des lieux et [la] capacité à reconstruire [...] une réalité visuelle qui s'appuie sur les multiples visions partielles », ils proposent un mécanisme de double projection.

La méthode ainsi développée procède en deux temps. La première phase consiste à projeter (projection hémisphérique) l'ensemble des points des masques bâtis environnants sur une hémisphère centrée en la position d'observation. La seconde phase vise à projeter (projection d'aplatissement) ces points opaques de l'hémisphère sur le plan horizontal d'observation.

Dans sa thèse TELLER (2001, p. 153), propose une lecture critique de différents types de projection. Il note à cette occasion, qu'une projection d'aplanissement de type isoaire permet d'extraire le facteur de vue du ciel au point d'observation. Cet indicateur – qui est utilisé dans la suite de ce manuscrit – peut-être calculé en un ensemble de points de l'espace libre de manière à produire un champ scalaire (qui à toute position associe la quantité de ciel vu qui lui correspond).

On peut enfin remarquer que plusieurs des indicateurs à suivre découlent du principe de projection hémisphérique évoqué dans cette section.

Isovist et champ d'isovist

Pour un point d'observation donné, BENEDIKT (1979) définit l'**isovist**** comme l'ensemble des points du plan horizontal du champ de vision visibles depuis le point de vue. Ce dernier est parfois aussi appelé **point de génération****. Lorsqu'aucune surface bâtie (réputée opaque) ne limite en portée ce champ de vision, il peut être utile d'imposer un **horizon artificiel**** pour le borner. L'ensemble des points ainsi produit est un polygone étoilé ou *star-shaped*. LEDUC et HARTWELL (2018) notent que cette propriété permet de simplifier l'étude de cette forme particulière à l'étude de son seul contour. À cette fin, ils proposent d'échantillonner ce contour par une abscisse angulaire de pas constant et d'analyser la fonction de distances radiales ainsi produite. Ils retrouvent ainsi certains des indicateurs proposés par BENEDIKT (1979) telle la variance ou le coefficient d'aplanissement des rayons.

Pour caractériser le champ de vision plus systématiquement sur un terrain d'étude donné, (BENEDIKT 1979) propose d'analyser le **champ d'isovist****. Comme le relèvent LEDUC et WOLOSZYN (2015), « il s'agit d'une extrapolation de la notion mathématique de champ de vecteurs qui, à tout point de l'espace euclidien, associe un vecteur. Si l'isovist décrit l'espace environnant un point donné, le champ d'isovists associe, à tout point du territoire d'étude, un isovist. Le champ d'isovists permet donc d'accéder à la propriété de description de l'espace enveloppant en tout point d'intérêt ».

Dans le cadre de notre travail de thèse, nous « détournons » l'outil méthodologique isovist conçu initialement pour l'analyse des visibilitées ou l'étude de la « forme urbaine comme forme du paysage urbain » (LÉVY 2005), afin de qualifier l'espace ouvert environnant. Nous le « déplaçons » ainsi très clairement dans le registre de la « forme urbaine comme forme bioclimatique » pour reprendre les termes de (LÉVY 2005).

1.4 Synthèse

Plusieurs écoles d'analyse de la forme urbaine existent, mais celle que nous avons choisie vise à la décrire comme un couplage d'un système du bâti en relation à un système des espaces libres. Dans cette approche à caractère « physiologique », nous avons plus précisément souhaité analyser le vide urbain par une approche orientée champ avec des grandeurs physiques et outils méthodologiques dérivés des isovist et carte de vue du ciel.

Dans une telle approche, l'espace qui environne chaque position est renseigné à un niveau d'échelle très local. Il est alors possible de comparer cette observation faite localement avec des informations plus globales, ou plus simplement de la comparer en relation à son voisinage local pour en déduire des évolutions à un niveau d'échelle très fin.

Parce que nous traitons du vent en ville, de son écoulement, de ses turbulences, etc. cet aspect dynamique propre à l'approche analytique que nous avons retenue nous semble essentiel.

Chapitre 2

État de l'art : caractérisation de dynamiques en ville

2.1 Temps court, temps long

Diverses études existent qui visent à modéliser la qualité de l'air en ville, le déplacement des pollens, l'écoulement du vent, les mobilités mécanisées comme les mobilités du piéton, etc. Dans ces divers cas, il s'agit de caractériser des dynamiques spatiales, c'est-à-dire de caractériser le mouvement d'un mobile (entité qui se déplace) dans un référentiel conjointement spatial et temporel. Il s'agit ici de dynamiques *dans* la ville, généralement associées à une échelle de temps de courte durée.

Au cours du temps, la ville s'étale, se densifie ou se dé-densifie, se reconstruit, etc. Les formes du système de ses espaces libres et celles de son système bâti évoluent. MONFRONT et TAVEAU (2014) évoquent ainsi des « dynamiques sur le rapport du plein et du vide ». Il s'agit ici de dynamiques *de* la ville, généralement associées à une échelle de temps de longue durée.

Pour MONFRONT et TAVEAU (2014), dans une « ré-articulation des pleins et des vides », il faut distinguer le « contenant » qu'ils rapportent à une « échelle spatiale », du « contenu (activité humaine) », qu'ils rapportent à une « échelle de temps ». Les évolutions structurelles ont une incidence sur les dynamiques fonctionnelles. Ainsi, des modifications *de* la ville (dynamique du plein et du vide sur le temps long) sont susceptibles d'influer sur les circulations *dans* la ville (dynamique sur le temps court). A titre d'exemple, la modification du plan de Paris, par le Baron Haussmann au XIXe siècle (temps long), a réorganisé les flux de circulation de la capitale (temps court).

2.2 Perspective de mouvement

SARRADIN (2004, p. 35) se réfère à la perspective de mouvement de Gibson, comme moyen visuel mis en oeuvre inconsciemment pour identifier la forme. Il écrit ainsi que « notre vision peut être qualifiée de dynamique [...] nous parcourons les rues et récoltons des séries d'images de différents espaces urbains. Ces images sont liées entre elles par les points du parcours que nous avons suivis. De ces séries, nous retenons non seulement des formes, des couleurs, des textures des espaces traversés, mais aussi les effets, les changements, les variations dus à notre propre mouvement ». Il évoque à ce propos le concept de *serial vision* proposé par G. CULLEN. Il en conclut enfin que « les variations induites par notre mouvement dans notre monde visuel ne doivent pas être ignorées dans l'analyse des espaces ouverts urbains » ce qui justifie qu'il propose, dans le cadre de sa recherche doctorale, une nouvelle méthode d'analyse des espaces ouverts urbains basée sur une caractérisation dynamique..

Si nous reprenons à notre compte cette approche de description de la forme du vide par l'analyse d'un ensemble de séquences visuelles, nous pouvons imaginer développer une caractérisation dynamique de cette même forme par analyse séquentielle des données d'environnement restituées le long d'un « parcours » ou linéaire urbain.

Dans ce même registre et comme le remarquent EWING et al. (2006), un ensemble croissant de travaux de recherche se préoccupe de mettre en évidence le lien entre la forme de l'environnement construit et la marchabilité par le biais des *perceptual qualities*. La cinquantaine d'*Urban Design Qualities* qu'ils recensent dans leur état de l'art est le résultat d'une démarche qui vise à objectiver la perception de la forme et rendre le concept opérant¹.

2.3 Squelette et analyse du *streetscape*

Repartant des *Urban Design Qualities* identifiées par EWING et al. (2006) et des travaux afférents, HARVEY et al. (2015) remarquent que ces qualités sont fortement influencées par les proportions du gabarit du tronçon de rue ambiant. Pour faciliter cette estimation de gabarit, ils introduisent la notion de squelette².

1. *The protocols for measuring urban design qualities can be used by lay observers without any training in urban design. The resulting measures could be useful to urban designers interested in pursuing a more quantitative approach to their profession* (EWING et al. 2006, p. 236)

2. *These qualities are heavily affected by skeletal proportions, which Ewing and his colleagues survey indirectly based on the length of sight lines and sky visibility* (HARVEY

Pour (SARRADIN 2004), le **squelette**** est défini par comme « un ensemble continu de courbes obtenues par amincissement progressif de la forme [génératrice ou forme d'origine] autour de ses principales saillances ». Il résulte d'un processus appelé squelettisation qui « permet d'obtenir une représentation parlante, compacte, filiforme de la silhouette d'un objet et centrée dans celle-ci » (LEBORGNE 2018, p. 37). Elle ajoute (*ibid.*, p. 67) que ce squelette « représente une quantité d'informations plus restreinte que celle de la forme d'origine tout en conservant son apparence globale. En d'autres termes, il s'agit d'une compression [qui conserve] les propriétés topologiques de la forme initiale ainsi que ses propriétés géométriques (ramifications, parties allongées par exemple) ».

Munis du concept de squelette, HARVEY et al. (2015) définissent sept indicateurs morphologiques qui sont : la largeur de rue, la longueur du tronçon, le maximum des hauteurs moyennes pour chaque côté du tronçon, le ratio d'aspect moyen, une mesure de la continuité du front bâti, le nombre de bâtiments de part et d'autre du tronçon, une mesure de couverture végétale. Ces indicateurs embarquent clairement, en plus des notions de « proportion du squelette », des informations de gabarit sur la section ou coupe transversale du tronçon de rue.

On remarquera que (SARRADIN 2004) et (HARVEY et al. 2015) utilisent le même concept de squelette en l'appliquant à des entités et des points de vue très différents. Alors que le premier se préoccupe de la squelettisation de la carte du ciel dans une perspective verticale ascendante (zénithale), les seconds cherchent à simplifier le paysage de la rue dans une perspective tangentielle (frontale). Par ailleurs, l'atomicité respective de ces deux travaux est très différente. Alors que (SARRADIN 2004) analyse la carte de vue du ciel en un ensemble - séquentiel - de positions, (HARVEY et al. 2015) analyse le *streetscape* à l'échelle insécable du tronçon de rue.

2.4 Synthèse

Dans ce chapitre nous avons distingué les notions de perspective de mouvement et d'analyse de séquences visuelles. Une telle séquence correspond à un « enchaînement [...] de plans différents avec des ruptures assez fortes sur de courtes distances » (SARRADIN 2004, p. 44). Il semble qu'il pourrait être intéressant de les étudier dans une approche différentielle. Ainsi, rapporter la mesure de la déformation de l'espace ouvert dans chaque plan à la distance entre deux plans consécutifs permettrait de mesurer la rapidité de l'évolution de cette déformation. Un tel ratio pourrait, à titre d'exemple, permettre de

et al. 2015, p. 20).

rendre compte d'une dynamique de fermeture (resp. d'ouverture) de la forme de l'environnement construit au cours du déplacement d'un observateur en ville. Dans le chapitre 3 nous introduisons la notion de « capteur virtuel » pour synthétiser le rapport plein-vide en chacun des plans séquences.

Chapitre 3

Méthodologie : simplifier l'espace, capter l'espace, mesurer l'espace

Ce chapitre est dédié à la mesure de la forme urbaine. Cette mesure est ici fortement conditionnée par la finalité de notre travail doctoral qui vise à qualifier le vent à hauteur du piéton à partir des seuls paramètres de forme, c'est-à-dire par la capacité du vide urbain à s'opposer ou non à l'écoulement du vent. Dans cette perspective, les indicateurs de formes que nous proposons ont pour but de mesurer la présence ou non d'obstacles, la distance aux obstacles, la porosité, la rugosité... de la trame urbaine.

Pour mesurer la forme de l'espace urbain, et en particulier du vide urbain lieu de l'écoulement du vent, il est nécessaire de commencer par le contourer. Le vide urbain est un volume délimité par une surface urbaine constituée du sol urbain et des façades de l'enveloppe extérieure des bâtiments. On peut le circonscrire en complétant cette surface de frontières latérales et supérieures définies arbitrairement. C'est notamment ce qui est fait en simulation numérique aéraulique en définissant la veine d'un tunnel.

La méthode que nous présentons dans la suite de ce chapitre se déroule en trois temps. Nous commençons par simplifier l'espace d'étude pour le modéliser et introduisons à cette occasion la notion de squelette, puis nous définissons l'outil conceptuel de capteur virtuel avant de lister un ensemble de mesures morphologiques susceptibles d'informer ce squelette.

3.1 Simplifier l'espace

3.1.1 Réduction dimensionnelle : de la ville en volume à la ville *flatland*

Le modèle de ville que nous utilisons est constitué d'une collection de prismes droits, en l'occurrence de bâtiments aux toits terrasses sur sol plat. Ce modèle de ville est intrinsèquement 2,5D. Pour en simplifier l'analyse, nous procédons à une première réduction dimensionnelle visant à ne considérer que les empreintes au sol de chacun des bâtiments et à associer à chacune d'entre elles, un attribut de hauteur (hauteur à la gouttière). Nous procédons ainsi à une réduction dimensionnelle d'une entité 3D (la ville en volume) à une entité 2D (la ville *flatland* ou ville en plan telle que vue du ciel).

3.1.2 Des empreintes de bâtiments au vide urbain

Le modèle de ville issu de la première réduction dimensionnelle est un modèle plan, collection d'empreintes au sol de bâtiments. Cette collection de bâtiments est issue de la BD TOPO® récupérée via le site professionnel de l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière, <http://professionnels.ign.fr/>). Comme nous étudions la circulation du vent dans les espaces qui s'intercalent entre les bâtiments (espaces qualifiés d'interstitiels), nous considérons le complémentaire de cette collection d'empreintes au sol de bâtiments dans une boîte englobante rectangulaire qui correspond aux limites de notre zone d'étude. Cet espace « complémentaire », collection de polygones multiplement troués, correspond à ce que nous avons appelé vide urbain.

3.1.3 Réduction dimensionnelle : extraction du squelette de la forme en plan du vide urbain

Le vide urbain est une forme du plan potentiellement complexe. Pour en simplifier l'analyse, nous proposons de la simplifier d'abord et de la « squelettiser » ensuite. Le processus de simplification consiste en une suppression des cours intérieures et un lissage des divers fronts bâtis à l'aide de la fonction `qgis:simplifygeometries`. Le procédé de squelettisation, qui exploite la fonction `qgis:voronoi` et supprime toutes les arêtes qui intersectent la couche bâtie, permet de schématiser ce vide simplifié sous forme d'un graphe non orienté et possiblement non connexe. C'est-à-dire comme un ensemble de lignes médianes potentiellement connectées par les extrémités de leurs tronçons. Nous procédons ainsi à une réduction dimensionnelle d'une

entité 2D (la partie de vide urbain de la ville *flatland*) à une entité 1D (le squelette du vide urbain).

3.1.4 Réduction dimensionnelle : du squelette au réseau de points

La double réduction dimensionnelle (3D/2D et 2D/1D) évoquée dans les sections qui précèdent permet de simplifier l'objet d'étude en un graphe de lignes médianes. Ce graphe peut encore être simplifié en une collection d'objets ponctuels (entités spatiales de dimension 0D). En effet, comme le squelette urbain est une forme 1D, nous pouvons l'échantillonner par abscisse curviligne¹ et aboutir à un ensemble de points du squelette. Ces points gardent la particularité d'être équidistants aux façades des bâtiments les plus proches. Ils serviront aussi de support d'information morphologique urbaine, c'est pourquoi nous les appellerons par la suite « capteurs » comme nous l'expliquons dans la prochaine section.

3.2 Capter l'espace

L'ensemble des points issus de la triple réduction dimensionnelle décrite précédemment forme un réseau de capteurs. Chacun d'entre eux représente une partie de l'espace environnant (les capteurs situés au bord de la zone d'intérêt récupèrent les empreintes de bâtiments complémentaires directement dans la BD TOPO(®), à plus grande échelle).

3.2.1 Captation ponctuelle

Nous appelons **capteur virtuel**** tout point issu de l'échantillonnage ponctuel du squelette du vide urbain évoqué dans la section précédente. Ces points, entités géométriques immergées dans l'espace urbain, servent à décrire l'espace environnant. Cette description prend la forme d'**attributs**** tels que, par exemple, la mesure de l'ouverture du ciel, la hauteur moyenne de rugosité, etc. C'est par référence à la notion de capteur (physique), comme instrument de mesure de certaines grandeurs telles que la température, la vitesse du vent, l'humidité, etc. que nous avons décidé d'appeler ces points capteurs virtuels.

Nous appelons **zone d'influence**** ou **zone source**** d'un capteur virtuel, l'espace urbain qui l'environne et conditionne son calcul. La portée de cette zone est fonction du phénomène étudié. Elle varie, par exemple, selon

1. Nous ferons le choix arbitraire d'une abscisse curviligne constante pour des raisons de simplicité de mise en œuvre.

que nous nous préoccupons de modéliser des échanges radiatifs, d'évaluer un potentiel de ventilation naturel, un ressenti de densité, etc.

3.2.2 Délimitations des zones sources pour les capteurs du squelette pour nos applications

Nous appelons **plus grande boule inscrite****, la sphère centrée au capteur (aussi appelé **point de génération****) qui s'intercale entre les bâtiments de l'environnement immédiat et qui est tangente aux plus proches façades qui composent le « déroulé de façades » vues depuis le point de génération. Lorsque le capteur est situé sur la ligne médiane d'une rue canyon, le rayon de la plus grande boule inscrite est égal à la moitié de la largeur de la rue. Cette plus grande boule inscrite est un sous-ensemble connexe du vide urbain qui, à ce titre, exclut tout bâtiment.

L'**isovist****, notion définie dans (DAVIS et BENEDIKT 1979), est un sous-ensemble connexe du vide urbain composé de l'ensemble des points de l'espace « visibles »² depuis le capteur. Pour limiter la portée du regard et borner cet ensemble de points, l'usage veut que l'on impose un **horizon artificiel****. Dans le cas particulier où le modèle urbain est *flatland* (ville en plan telle que vue du ciel) et où les empreintes de bâtiments sont polygonales, l'isovist est un polygone étoilé ou *star-shaped*.

Nous appelons **buffer circulaire**** une portion cylindrique d'espace urbain centrée sur le capteur et d'un rayon arbitrairement fixé (à déterminer selon le type d'application retenue). Contrairement à la plus grande boule inscrite ou à l'isovist, cette portion d'espace est susceptible d'embarquer des bâtiments ou fragments de bâtiments.

Dans ce *buffer*, nous délimitons deux zones : le **premier plan**** est l'espace ouvert qui s'intercale entre le premier front bâti et le point central de génération ; l'**arrière-plan**** est l'espace complémentaire au premier plan dans le *buffer* circulaire. La plus grande boule inscrite et l'isovist relèvent exclusivement de la notion de premier plan contrairement au *buffer* circulaire.

3.2.3 Directivité

Un phénomène est qualifié de **panoptique**** lorsqu'il est omnidirectionnel ou identiquement distribué dans toutes les directions de l'espace (cf. la notion d'isotropie). Par extension, nous introduisons la notion d'**indicateur**

2. Soient A et B deux points du vide urbain. Si B est visible depuis A, alors le segment de droite [AB] est contenu dans le vide urbain (autrement dit, il n'existe aucune surface de bâtiment qui s'intercale entre A et B).

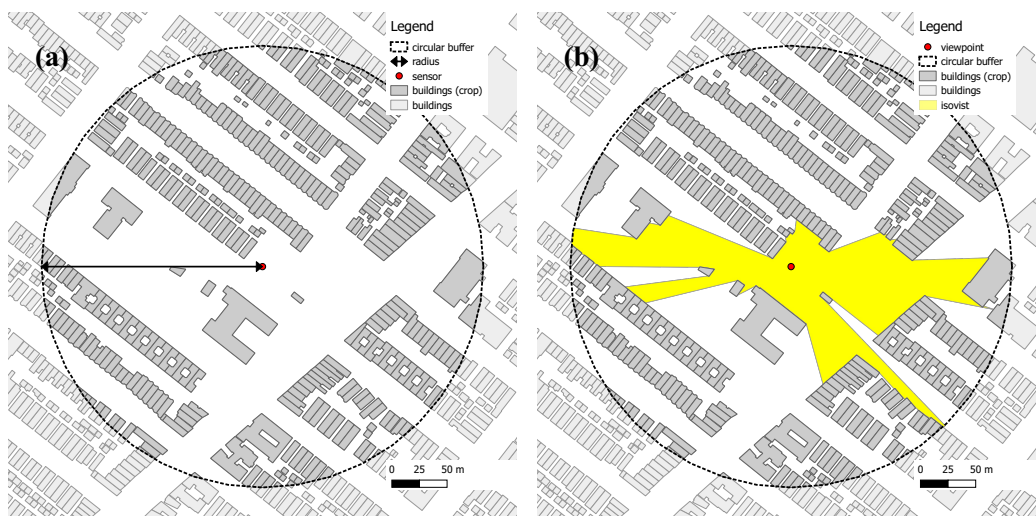


FIGURE 3.1 – Deux méthodes de délimitation des zones sources : (a) par *buffer* circulaire, (b) par isovist. Images extraites de (RODLER et LEDUC 2019).

panoptique** comme étant un indicateur dont le calcul repose sur les propriétés de l'espace environnant dans toutes ses directions. Dans le cadre de notre thèse, cette notion s'oppose à celle de directionnalité ou orientation.

Nous appelons **direction principale**** une orientation donnée comme, par exemple, la direction dominante du vent ou la direction de l'axe principal d'une rue canyon.

Un **indicateur directionnel**** est un indicateur qui traduit l'orientation ou directionnalité d'un phénomène ou d'un lieu lorsque celui-ci est soumis à une direction dominante ou en référence à une direction imposée arbitrairement. Le calcul des indicateurs directionnels de la section qui suit procède souvent par troncature de l'indicateur panoptique correspondant selon un secteur angulaire symétriquement disposé de part et d'autre de la direction principale.

Lorsque l'indicateur ne relève ni d'une direction principale ni de l'ensemble des directions du plan (caractère panoptique), on parle d'un **indicateur a-directionnel****.

3.3 Mesurer l'espace (41 indicateurs)

Pour mesurer l'espace, nous utilisons des indicateurs morphologiques, c'est-à-dire des mesures de la configuration spatiale des lieux au point d'étude. Chacune de ces mesures est effectuée en tout point - ou capteur - issu de

l'échantillonnage du squelette. C'est en ce même point que cette mesure est ensuite stockée sous forme d'attribut.

Pour présenter ces indicateurs, nous avons retenu deux critères. Le premier caractérise le caractère statique ou dynamique de l'indicateur. Le second caractérise son caractère panoptique, directionnel voire a-directionnel. Selon ces critères, un indicateur peut ainsi être :

- **statique**** si nous le mesurons de manière isolée (il ne dépend alors que du seul point du squelette en lequel il est calculé) ou **dynamique**** si nous le mesurons à partir d'un ou plusieurs capteurs voisins (on parle alors, dans ce second cas, d'une approche **différentielle****);
- a-directionnel, directionnel ou panoptique, conformément aux définitions que nous avons déjà posées.

Le tableau 3.1 présente de manière synthétique l'ensemble des indicateurs morphologiques qui sont développés dans la suite de ce chapitre.

	Indicateur	A-directionnel	Pan-optique	Directionnel		
				bwd	fwd	*wd
Statiques (9 + 3 × 8 = 33)	r					
	bsf					
	hre					
	parea					
	pperim					
	pminraylen					
	[p]avgraylen					
	pmaxraylen					
	[p]hmean					
	[p]hw					
	[p]svf					
	bissp					
	Dynamiques (8)	\bar{r}				
σ_r						
Skew(r)						
Kurt(r)						
r'						
$\overline{r'}$						
$\sigma_{r'}$						
r''						

TABLE 3.1 – Présentation synthétique des 41 indicateurs.

3.3.1 Compléments relatifs à la mise en oeuvre technique

Les choix techniques que nous présentons dans cette section ont des implications non seulement en termes de temps de calcul, mais aussi en termes de résolution spatiale de l'analyse que nous conduisons.

Échantillonnage par abscisse curviligne

Comme nous l'avons déjà écrit, le squelette urbain est une forme 1D qui peut-être échantillonnée par abscisse curviligne pour réduire l'étude de l'espace ouvert à celle d'un ensemble de points que nous appelons capteurs. Concernant le placement de ces capteurs, comme (RODLER et LEDUC 2019), nous avons fait le choix arbitraire d'un échantillonnage par abscisse curviligne constante (une variante qui s'adapterait à la complexité du tissu est naturellement envisageable³). Les capteurs sont, en fonction du pas d'échantillonnage, rapprochés (maillage fin) ou distants (maillage plus grossier). La description de l'espace qui en découle est alors plus ou moins continue ou discontinue. Comme l'utilisation d'un maillage fin augmente le nombre et le temps de calcul pour chacun des indicateurs, il y a un équilibre à trouver entre précision attendue et temps de calcul admissible.

Lancer de rayons

Le lancer de rayons est une technique mise en oeuvre notamment pour le rendu en synthèse d'image. Nous la reprenons et l'adaptions au contexte du système d'information géographique QGIS que nous avons choisi. Cette technique, mise en oeuvre dans (RODLER et LEDUC 2019), consiste à lancer un rayon depuis le point de génération (le capteur) dans toutes les directions du plan horizontal en adoptant un échantillonnage par abscisse angulaire constante⁴ de valeur d'angle $\frac{2\pi}{nRays}$ où $nRays$ désigne le nombre de rayons. Pour une direction donnée, le rayon qui lui correspond croise un ensemble de bâtiments et produit une collection de triplets. Ces triplets sont constitués des coordonnées du point d'impact (le point d'intersection Q_i), de la distance w_i au capteur P et de la hauteur h_i du bâtiment impacté. Dans la suite du manuscrit nous adoptons la convention d'écriture suivante pour

3. Nous justifions notre choix d'un échantillonnage par abscisse curviligne constante par des raisons de temps de mise en oeuvre incompatible avec la durée de cette thèse.

4. Comme dans le cas de l'abscisse curviligne, nous justifions ce choix arbitraire d'un échantillonnage par abscisse angulaire constante par des raisons de temps de mise en oeuvre incompatible avec la durée de cette thèse.

cette collection de triplets :

$$\langle Q_i, w_i, h_i \rangle_{i \in \{1, \dots, nRays\}} \quad (3.1)$$

Il est important de noter ici que cette collection de triplets de l'équation 3.1 est une représentation (échantillonnée par abscisse angulaire de pas constant) de l'isovist généré au capteur P .

Selon l'indicateur à calculer, nous choisissons soit le triplet qui minimise la distance au capteur P (dans ce cas, seul le premier point d'impact du rayon est significatif), soit le triplet qui maximise le ratio égal à la hauteur du bâtiment impacté divisée par la distance au capteur (dans ce cas - et dans une interprétation 3D du lancer de rayons - c'est le bâtiment qui « bouche l'horizon » qui importe, celui-ci peut-être éventuellement placé à l'arrière-plan).

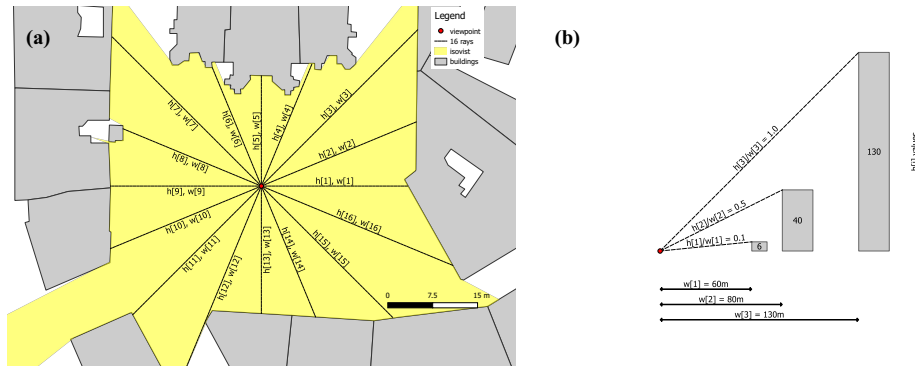


FIGURE 3.2 – Deux adaptations de la méthode dite de lancer de rayons : (a) seul le premier point d'impact est significatif, (b) c'est le bâtiment qui « bouche l'horizon » qui importe, celui-ci peut-être éventuellement placé à l'arrière-plan. Images extraites de (RODLER et LEDUC 2019).

Détermination de la zone source

Pour les indicateurs calculés sur des zones source de type *Buffer* ou isovist, la portée (aussi appelée **horizon artificiel****) est un paramètre d'entrée. Cette portée est fixée en fonction du phénomène représenté et de l'hétérogénéité que l'on veut embarquer (ou pas) dans le *Buffer* ou l'isovist. Ce choix est souvent arbitraire et conséquemment problématique.

Quelle que soit l'étendue de la zone source de l'indicateur ou sa géométrie dans le plan horizontal, le calcul d'un indicateur directionnel est généralement dérivé de celui de l'indicateur panoptique qui lui correspond. Ce calcul est précédé d'une restriction de la zone source panoptique à un secteur angulaire dont l'ouverture et la direction principale sont préalablement arrêtés.

3.3.2 Indicateurs statiques

Indicateurs statiques a-directionnels

Ces indicateurs sont les plus simples. Ils ne sont ni panoptiques ni ne relèvent d'une direction principale de vent. Nous présentons ici les deux indicateurs de cette catégorie que nous avons utilisés dans le cadre de nos travaux.

Étant donné le formalisme introduit dans l'équation 3.1, nous appelons **rayon de la plus grande boule inscrite** (\mathbf{r})** associé au capteur P , la plus petite des valeurs w_i :

$$r = \min \{w_i | i \in \{1, \dots, \text{nRays}\}\} \quad (3.2)$$

Pour rappel, le squelette tel que nous l'avons défini est construit à partir des axes médians du vide urbain. Ainsi, en chaque point ou capteur du squelette, la plus grande boule inscrite correspondante, touche nécessairement les limites du vide urbain (en l'occurrence les façades des bâtiments voisins) en au moins deux points. Si le capteur étudié est situé dans une rue canyon, le rayon de la plus grande boule inscrite représente alors la moitié de la largeur de la rue.

En reprenant le formalisme des équations 3.1 et 3.2, nous définissons le **ratio d'aspect d'une rue canyon** (\mathbf{hw})** comme suit :

$$\mathbf{hw} = \frac{h_j + h_k}{4 \times r} \quad (3.3)$$

où, r désigne le rayon de la plus grande boule inscrite :

$$j = \min \{i | w_i = r, i \in \{1, \dots, \text{nRays}\}\} \quad (3.4)$$

et :

$$k = \left(j + \left\lceil \frac{\text{nRays}}{2} \right\rceil \right) \% \text{nRays} \quad (3.5)$$

Dans cette dernière équation, les crochets ($\lceil \]$) correspondent à la valeur entière du quotient et le symbole pourcentage ($\%$) correspond au reste dans la division euclidienne de l'opérande de gauche par l'opérande de droite.

Cette implémentation du ratio ou **rapport d'aspect d'une rue canyon** (\mathbf{hw})** est une adaptation de l'indicateur défini par OKE (1988). Comme le rappellent (RODLER et LEDUC 2019), dans le modèle de ville simplifié développé par OKE (1988), le canyon de rue est l'unité géométrique de base qui permet, par simple répétition, de modéliser le fragment urbain étudié. Si nous faisons l'hypothèse (forte) que les bâtiments flanquant cette rue sont

d'une longueur infinie, alors ce modèle peut être simplifié par une section bi-dimensionnelle. Cette configuration très simplifiée permet d'introduire h/w le rapport d'aspect, comme rapport de la hauteur moyenne des parois du canyon (h) à la largeur du canyon de rue (w). OKE (1988) met en oeuvre cet indicateur pour traiter des enjeux micro-climatiques. Il établit ainsi des corrélations entre la variation du ratio d'aspect et le régime d'écoulement aérodynamique. La protection solaire de la rue ou son ouverture aux échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde sont également souvent exprimées relativement à ce ratio.

Dans ces études, les rues sont considérées comme de type « canyon » symétrique, c'est-à-dire, bordées de part et d'autre, de bâtiments parallèles et de même hauteur. Dans le cas de rues bordées de bâtiments de hauteurs différentes, (OKE 2006) définit le **rapport d'aspect moyen**** comme la hauteur moyenne des principaux éléments de rugosité (bâtiments, arbres) divisée par leur espacement moyen. Notre propre implémentation dérive plus précisément de cet indicateur.

Indicateurs statiques panoptiques

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons identifié et mis en oeuvre quatre indicateurs relevant de cette catégorie. Les trois premiers ont une zone source de type *buffer* circulaire, c'est-à-dire que leur calcul est conditionné par la présence d'obstacles (i.e. de bâtiments) dans une aire géographique correspondant à un disque centré en l'indicateur. Le quatrième a une zone source plus limitée qui est fonction du seul isovist généré à partir de la position du capteur. Pour rappel, ces indicateurs sont tous qualifiés de panoptiques car ils ne privilégient aucune direction principale.

Nous appelons **ratio de surface bâtie (bsf)**** ou **Building surface fraction**** une adaptation du coefficient d'emprise au sol (CES) issu de l'urbanisme qui vise à qualifier l'occupation du sol et plus précisément à mesurer la densité de surface bâtie d'une parcelle. Si R désigne le rayon du *buffer* circulaire correspondant à la zone source de référence, et si $(A_i)_{i \in \{1, \dots, n\}}$ désignent les mesures d'aire respectives de chacune des portions d'empreintes de bâtiment incluses dans ce *buffer*, alors cet indicateur a pour valeur :

$$\text{bsf} = \frac{\sum_{i \in \{1, \dots, n\}} A_i}{\pi R^2} \quad (3.6)$$

Cet indicateur a notamment été utilisé dans (STEWART et OKE 2012; ROLLER et LEDUC 2019).

Dans une analogie mécanique et pour caractériser l'« état de surface » du fragment urbain étudié, on introduit la **Hauteur moyenne de rugosité**

(hre)** du profil urbain étudié ou **Height of roughness elements****. En reprenant le formalisme introduit précédemment, si R désigne le rayon du *buffer* circulaire correspondant à la zone source de référence, et si $(A_i)_{i \in \{1, \dots, n\}}$ et $(h_i)_{i \in \{1, \dots, n\}}$ désignent respectivement les mesures d'aire et de hauteur de chacune des portions de bâtiments incluses dans ce *buffer*, alors cet indicateur a pour valeur :

$$\text{hre} = \frac{\sum_{i \in \{1, \dots, n\}} A_i \times h_i}{\pi R^2} \quad (3.7)$$

Cette mesure de l'état de surface du fragment urbain étudié est une manière de caractériser son « grain », ou densité d'aspérités susceptibles d'entraver l'écoulement du vent urbain. Comme le précédent, cet indicateur a notamment été utilisé dans (STEWART et OKE 2012 ; RODLER et LEDUC 2019).

Le **Facteur de vue du ciel (svf)**** ou **Sky view factor**** est un indicateur de la quantité de ciel visible depuis une position donnée (en l'occurrence, ici, depuis la position de chacun des capteurs étudiés). Comme nous l'écrivons dans (BELGACEM, LEDUC et MUSY 2018), « le SVF correspond au pourcentage de ciel vu (c'est-à-dire à la portion de ciel qui est visible à partir du point de vue, au sens où il n'est pas obstrué par un masque bâti environnant [...]). Il est étroitement lié à la largeur de l'espace ouvert et aux hauteurs et largeurs des diverses obstructions [...]. Dans notre étude de cas, l'obstruction se limite aux seuls bâtiments et n'intègre par exemple ni la végétation ni le mobilier urbain. »

Cet indicateur a été multiplement utilisé au cours des quatre dernières décennies et, comme le relèvent (RODLER et LEDUC 2019), avec diverses méthodes de calcul. On recense ainsi des méthodes de calcul basées sur l'analyse de photographies à lentille de type *fish-eye* (STEYN 1980), sur des lois empiriques établies à partir de modèles de rue simplifiés (JOHNSON et WATSON 1984), sur des mécanismes de double projection et des cartes de vue du ciel (TELLER et AZAR 2001), sur des approches vectorielles numériques implémentées dans le contexte de SIG 3D (SOUZA, RODRIGUES et MENDES 2003) ou des approches à base *raster* (GÁL, LINDBERG et UNGER 2009).

L'implémentation que nous avons retenue est décrite dans (RODLER et LEDUC 2019). Elle est dérivée de (BERNARD et al. 2018) et s'écrit comme suit en reprenant le formalisme de l'équation 3.1 :

$$\text{svf} = 1 - \frac{1}{\text{nRays}} \sum_{i=1}^{\text{nRays}} \sin \left(\arctan \left(\frac{h_i}{w_i} \right) \right) \quad (3.8)$$

Le ratio ou rapport d'aspect est - nous l'avons écrit précédemment - une notion issue de (OKE 1988 ; OKE 2006) pour décrire le rapport de forme d'une configuration urbaine spécifique de type rue canyon. Comme les fragments

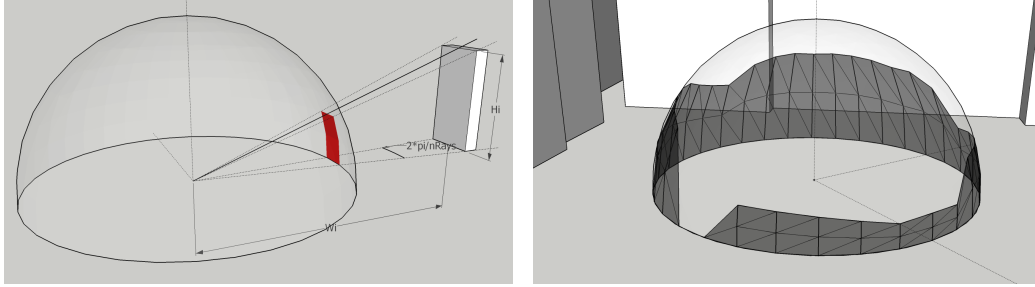


FIGURE 3.3 – (a) L’angle solide du masque bâti de hauteur h_i , placé à une distance w_i du capteur, et d’écart angulaire égal à $\frac{2\pi}{nRays}$ dans le plan horizontal d’observation, est égal à $\frac{2\pi}{nRays} \sin \left(\arctan \left(\frac{h_i}{w_i} \right) \right)$, (b) dans une modélisation hémisphérique du ciel, le SVF est le rapport entre l’aire d’hémisphère vu depuis le capteur et celle de l’hémisphère correspondant complet. Images extraites de (RODLER et LEDUC 2019).

urbains que nous étudions sont issus de cas réels et de ce fait plus complexes, nous avons souhaité étendre cette notion à des fragments urbains plus ouverts tels que des places par exemple. Pour ce faire et comme proposé par (RODLER et LEDUC 2019), nous définissons le **ratio d’aspect d’une place ou d’un espace ouvert (hw)****, à l’aide du formalisme introduit dans l’équation 3.1, comme étant égal à :

$$hw = \frac{\frac{1}{nRays} \sum_{i=1}^{nRays} h_i}{\frac{1}{nRays} \sum_{i=1}^{nRays} 2 \times w_i} = \frac{\bar{h}}{2 \times \bar{w}} \quad (3.9)$$

Ce ratio d’aspect panoptique est une généralisation du ratio d’aspect (moyen) d’une rue canyon.

Indicateurs statiques directionnels

Contrairement aux indicateurs a-directionnels et aux indicateurs panoptiques que nous avons déjà présentés et comme nous l’avons écrit plus tôt, les indicateurs directionnels traduisent l’orientation ou la directionnalité d’un phénomène ou d’un lieu et, à ce titre, dépendent d’une direction principale. Il est ainsi classique de calculer la densité frontale de façades qui s’opposent à l’écoulement du vent en ville pour une direction de vent donnée. Pour leur calcul, il importe de tronquer l’indicateur panoptique correspondant selon un secteur angulaire symétriquement disposé de part et d’autre de la direction principale. Commençons par définir quelques notions.

Nous appelons **isovist partiel au vent**** la portion d'isovist placée en amont du capteur (point de génération de l'isovist) dans la direction du vent. Cette portion d'isovist reçoit le vent avant le capteur, Fig. 3.4. Nous appelons **isovist partiel sous le vent**** la portion d'isovist placée en aval du capteur dans la direction du vent. Cette portion d'isovist reçoit le vent après le capteur.

Les huit premiers indicateurs statiques directionnels qui suivent se déclinent de trois manières différentes. On peut les calculer « au vent » (auquel cas on accole le suffixe « bwd » à leur identifiant), « sous le vent » (auquel cas on accole le suffixe « fwd » à leur identifiant), voire simultanément au vent et sous le vent (auquel cas on accole le suffixe « *wd » à leur identifiant).

Notre premier indicateur statique directionnel est la **Surface de l'isovist partiel (parea)****. Cette surface peut-être calculée au vent (parea_bwd), sous le vent (parea_fwd) ou simultanément au et sous le vent (parea_*wd). Elle est fonction de l'ouverture d'angle, de la distance à l'horizon artificiel ou portée des rayons, de la direction principale imposée et des diverses empreintes de bâtiments environnants le point de génération susceptibles de borner l'isovist. Comme son nom l'indique cet indicateur correspond à la valeur d'aire de la surface couverte par la portion d'isovist représentée dans la Fig. 3.4. Sa zone d'influence est de type isovist.

Comme parea, l'indicateur **Périmètre de l'isovist partiel (pperim)**** se décline au vent (pperim_bwd), sous le vent (pperim_fwd) ou simultanément au et sous le vent (pperim_*wd). Il correspond à la mesure du périmètre de l'isovist partiel tel que représenté dans la Fig. 3.4. Sa zone d'influence est de type isovist.

Les indicateurs qui suivent reposent sur l'adaptation du mécanisme de lancer de rayons que nous avons présenté dans la section 3.3.1. Si, comme nous l'avons déjà écrit, la collection de triplets de l'équation 3.1 est une représentation (échantillonnée par abscisse angulaire de pas constant) de l'isovist généré au capteur P , alors il est possible d'identifier $\mathbb{I} \subset \{1, \dots, nRays\}$ (resp. \mathbb{J} , ou \mathbb{K}) pour lequel la collection de triplets : $\langle Q_i, w_i, h_i \rangle_{i \in \mathbb{I}}$ est une représentation de l'isovist partiel au vent (resp. sous le vent, ou simultanément au et sous le vent).

Il existe trois déclinaisons orientées de l'indicateur **Plus petite longueur de rayons (pminraylen)**** qui renvoient toutes, comme le nom l'indique, à la mesure de la longueur du plus petit des rayons de l'échantillonnage par abscisse angulaire de l'isovist partiel correspondant (au vent, sous le vent ou simultanément au et sous le vent). De la même manière, il existe trois déclinaisons orientées de l'indicateur **Longueur de rayons moyenne (pavgraylen)**** de l'isovist partiel correspondant et trois déclinaisons orientées de l'indicateur **Plus grande longueur de rayons (pmaxraylen)****.

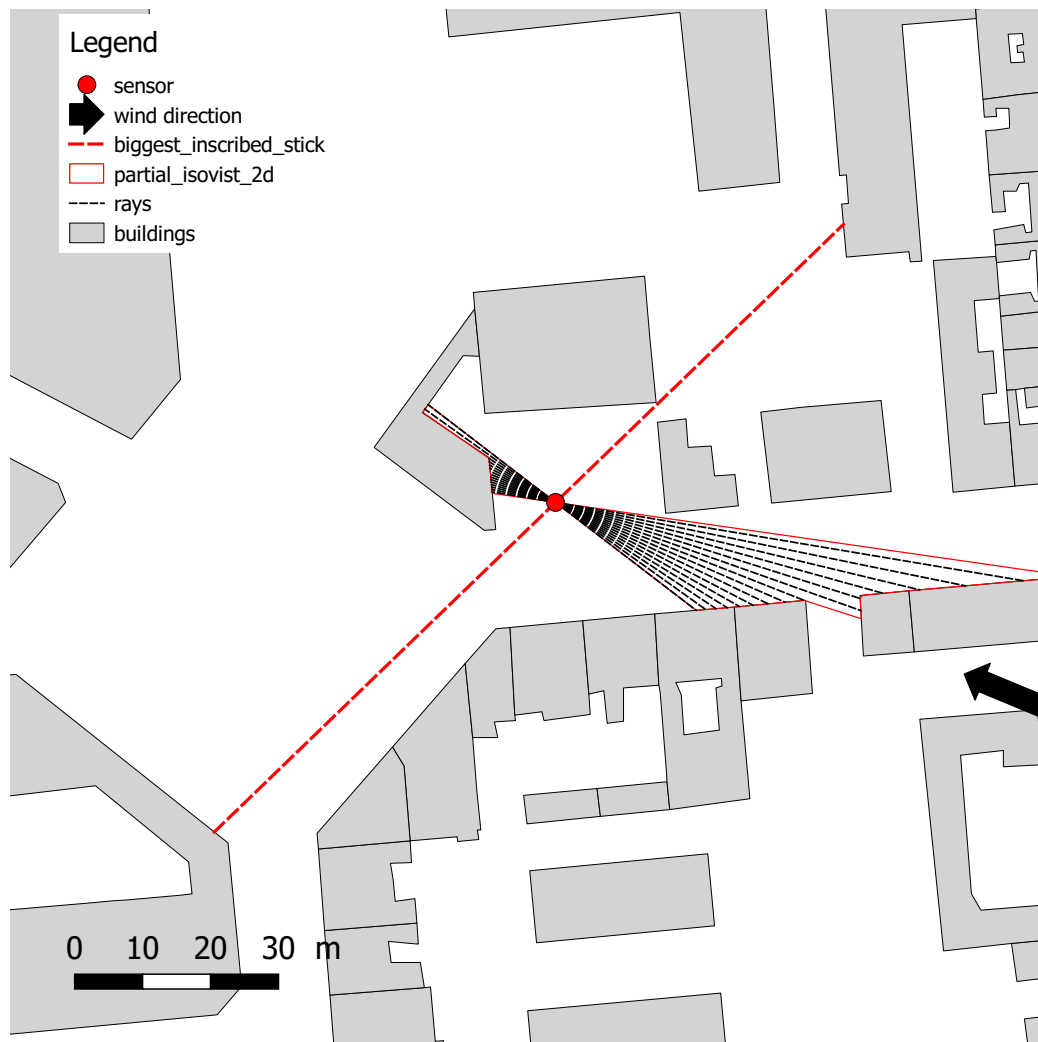


FIGURE 3.4 – Dans cette figure, le vent est orienté de E-SE vers W-NW (cf. flèche située sur le bord droit) et l’ouverture d’angle des isovists partiels est arbitrairement fixée à 30° . La plus grande des deux zones rouges est appelée isovist partiel au vent et la plus petite des deux zones rouges est appelée isovist partiel sous le vent. Le segment de droite en pointillés rouges correspond au plus grand diamètre inscrit dans l’isovist généré à partir de la position du capteur.

Dans chacun de ces trois cas, on accole au radical le suffixe `_bwd` pour la déclinaison au vent, `_fwd` pour la déclinaison sous le vent et `_*wd` pour la déclinaison simultanément au et sous le vent. Les formules 3.10, 3.11 et 3.12 correspondent aux versions au vent de ces trois indicateurs :

$$\text{pminraylen_bwd} = \min \{w_i | i \in \mathbb{I}\} \quad (3.10)$$

$$\text{pavgraylen_bwd} = \frac{1}{\text{card}(\mathbb{I})} \sum_{i \in \mathbb{I}} w_i \quad (3.11)$$

$$\text{pmaxraylen_bwd} = \max \{w_i | i \in \mathbb{I}\} \quad (3.12)$$

Il existe, de la même manière, trois déclinaisons de l'indicateur de **Hauteur moyenne du déroulé de façades partiel (phmean)**** selon que l'on s'intéresse à la hauteur du front bâti au vent, sous le vent ou simultanément au et sous le vent. A partir du formalisme introduit dans l'équation 3.1, nous définissons la version au vent de cet indicateur à l'aide de la formule 3.13 :

$$\text{phmean_bwd} = \frac{1}{\text{card}(\mathbb{I})} \sum_{i \in \mathbb{I}} h_i \quad (3.13)$$

Il s'agit en l'occurrence de la moyenne des hauteurs de bâtiments qui interceptent les rayons lancés depuis le capteur dans un secteur angulaire donné.

Comme ses prédécesseurs, le **Rapport d'aspect partiel (phw)**** se décline au vent, sous le vent et simultanément au et sous le vent. Ce rapport d'aspect partiel n'est alors ni panoptique ni directionnel mais restreint à un secteur angulaire défini à partir d'une direction principale. A l'aide du formalisme introduit dans l'équation 3.1, nous le définissons, dans sa déclinaison au vent, comme suit :

$$\text{phw_bwd} = \frac{\frac{1}{\text{card}(\mathbb{I})} \sum_{i \in \mathbb{I}} h_i}{\frac{1}{\text{card}(\mathbb{I})} \sum_{i \in \mathbb{I}} 2 \times w_i} = \frac{\sum_{i \in \mathbb{I}} h_i}{2 \times \sum_{i \in \mathbb{I}} w_i} \quad (3.14)$$

Il s'écrit donc comme un rapport de hauteur moyenne du front bâti au vent (resp. sous le vent ou simultanément au et sous le vent) divisée par le double de la longueur moyenne des rayons séparant le point de génération de la portion de déroulé de façades au vent (resp. sous le vent ou simultanément au et sous le vent).

La **Valeur absolue du produit scalaire du vecteur unitaire de la direction principale avec le vecteur unitaire du plus grand diamètre inscrit dans l'isovist (bissp)**** est le seul des indicateurs directionnels que nous avons introduits qui ne se décline pas au vent, sous le vent ou

simultanément au et sous le vent. A partir du formalisme de l'équation 3.1, nous le définissons comme suit :

$$\text{bissp} = \frac{|\vec{u} \cdot \vec{v}|}{\|\vec{u}\| \|\vec{v}\|} \quad (3.15)$$

où \vec{u} est un vecteur porté par la direction principale et où \vec{v} est un vecteur porté par le plus grand diamètre inscrit dans l'isovist et définit comme suit :

$$\vec{v} = \overrightarrow{Q_a Q_b} \quad (3.16)$$

avec :

$$\begin{aligned} a &= \min \{i | w_i + w_j \geq w_k + w_l, k \in \{1, \dots, \text{nRays}\} \setminus \{i\}\} \\ j &= \left(i + \left\lfloor \frac{\text{nRays}}{2} \right\rfloor \right) \% \text{nRays} \\ l &= \left(k + \left\lfloor \frac{\text{nRays}}{2} \right\rfloor \right) \% \text{nRays} \end{aligned}$$

et :

$$b = \left(a + \left\lfloor \frac{\text{nRays}}{2} \right\rfloor \right) \% \text{nRays}$$

Comme précédemment, dans ces équations, les crochets ($\lfloor \]$) correspondent à la valeur entière du quotient et le symbole pourcentage (%) correspond au reste dans la division euclidienne de l'opérande de gauche par l'opérande de droite.

Nous pouvons remarquer que l'ensemble des indicateurs statiques directionnels que nous avons introduits jusqu'ici exploitent une zone source de type isovist. Ce constat ne s'applique pas à l'indicateur qui suit qui dépend, lui, d'une zone source de type *buffer* circulaire.

Le **Facteur de vue d'une portion de ciel (psvf)**** est un indicateur directionnel qui se décline au vent, sous le vent et simultanément au et sous le vent. Il n'est pas panoptique dans la mesure où son calcul est restreint au(x) secteur(s) angulaire(s) défini à partir d'une direction principale. Comme dans le cas du svf (panoptique) et en reprenant le formalisme de l'équation 3.1, nous le définissons, dans sa déclinaison au vent, comme suit :

$$\text{psvf_bwd} = 1 - \frac{1}{\text{card}(\mathbb{I})} \sum_{i \in \mathbb{I}} \sin \left(\arctan \left(\frac{h_i}{w_i} \right) \right) \quad (3.17)$$

Dans sa déclinaison au vent, cet indicateur est une mesure de la capacité d'un observateur à voir une portion de ciel dans la direction de provenance du vent depuis un point de vue donné (en l'occurrence la position du capteur).

3.3.3 Indicateurs « dynamiques » ou « regroupés »

Les indicateurs que nous présentons dans cette section relèvent de deux grandes catégories. Les premiers (r' , r'') tirent partie d'une approche différentielle de la forme locale de l'espace ouvert urbain. Le principe qui est à l'origine des seconds (\bar{r} , σ_r , $\text{Skew}(r)$, $\text{Kurt}(r)$, \bar{r}' , $\sigma_{r'}$) repose sur un découpage de l'espace vide urbain en composantes (tronçons de squelette) et un regroupement des capteurs morphologiques afférents.

Approche différentielle de la forme locale de l'espace ouvert

Il s'agit ici de considérer que le rayon de la plus grande boule inscrite est une fonction d'une variable réelle (l'abscisse curviligne du capteur morphologique sur son tronçon de squelette) qui retourne une variable réelle (la longueur du rayon de la plus grande boule inscrite centrée au capteur). Nous admettons que, à l'exception des extrémités des tronçons de squelette, cette fonction $r : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ est deux fois dérivable et désignons par r' et r'' ses dérivées première et seconde par rapport à l'abscisse curviligne. Comme dans la suite de ce travail nous n'utilisons que les valeurs absolues ($|r'|$ et $|r''|$) de ces indicateurs, il n'est pas utile de préciser un sens de parcours précis des tronçons du squelette.

L'indicateur **Dérivée première du rayon de la plus grande boule inscrite** (r')**, tel que nous l'avons défini dans le paragraphe précédent, est une mesure de la déformation du vide environnant immédiatement le capteur (ou évolution locale de la distance du capteur à la façade de bâtiment la plus proche). Il est défini analytiquement comme la limite du taux de variation de r lorsque l'intervalle de variation (ou pas de l'abscisse curviligne) tend vers zéro. À titre d'exemple, dans une rue enchâssée entre deux barres de bâtiments parallèles, l'indicateur r' a une valeur nulle en tout capteur du squelette du vide.

De la même manière, l'indicateur **Dérivée seconde du rayon de la plus grande boule inscrite** (r'')**, tel que nous l'avons défini deux paragraphes plus tôt, est une mesure de la vitesse de déformation du vide environnant immédiatement le capteur. Il est défini analytiquement comme la limite du taux de variation de r' lorsque l'intervalle de variation (ou pas de l'abscisse curviligne) tend vers zéro.

Regroupement des capteurs par tronçons du squelette

Comme nous l'avons écrit un peu plus tôt, le principe ici est de découper l'espace vide en composantes ou tronçons de squelette, puis de regrouper les capteurs morphologiques au tronçon, avant de procéder à une statistique

descriptive sur les valeurs des indicateurs r et r' correspondants (calcul de la moyenne, de l'écart-type, du coefficient d'asymétrie aussi appelé *Skewness*, ou du Kurtosis). C'est sur ce principe que nous définissons les six indicateurs suivant.

Nous appelons **Moyenne des rayons des plus grandes boules inscrites** $(\bar{r})^{**}$, la valeur moyenne de l'indicateur r pour l'ensemble des capteurs d'un même tronçon de squelette.

Nous appelons **Écart-type des rayons des plus grandes boules inscrites** $(\sigma_r)^{**}$, la mesure de la dispersion des valeurs de l'indicateur r autour de \bar{r} pour l'ensemble des capteurs d'un même tronçon de squelette. Sur un tronçon de rue enchâssé entre deux barres de bâtiments parallèles, l'indicateur σ_r a une valeur nulle en tout capteur. Par contre, la présence d'une anfractuosité, mais aussi l'ouverture ou la fermeture de l'espace vide dans un tel tronçon augmente la valeur de cet indicateur.

Nous appelons **Coefficient d'asymétrie ou *skewness* des rayons des plus grandes boules inscrites** $(\text{Skew}(r))^{**}$, le moment d'ordre trois de la variable r centrée en \bar{r} et réduite à σ_r . Cet indicateur est une mesure de l'asymétrie de la distribution des valeurs de r au tronçon.

Nous appelons **coefficient d'aplatissement ou Kurtosis des rayons des plus grandes boules inscrites** $(\text{Kurt}(r))^{**}$, le moment d'ordre quatre de la variable r centrée en \bar{r} et réduite à σ_r . Cet indicateur est une mesure de l'aplatissement de la distribution des valeurs de r au tronçon.

Concernant l'étude de la distribution des valeurs de r' au tronçon nous nous limitons aux seuls moments d'ordre un (moyenne) et deux (écart-type).

Ainsi, nous appelons **Moyenne de la dérivée première des rayons des plus grandes boules inscrites** $(\bar{r}')^{**}$, la valeur moyenne de l'indicateur r' pour l'ensemble des capteurs d'un même tronçon de squelette.

Pour cette même raison, nous définissons l'**Écart-type de la dérivée première des rayons des plus grandes boules inscrites** $(\sigma_{r'})^{**}$ comme mesure de la dispersion des valeurs de l'indicateur r' autour de \bar{r}' pour l'ensemble des capteurs d'un même tronçon de squelette.

3.3.4 Tableau synoptique des indicateurs morphologiques

Le tableau synoptique que nous présentons en Fig 3.5 résume d'une manière synthétique l'ensemble des indicateurs morphologiques introduits dans ce chapitre. En plus de la zone source correspondante, il précise pour chacun d'eux la ou les application(s) où il sera mis en oeuvre. Trois applications seront ainsi développées dans la suite de ce manuscrit :

- signature morphologique de la forme urbaine à l'échelle d'un groupe d'îlots (cf. chapitre 1),

- identification des composantes de la forme urbaine (cf. chapitre 2),
- corrélations forme-vent (cf. chapitre 3).

3.3.5 Préparation de la géométrie pour la détermination du squelette

- Une géométrie simplifiée pour éviter un squelette bruité - Retour à la géométrie originelle pour le calcul des indicateurs. (pré-traitement commun à l'ensemble des applications)

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons développé l'idée selon laquelle le vide urbain, composante potentiellement complexe, peut être abstrait sous la forme d'un « squelette informé ». Par échantillonnage curviligne, ce squelette peut lui-même être transformé en un ensemble de capteurs virtuels ponctuels en lesquels nous mesurons l'espace environnant. Cette discrétisation est développée de manière à accélérer le traitement morphologique d'un tissu urbain ce qui permet d'envisager de traiter un grand nombre de cas en un temps raisonnable.

Pour ce faire, nous avons proposé 41 indicateurs morphologiques qui visent tous, mais chacun d'une manière relativement différente, à mesurer :

- le gabarit du vide qui conditionne sa capacité d'ouverture (avec des indicateurs tels que *parea*, *hw*, *pperim*, *r*, *pminraylen*, *(p)svf*, etc.),
- la porosité qui conditionne la capacité d'écoulement ou de rétention d'un fluide par la trame bâtie (avec des indicateurs tels que *bsf*, r' , r'' , \bar{r} , σ_r , etc.),
- la rugosité qui caractérise l'état de surface ou le grain de la trame bâtie et conditionne l'écoulement du vent (avec un indicateur tel que *hre*),
- la profondeur qui conditionne l'écoulement du vent (avec des indicateurs tels que *bissp*, *(p)avgraylen*, *pmaxraylen*, etc.).

A ce stade de notre développement, nous pouvons aussi remarquer que les indicateurs morphologiques que nous proposons permettent de caractériser l'espace urbain en deçà (zone source de type *isovist*) comme au-delà (zone source de type *buffer* circulaire) du premier front bâti environnant immédiatement le capteur.

Il importe enfin de préciser qu'un pré-traitement de lissage du squelette du vide urbain permet de réduire le nombre de capteurs et d'accélérer conséquemment les temps de calcul.


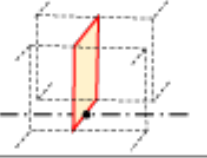
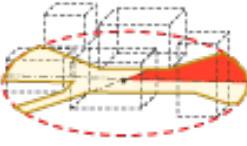
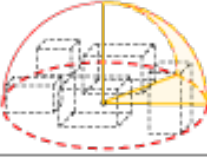
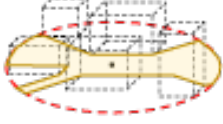
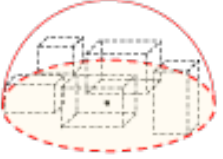
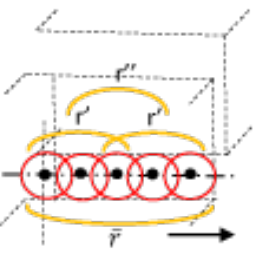
		Zones sources	Indicateurs	Applications			
				(1)	(2)	(3)	
Indicateurs statiques	a-directionnels	Boule inscrite		r		X	X
		Section transversale au tronçon du squelette		hw			X
	directionnels	Isovist partiel		phmean(*)			X
				phw(*)			X
				parea(*)			X
				pperim(*)			X
				pminraylen(*)			X
				pavgraylen(*)			X
				pmaxraylen(*)			X
	bissp			X			
Buffer circulaire (partiel)		psvf(*)			X		
panoptiques	Isovist		avgraylen	X			
			hmean	X			
			hw	X		X	
	Buffer circulaire		svf	X		X	
			bsf			X	
Indicateurs dynamiques			hre			X	
			\bar{r}			X	
			r^2		X	X	
			r^{11}		X	X	
			\bar{r}^2		X		
			σ_r			X	
			σ_{r^2}			X	
			Skew(r)			X	
			Kurt(r)			X	

FIGURE 3.5 – Tableau récapitulatif des indicateurs morphologiques. La mention (*) indique que l'indicateur se décline dans une version au vent, sous le vent ou simultanément au et sous le vent.

Troisième partie
Étude du vent en ville

Chapitre 1

État de l'art de l'influence du bâti sur la circulation du vent en ville

Ce chapitre présente un état de l'art de l'étude de l'influence du bâti sur la circulation du vent en ville, dans les espaces extérieurs. Après une délimitation de l'échelle d'étude, nous passons en revue un ensemble de travaux qui visent à prévoir la circulation du vent urbain à partir des caractéristiques de la forme urbaine. Nous ordonnons cette revue en fonction de la complexité de la configuration du bâti (cette complexité étant simplement exprimée à partir du nombre de bâtiments).

1.1 Échelle de travail

L'échelle à laquelle nous étudions la circulation du vent est une échelle intermédiaire qui n'est ni celle de la ville dans son ensemble ni celle du bâtiment. Cette échelle s'étend du fragment urbain ou environnement immédiat d'un piéton à l'îlot voire au groupement d'îlots (ce que nous appellerons **micro-échelle****). A cette échelle, la difficulté principale est que, pour étudier les effets du vent, il est nécessaire de représenter explicitement la géométrie, ce qui n'est pas fait par exemple à méso-échelle où les effets de la géométrie sont représentés par des paramètres tels que la **rugosité**** ou la **porosité**** du tissu urbain, deux notions qui vont être définies au cours du chapitre. Le concept de squelette précédemment introduit est bien adapté pour cette échelle car il permet de représenter la forme urbaine réelle mais en la réduisant tout en gardant l'essence (forme et orientation des rues, jonctions, etc.).

1.2 Mécanismes du vent dans le milieu urbain

1.2.1 pression et mouvement du vent

A micro-échelle, le vent est caractérisé par un écoulement turbulent freiné et perturbé par les obstacles urbains. Les faces des masses construites entravent son écoulement et perturbent sa trajectoire. En effet, « Les molécules de fluides qui contournent l'obstacle sont freinées et créent à leur tour un obstacle pour les molécules qui se déplacent sur une trajectoire voisine. La zone de perturbation qui part du bord de l'obstacle, pour rejoindre la première ligne de courant non perturbée, porte le nom de couche limite » (OPPBT2009).

Sur la Fig. 1.1 on voit une ligne de courant en pointillés qui présente la **couche limite**^{**}. A partir d'un point sur la surface bâti, cette couche limite se détache de la surface en un point nommé **point d'arrêt**^{**}. Au delà de ce point, se crée une zone de perturbation le long de la surface.

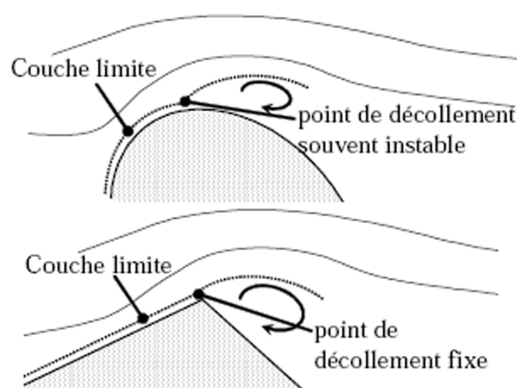


FIGURE 1.1 – Deux types de décollement de couche limite (HÉMON 2004, p. 12)

« Au voisinage des parois, la vitesse peut subir de très fortes perturbations jusqu'à présenter une inversion de sens sous la forme de tourbillons » (HÉMON 2004, p. 11). Cette inversion de sens et création de tourbillons produit des différences de pression (surpressions et dépressions).

Le passage du vent autour des obstacles crée ainsi des zones de gradients de vitesse différents ce qui peut engendrer des zones d'inconfort aéraulique. Les arrêtes vives, très répandues dans les formes des constructions urbaines, sont une cause principale de ces perturbations aérauliques. Le vent adhère mieux aux parois profilées. « Dans le cas d'une forme anguleuse, le décollement va au contraire se produire invariablement sur l'arrête » (HÉMON 2004,

p. 12). Le décollement se crée au niveau des faces latérales (les façades) ou des faces supérieures (les toits). Nous présentons dans la suite les notions aérodynamiques auxquelles nous aurons recours dans notre méthodologie.

1.2.2 Notions aérodynamiques

Les notions aérodynamiques que nous définissons dans cette partie sont liées à l'échelle urbaine ciblée. Dans la section 1.1 nous avons évoqué une échelle microclimatique dans les limites d'un groupement d'îlot. Au niveau de l'atmosphère, cette échelle est située dans une couche appelée **canopée urbaine****. Il s'agit de la couche atmosphérique située entre le sol et le niveau des toits. Cette canopée est considérée comme étant la base d'un environnement urbain hétérogène formant la sous-couche de rugosité dont l'épaisseur atteint en moyenne 1,5 fois la hauteur de la canopée urbaine (OKE 1987). Cette sous-couche est l'étendue d'influence de la canopée urbaine. Elle est caractérisée par des perturbations climatiques dont les origines sont naturellement les flux d'air turbulents engendrés par les structures urbaines irrégulières, c'est ainsi qu'elle est qualifiée de zone à fort gradient de vitesse de vent. Nous parlons dans la partie suivante de la *forme* du gradient vertical de vitesse et de son changement dans le milieu urbain.

Profil de vent

Dans les zones rurales, le profil de la vitesse moyenne du vent prend la forme d'un logarithme. A cette vitesse moyenne, est associée une direction. Ce profil est caractérisé par une vitesse de référence U_0 prise à une hauteur de dix mètres. Sur site, c'est la valeur moyenne de la vitesse du vent ; calculée sur 10 minutes.

Le profil subit une déformation dépendante de la morphologie urbaine (obstruction des bâtiments) qui a globalement tendance à diminuer les vitesses de vent dans la partie basse du profil, voir Fig. 1.2. Dans la pratique, on utilise deux paramètres, la hauteur de déplacement et la longueur de rugosité.

La **hauteur de déplacement**** est la hauteur de laquelle le profil logarithmique est translaté vers le haut et la **longueur de rugosité**** est la hauteur à laquelle la vitesse théorique du vent deviendrait nulle. Ces deux grandeurs dépendent de la rugosité du tissu et de la hauteur des obstacles.

Les profils de vent sont utiles pour calculer la vitesse du vent à une certaine altitude, connaissant celle à dix mètres, ou pour recalculer une donnée prise dans un terrain particulier à un autre d'une rugosité différente.

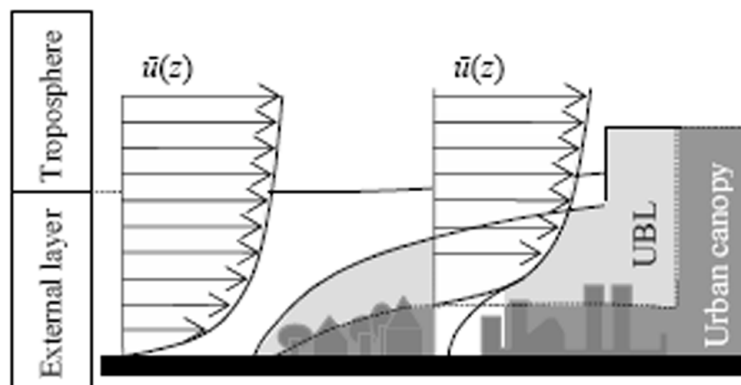


FIGURE 1.2 – Passage du profil du vent d’un milieu rural à un milieu urbain. Changement du profil du vent au niveau de la canopée urbaine (*Urban canopy*) située en bas de la couche limite urbaine (*Urban Boundary Layer*, UBL) (BOZONNET, BELARBI et ALLARD 2006).

Vitesse turbulente, vitesse moyenne

La vitesse du vent est une grandeur vectorielle projetée dans un repère cartésien. Selon le genre d’étude et la structure étudiée toutes les composantes ne seront donc pas toujours prises en compte.

Le vent est un phénomène fluctuant au cours du temps. On définit donc une valeur moyenne $U(t)$ et on calcule la turbulence par la biais d’un écart-type de la valeur instantanée autour de la valeur moyenne sur une période donnée. En général, la vitesse moyenne du vent est intégrée sur 10 minutes.

1.3 Influence d’un bâtiment unique

La situation d’un bâtiment unique, isolé et disposé sur un sol uniformément plat peut sembler assez théorique. Toutefois, si les bâtiments hauts et isolés existent rarement dans les zones urbaines compactes, ils sont plus fréquemment présents dans les zones péri-urbaines (on peut à titre d’exemple évoquer « La maison radieuse », à Rezé, ou un ensemble d’immeubles du quartier du château à Rezé, Nantes). Par ailleurs (BERANEK 1984a), a montré que la présence de bâtiments de moindre hauteur au pied d’un bâtiment de

grande hauteur ne change pas son effet sur l'écoulement du vent. Les grands bâtiments au sein d'un tissu plus bas pourraient ainsi être traités comme des bâtiments isolés.

Les études de configurations d'obstacles isolés que l'on retrouve dans l'état de l'art servent en général à produire des équations empiriques pour définir la zone protégée en fonction des caractéristiques de l'obstacle. Celles-ci sont ensuite utilisées pour dimensionner des dispositifs de type brise vent, comme un mur végétal, un écran brise vent perméable, etc. (GANDEMER et GUYOT 1981).

1.3.1 Phénomènes aérodynamiques

Dans une zone construite, le vent est influencé par la végétation, les bâtiments et la topographie de la zone, mais autour d'un seul bâtiment, le vent est influencé principalement par la forme du bâtiment (sa largeur, sa hauteur et sa profondeur), ainsi « le contournement de l'obstacle par le vent se fera différemment suivant la géométrie de l'obstacle et ses dimensions par rapport à l'échelle de la turbulence » (FLAMAND 2003). Dans cette section, nous décrivons essentiellement l'écoulement du vent autour d'un bâtiment parallélépipédique. Ce que nous présentons, ce sont les points de décollement principaux du contournement ainsi que les zones délimitées par les trajectoires des « lignes de courant » du vent autour d'une construction.

Selon une direction donnée, et pour un bâtiment rectangulaire haut, le vent « heurte » une façade ou un coin du bâtiment. Plusieurs zones avec des caractéristiques aérauliques différentes sont créées.

Pour une direction perpendiculaire à la face la plus large du bâtiment, on définit le **point de stagnation**** comme point de rencontre entre la direction du vent et le plan de la façade face au vent. Le point de stagnation est situé dans la partie supérieure du bâtiment (MERLIER 2015, p. 27). A partir du point de stagnation, le vent tourne autour du bâtiment dans trois sens : vers le haut du bâtiment, et sur les deux cotés latéraux. Il est aussi rabattu vers le bas. L'air rabattu est enfermé sous le vent incident et crée un vortex (le vortex au vent).

Le vent qui contourne le bâtiment, se décolle au niveau des coins du bâtiment, au niveau du toit (les arrêtes vives). En fonction de l'élongation du bâtiment (sa profondeur), le vent se rattache sur les faces ou non. Après le bâtiment, le vent reprend sa course sur le terrain non bâti. Ce faisant, il enferme une zone d'air soumise à une forte dépression et des écoulements tourbillonnaires s'y développent. Cette zone, en aval du bâtiment est la **zone de sillage****, elle est généralement considérée comme zone protégée, car la vitesse du vent diminue et ne cause pas une situation d'inconfort aéraulique

pour le piéton.

Cette zone s'étend sur une longueur égale à dix fois l'épaisseur de l'obstacle. Après cette distance, le vent reprend son écoulement laminaire. « Dans le sillage, les mouvements tourbillonnaires ont des échelles caractéristiques liées aux dimensions de la construction et non plus à celles du vent naturel » (FLAMAND 2003).

La description que nous venons de donner est le résultat de la résistance d'un bâtiment à arêtes vives avec une hauteur importante par rapport à la largeur. Une modification du rapport entre ces dimensions changera la distribution des zones et la prépondérance des unes par rapport aux autres : par exemple, une quasi disparition de la zone de décollement au niveau des coins pour un bâtiment circulaire.

1.3.2 Règles empiriques

Nous reprenons ici deux règles empiriques explicitant, à partir de la forme d'un bâtiment isolé, les effets induits sur la circulation du vent.

Zone d'influence d'un bâtiment

BERANEK (1984a) (voir Fig. 1.3) propose une équation pour le calcul de la zone d'influence d'un bâtiment, incluant la zone de sillage. Il part de mesures en souffleries et la zone est déterminée par le tracé d'un cercle qui circonscrit les vortex avant et arrière. Après plusieurs essais, il établit que le rayon de ce cercle dépend uniquement des dimensions de la face au vent du bâtiment en l'occurrence la largeur de la paroi face au vent et la hauteur du bâtiment.

Brise-vent, facteur de protection, zone d'isoprotection

L'estimation de la zone « protégée » derrière un obstacle face au vent, est également nécessaire pour le dimensionnement des brise-vent. Ils sont caractérisés par un **facteur de protection**** qui traduit le pourcentage d'atténuation de la vitesse du vent incident. Il est calculé en un point P d'une hauteur Z situé à l'aval d'un brise-vent.

Le sillage peut être étendu jusqu'à une distance de 20 fois la hauteur du brise vent, et peut être divisé en sous-zones. Ces sous-zones regroupent des points dont la valeur du facteur de protection est proche et sont appelées « zones d'isoprotection ». Dans L'expression empirique établie pour calculer la surface de la zone d'isoprotection, nous pouvons constater qu'elle est basée sur les variables relatives à la surface face au vent du brise vent.

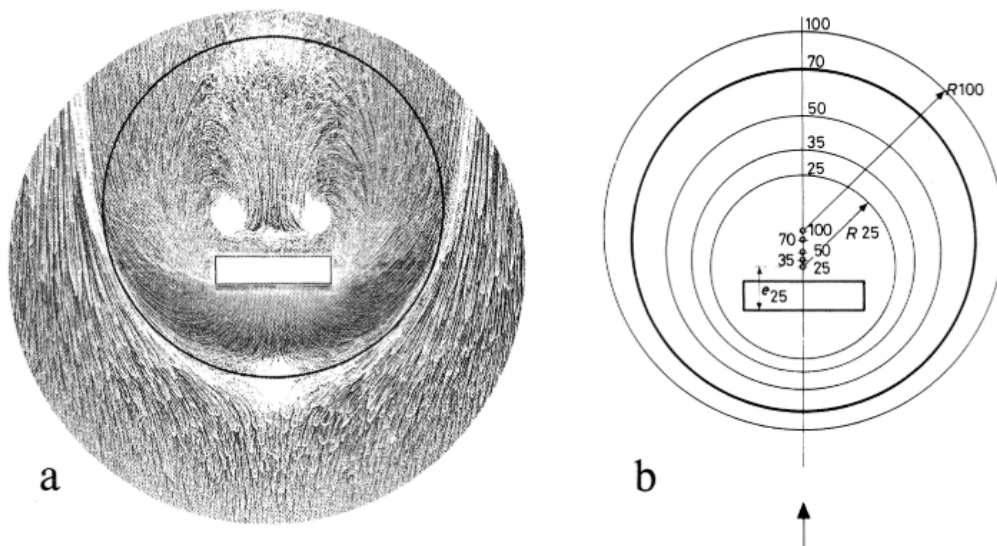


FIGURE 1.3 – Flux du vent et zone d’influence pour un bâtiment de dimension $b \times l \times h = 20m \times 80m \times 70m$, b étant l’épaisseur du bâtiment, l sa largeur et h sa hauteur (BERANEK 1984a, p. 29)

1.4 Influence d’une paire de bâtiments

Comme dans le cas précédent, la configuration d’une paire de bâtiments isolés est assez théorique. Elle est toutefois étudiée dans l’état de l’art pour analyser la circulation du vent dans des modèles simplifiés de rues canyons. Nous reprenons ces travaux pour introduire quelques notions essentielles puis, pour certaines configurations, nous donnons les règles empiriques qui visent, à partir de la configuration spatiale de la paire de bâtiments, à déduire les effets induits sur la circulation du vent dans l’environnement proche.

Dans le cas d’une paire de bâtiments, les effets induits sur la circulation du vent sont plus complexes notamment du fait de potentielles interférences entre les écoulements induits par chaque bâtiment. Le recensement des études qui suit, met en évidence des effets de pression (dépression, surpression) et autres « anomalies aérauliques » notamment consécutives à des « zones de chevauchement ». La disposition des bâtiments, les directions de leurs façades (parallèles ou non parallèles, convergentes vers un point, en quinconce etc.) et la différence entre leurs hauteurs respectives définissent le type d’effet aéraulique. Nous définissons ces effets et donnons les éléments de quantification disponibles dans la littérature.

1.4.1 Deux bâtiments de même hauteur

Bâtiments côte à côte face au vent

En étudiant des bâtiments côte à côte faisant front au vent, BERANEK (1984b) définit la distance t minimale entre les deux bâtiments pour laquelle on commence à percevoir un chevauchement entre les zones d'influence : $t > 2.5 \times a$ (a étant la largeur de la surface du bâtiment face au vent) pour les bâtiments minces et $t > 2.5 \times h$ (h étant la hauteur du bâtiment) pour les bâtiments épais, voir Fig. 1.4.

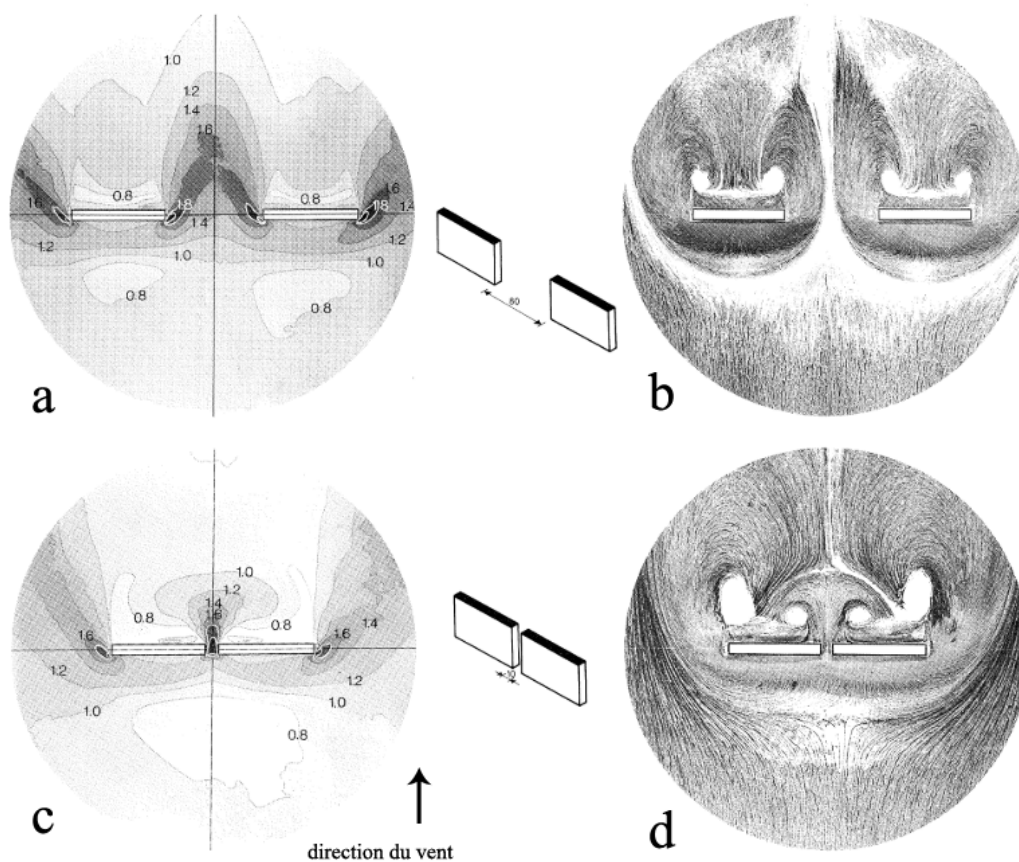


FIGURE 1.4 – Influence de la distance entre deux bâtiments ($b \times l \times h = 10m \times 80m \times 50m$, b étant l'épaisseur du bâtiment, l sa largeur et h sa hauteur), a) *discomfort map* pour une distance $t = 80m$, b) flux du vent pour une distance $t = 80m$, c) *discomfort map* pour une distance $t = 10m$, d) flux du vent pour une distance $t = 10m$.

On remarque d'après cette expérience réalisée en soufflerie par érosion

du sable, que le rapprochement des deux bâtiments fait interagir les vortex amont et les effets de coin au passage entre les deux bâtiments qui fusionnent en un seul écoulement (BLOCKEN et CARMELIET 2004, p. 135) (Fig. 1.5a). L'ouverture entre les bâtiments se réduit tellement que la zone affectée entre les bâtiments est fortement réduite (BERANEK 1984b, p. 44). En effet, pour cette disposition les bâtiments rapprochés réagissent comme dans le cas d'un seul long bâtiment.

En faisant varier les distances de séparation entre deux bâtiments (de hauteur égale à 10m ou 20m) côte à côte face au vent entre 5m et 160m, (WANG 2015) confirme aussi que la vitesse augmente pour une distance de séparation $D > 40m$. Étant donné qu'il vise des dispositions urbaines ayant un potentiel éolien important, il se concentre sur les zones de sur-vitesse dans chaque cas.

Effet Venturi

Si deux bâtiments (ou deux rangées de bâtiments mitoyens) tracent deux directions non parallèles et convergentes vers un point à l'infini (un point de fuite), le vide entre les deux composants prend une forme conique et forme un angle ouvert au vent. L'effet Venturi apparaît comme la zone de surpression formée au niveau du resserrement du vide (Fig. 1.5.b). GANDEMER et GUYOT (1976) ont étudié ce phénomène pour une condition géométrique donnée avec une hauteur de bâtiment supérieure à 15m.

Deux bâtiments de hauteur identique et parallèle au vent, effet de canalisation

Il s'agit ici de deux longs bâtiments qui se font face et sont parallèles. La prolongation du vide intercalaire entre eux entraîne une prolongation du phénomène déclenché au début de la rue, comme le passage du vent avec une vitesse importante ou amortie par l'élongation du « couloir » du vide (Fig. 1.5.c). Les conditions d'existence de ce phénomène sont liées à des notions d'espacement entre les bâtiments et de hauteur moyenne (le guidage du flux est dépendant de la largeur du couloir inférieur au double de la hauteur moyenne des bâtiments aux bords, et d'un autre côté d'une hauteur moyenne minimum égale à 6m).

Deux bâtiments de hauteur identique, vent transverse

On s'intéresse ici au cas du vent impactant deux bâtiments parallèles successifs. La configuration la plus étudiée est la rue en vent transverse. Dans cette configuration, la composition des effets tourbillonnaires est celle

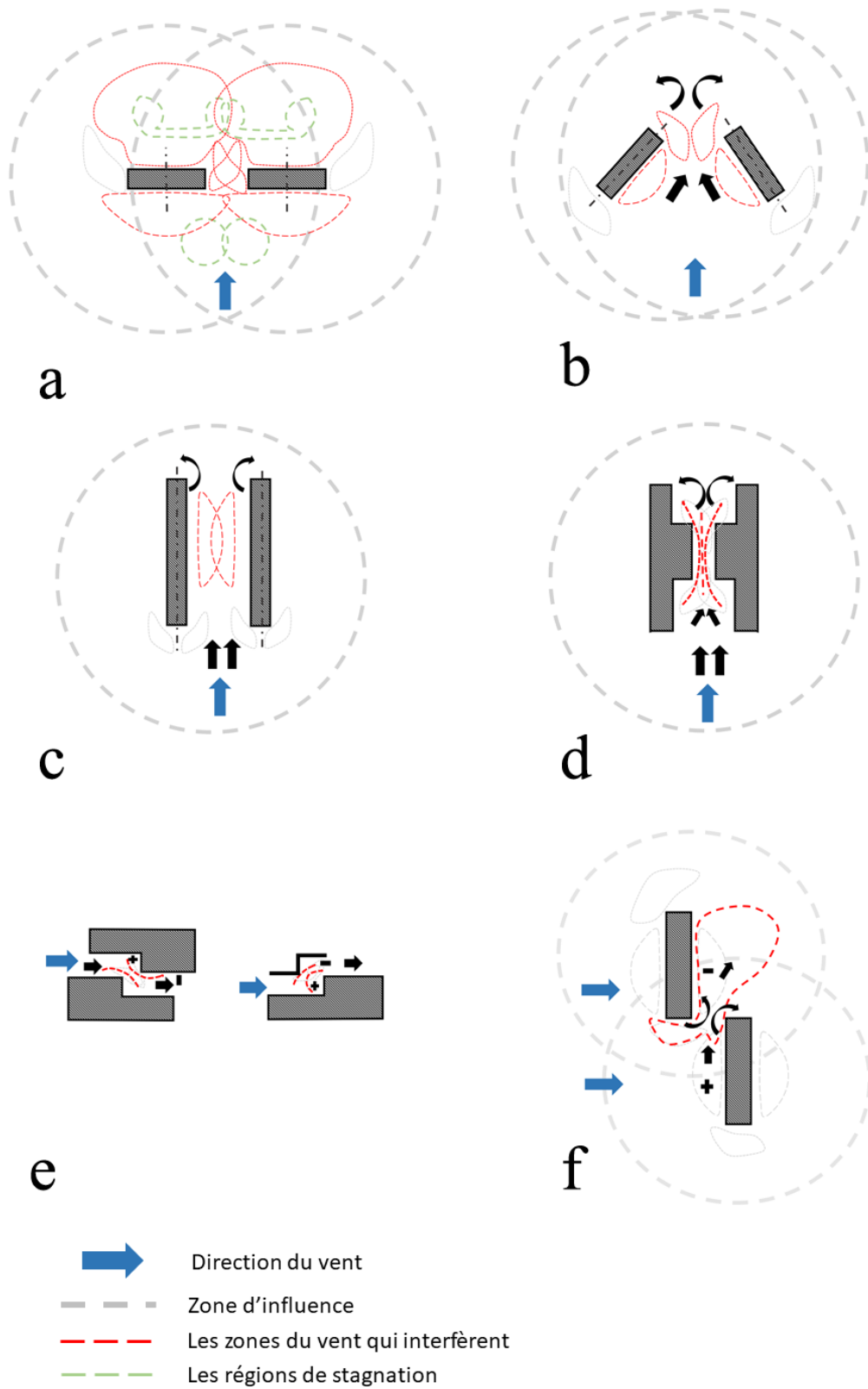


FIGURE 1.5 – (a) Bâtiments côte à côte face au vent, (b) Effet de Venturi, (c) Effet de canalisation, (d) Effet d'entonnoir, (e) Effet de chicane, (f) Deux bâtiments décalés.

des effets qui se produisent sur deux bâtiments isolés successifs. Elle est bien décrite par (OKE 1987).

Le ratio d'aspect H/W est utilisé pour l'étude des régimes tourbillonnaires dans ces configurations. La relation, entre le ratio d'aspect et le régime tourbillonnaire, est liée aussi à la profondeur des masses construites (épaisseur des bâtiments), donc normalement on a trois paramètres : H , W , L . Ce qui est généralement déterminant dans la littérature a trait aux seuils du ratio d'aspect H/W . Lorsque $H/W < 0.3$, les deux bâtiments se comportent de manière individualisée, ce qu'on appelle *isolated roughness* ou rugosité isolée. Pour $0.3 < H/W < 0.65$, on commence à remarquer une perturbation au niveau du sillage du bâtiment en amont et au niveau du « tourbillon d'avant », du bâtiment en aval : *Wake interference* ou interférence des sillages. Pour un rapprochement important, $H/W > 0.65$, le vortex dans la rue canyon se détache de « l'enveloppe de l'écoulement » qui ne pénètre plus dans la rue, on parle alors d'un régime de *skimming flow* ou écoulement rasant.

Effet d'entonnoir

On parle d'un effet d'entonnoir lorsque on a deux cotés bâtis de face présentant des saillies au même niveau, ce qui entraîne un étranglement de l'espace entre eux (Fig. 1.5d). La vitesse du vent accélère au niveau de l'étranglement et reprend sa valeur de départ en aval. Cet effet est semblable à l'effet Venturi sauf que dans ce cas le rétrécissement du vide n'est pas lié à la directions des bâtiments mais plutôt à l'alignement des façades.

Effet de chicane (*draught effect et back pressure effect*)

Dans le cas d'une chicane, l'ouverture au vent est bloquée par un mur au second plan qui détourne la direction du passage du vent. Cela construit une sorte de « prise d'air », qui « récolte » le vent et crée une surpression au niveau de la « trappe » et accélère la vitesse du vent à son échappée (Fig. 1.5e). En vue de plan, cette configuration a une forme de chicane et on parle d'un effet de « contre pression ». Mais si cette forme est tracée en profil, et si l'ouverture du vent est orientée vers le haut (comme dans le cas des cheminées), cet effet s'appelle l'effet de traînée.

Deux bâtiments décalés

Cette configuration est considérée comme défavorable à cause de la vitesse de vent induite qui conduit à une gêne pour tout piéton présent entre les deux bâtiments (BOTTEMA 1993). En effet, le vent transversal incident crée une forte pression positive sur la façade au vent du bâtiment en deuxième plan

(en aval) et une pression négative sur la façade sous le vent du bâtiment du premier plan (en amont), voir Fig. 1.5f, ce qui génère un court-circuit et une accélération de la vitesse du vent (BLOCKEN et CARMELIET 2004, p. 97). Selon des études numériques réalisées par (BOTTEMA 1997), le court-circuit de pression peut entraîner de grandes zones de condition de vent très défavorables (facteur d'amplification locale supérieur à 2.0). Des zones turbulentes sont aussi produites près du bâtiment en aval.

1.4.2 Deux bâtiments de hauteur différente, effet *Wise*

On parle ici de deux bâtiments parallèles, avec une différence de hauteur marquée, soumis à un vent transverse. L'effet *Wise* correspond à la formation d'un vortex au vent entre les deux bâtiments avec une vitesse de vent importante.

WANG (2015, p. 77) explique les sur-vitesses qui peuvent survenir en fonction de la hauteur du bâtiment le plus haut : « Lorsque l'ensemble des bâtiments a une hauteur qui se situe entre 10 et 30 m, le coefficient de sur-vitesses peut prendre la valeur 1.5. Pour un ensemble dont les hauteurs sont situées entre 15 et 90 m, la valeur de la sur-vitesse peut être égale à 1.8 ».

1.5 Influence d'un groupe de bâtiments

Il existe dans l'état de l'art deux types d'études concernant l'influence d'un groupe de bâtiments sur la circulation du vent. Le premier – théorique – considère un ensemble de bâtiments modélisés par des volumétries simplifiées (des prismes droits, ou cylindriques) et disposés sur un damier ou sur une grille régulière (selon une trame orthogonale ou en quinconce). Le second étend ce cas théorique à des configurations urbaines plus vraisemblables pour lesquelles les dispositions et les formes des obstacles sont moins régulières.

Dans les deux cas, on décrit la circulation du vent comme combinaison d'effets aérauliques induits sur des configurations urbaines à bâtiments isolés ou paires de bâtiments. En effet, dans des configurations composées de plusieurs bâtiments, on distingue moins les zones définies dans la partie précédente (contournement des coins, zone de sillage ou vortex avant). C'est plutôt une répartition de pressions positives et négatives sur les faces des obstacles qui entraînent des courts-circuits et contrôlent l'écoulement du vent. L'interaction entre les phénomènes engendre des zones de différentes valeurs de vitesse, qui peuvent dans certains cas excéder les seuils établis pour qualifier les conditions de confort aéraulique.

Nous présentons dans la suite de ce manuscrit deux facteurs morphologiques importants qui servent à caractériser l'impact de la morphologie sur la circulation du vent. Nous présentons ensuite les différentes approches qui ont été proposées pour l'étude du vent pour un groupe de bâtiments.

La direction des rues peut accélérer la vitesse du vent quand elle coïncide avec sa direction et encore davantage quand les rues partent d'espaces dégagés (entrée de la ville ou grand espace ouvert). Dans ce cas, les vitesses élevées du vent dans les rues contribuent à refroidir et aérer l'espace urbain. Les rues larges parallèles au vent dominant présentent une vitesse du vent modérée mais aussi un flux d'air linéaire à l'intérieur de la rue. Une augmentation ou une diminution graduelle de la taille des ouvertures, comme les rues en entonnoir alignées avec le vent dominant, impliquent une accélération de la vitesse du vent. Quand les rues sont transverses à la direction du vent, au contraire, elles freinent le vent, voire même l'empêchent de rentrer dans le tissu urbain quand elles sont très resserrées. Des re-circulations se créent alors dans les rues piégeant la chaleur et la pollution.

Porosité : cette caractéristique est souvent négligée dans la planification urbaine contemporaine au profit d'une utilisation optimisée des sols. Une disposition dense des bâtiments réduit la circulation de l'air et crée des accélérations locales, tandis que des arrangements plus larges créent des écoulements plus proches du vent se développant sur un espace libre, sauf dans l'environnement immédiat des bâtiments.

1.5.1 Circulation du vent dans une configuration « en damier »

Objectifs

Appliquer des simulations numériques aérauliques ou des essais en soufflerie à ce genre de composition urbaine simplifiée constitue une forme d'initiation à la concrétisation de la relation vent-morphologie urbaine. Le but est ici de chercher des lois générales pour caractériser le comportement du vent dans des tissus urbains simplifiés. Les lois empiriques ici sont plutôt complexes. Il s'agit de formulations techniques détaillées mettant en oeuvre plusieurs paramètres. C'est ainsi qu'a procédé MERLIER (2015). Celle-ci a joué sur la compacité de la configuration de plots générés. Ces plots ayant eux-mêmes différentes formes (cubes, barres, L, etc.). Des simulations numériques ont été réalisées successivement sur les formes isolées et les formes groupées. L'analyse a visé principalement la répartition de la pression et son impact sur la demande énergétique (liée aux infiltrations et à la convection sur l'enveloppe).

D'autres travaux ont fait varier la *rugosité* et la *texture* des obstacles urbains (BOTTEMA 1997). Nous analysons dans la partie suivante les études trouvées dans la bibliographie qui sont les plus proches de notre objectif et extrayons les indicateurs utilisés pour caractériser le comportement du vent dans les formes urbaines.

Indicateurs géométriques impliqués dans les règles empiriques

Nous présentons ici les paramètres dimensionnels du gabarit urbain qui sont reliés aux paramètres du vent afin de composer des règles empiriques.

La **densité du bâti**** est un paramètre fréquemment utilisé dans l'étude de la vitesse du vent en ville et au niveau du piéton. C'est le taux d'occupation d'une surface urbaine par la masse bâtie. KUBOTA et al. (2008, p. 1701) ont réalisé des essais en soufflerie sur différents cas d'étude avec des densités bâties variées et ils ont montré une forte relation entre le rapport moyen de vitesse du vent et le taux brut de couverture des bâtiments.

L. JOHANSSON (2012) évoque un *fetch* et un index frontal pour la prévision de la vitesse du vent à hauteur de piéton. Le **fetch**** est la moyenne des distances d'un point au bâtiment le plus proche, dans un secteur angulaire déterminé, orienté par le sens du vent incident. L'**index frontal**** est la mesure de la surface des obstacles bâtis face au vent. La prise en considération du caractère orienté de ces deux indicateurs a montré une amélioration dans sa recherche de corrélation avec le vent et un bon ajustement de sa proposition de modèle.

Le calcul de **rugosité**** du terrain urbain est une question très étudiée (MACDONALD, GRIFFITHS et HALL 1998). Il y a eu plusieurs propositions visant à caractériser la rugosité. Les variables morphologiques utilisées dans ces propositions sont le nombre de bâtiments, leur hauteur moyenne, leur densité surfacique, l'index de la surface frontale et le *fetch*.

La relation de ces paramètres de rugosité au vent est basée uniquement sur l'observation. Le calcul de la rugosité sert essentiellement à définir la résistance de la configuration urbaine face au vent et à déduire les paramètres de recalage climatique.

Par ailleurs, WANG (2015) a étudié le « potentiel éolien » d'une forme urbaine et a cherché à déterminer les localisations favorables pour l'installation d'éoliennes en ville. Donc, il a analysé des formes de bâtiments différentes, des formes de toits différentes et des agencement différents. En résultat, il propose un indicateur urbain permettant de prévoir la capacité de produire de l'énergie. Cet indicateur permet de détecter les zones d'accélération du vent. Il repose sur les dimensions surfaciques de la zone étudiée.

L'espace entre les bâtiments n'est pas toujours rectiligne. Pour prendre

en compte la géométrie de la trame de ce vide, AIT-AMEUR (2002) propose le **prospect équivalent****, qui est un rapport entre la hauteur moyenne de l'espace et la largeur. Selon (AIT-AMEUR 2002), l'indicateur peut expliquer les modifications du trajet du vent et son mouvement tourbillonnaire au pied des constructions.

Dans la partie suivante, nous abordons une autre forme d'élaboration de modèle de liaison entre la forme et le vent. Elle se base sur des cas d'étude plus proches de la réalité, des mailles urbaines simplifiées qui préservent toutefois la complexité géométrique des tissus.

1.5.2 Extension à la circulation du vent dans une configuration urbaine complexe

Nous remarquons que d'après la bibliographie, plus le cas d'étude est homogène plus on s'intéresse à chaque détail et chaque variable dimensionnelle. Les lois empiriques impliquent par conséquent des indicateurs plus détaillés et basiques de la forme urbaine (hauteurs, distances, etc.). Pour les cas d'étude plus proches de la réalité urbaine, avec des formes composites, on tend plus à simplifier les lois empiriques, voire on cherche des « indicateurs » qui représenteraient des tendances d'évolution et non pas des équation mathématiques complexes.

Objectifs

Les cas existants peuvent être très difficiles à rapprocher d'archétypes pour utiliser les lois établies sur des formes simplifiées. Pour des projets existants à différentes échelles, les simulations aérauliques permettent d'effectuer des observations plus proches des préoccupations de la conception (perception du piéton, compréhension et résolution d'un problème existant, etc.). Nous citons ici des exemples concrets à différentes échelles où une étude détaillée est nécessaire :

- Résoudre un problème d'inconfort aérodynamique urbain, détecter et visualiser les zones d'accélération de vitesse. Ces zones impliquent un effort mécanique de la part du piéton pour pouvoir les traverser. Les recherches finissent par proposer des solutions pour l'installation d'un brise-vent ou une disposition plus adéquate des masses bâties pour éviter ces anomalies aérauliques ; (X. ZHANG et al. 2017 ; KUBOTA et al. 2008 ; BOUKETTA et BOUCHAHM 2011).
- Se focaliser sur la trame urbaine et faire varier le tracé du vide urbain pour en déduire la disposition adéquate pour une meilleure ventilation

naturelle dans le milieu extérieur ; (A. ZHANG, GAO et L. ZHANG 2005).

- Dédire de nouvelles règles constructives pour la disposition de la trame urbaine et montrer les conséquences induites en termes de microclimat (incluant les problématiques d'exposition au vent) (KUSHOL et al. 2013).

1.5.3 Indicateurs morphologiques utilisés pour décrire le vent en ville

La rue est l'entité de base de la ville. Beaucoup d'études portant sur la climatologie urbaines font un zoom à l'échelle de la rue. Le *design* des rues est la clef des problèmes bioclimatiques urbains (SHISHEGAR 2013). Les relations établies par (OKE 1988) entre le ratio d'aspect de la rue et les régimes tourbillonnaires du vent ont été expliquées dans la section 1.4.1.

Un autre indicateur important est la **rugosité moyenne**^{**}. La forme étant complexe, la rugosité prend l'aspect d'un indicateur plus simple. Sa formule est plus réduite. ADOLPHE (2001a) calcule cet indicateur en se basant essentiellement sur les hauteurs des bâtiments (hauteur globale du tissu tridimensionnel). Il propose aussi l'indicateur de **rugosité relative du tissu urbain**^{**} qui met plus en exergue les rapports de hauteurs des bâtiments, la différence en altitude entre les masses bâties.

L'indicateur de **Sinuosité**^{**} proposé par (ADOLPHE 2001a) indique le degré de curvilinéarité des rues, en l'occurrence le caractère rectiligne ou non des lignes médianes des rues. La formulation proposée par (ADOLPHE 2001a) pour cet indicateur est composée de variables géométriques suivantes : azimut de la rue (inclinaison par rapport au sud), azimut du vent incident, longueur de chaque segment composant l'axe courbe de la trajectoire.

Le **taux de percement horizontal du tissu urbain**^{**} proposé par (AIT-AMEUR 2002) a une définition proche de celle de la porosité urbaine. Il s'en distingue par le taux de vide dans une maille urbaine en matière de « distribution ». AIT-AMEUR (2002) propose cet indicateur pour insister sur « la dimension des creux urbains, leur disposition, leurs formes et leur orientation qui conditionnent la pénétration du vent dans le tissu ».

$$P_H = (\text{Surface}_{\text{vide public}} + \text{Surface}_{\text{vide privé}}) / \text{Surface}_{\text{totale}}$$

Importance d'étudier la distribution du vent dans la maille urbaine

Par rapport ce que nous venons de présenter, notre travail vise l'étude de groupes de bâtiments en configuration urbaine complexe. Une sélection des indicateurs évoqués dans la dernière section 1.5.3 est reprise dans notre

outil de représentation du vide urbain. Il est important de noter que si, d'après notre bibliographie sur le vent, les indicateurs globaux comme la rugosité, la sinuosité, la densité ou le ratio d'aspect moyen donnent une information qui aide à comprendre, dans une certaine mesure, l'écoulement du vent (BAKER et al. 1996 ; STEEMERS, BAKER et RATTI 1997 ; ADOLPHE 2001b), une étude menée par (NG, WONG et HAN 2006) révèle une limite de ce genre d'approche pour traiter de la porosité urbaine. La problématique abordée dans cette étude concerne la relation entre la perméabilité des tissus urbains et la conception de la ventilation pour la qualité de l'air dans le cas de la ville très dense. Des expérimentations en soufflerie ont été conduites. L'arrangement des « blocs » de vide dans la composition urbaine (dans les bâtiments et entre les bâtiments) est la variable utilisée afin de déterminer si cette distribution a un impact sur la ventilation. Les auteurs concluent que la quantité du vide n'est pas d'une grande influence sur la dispersion des polluants. Cependant, les auteurs retiennent qu'il est important de tracer des trajets pour le vent par la disposition du vide urbain. Ceci est possible au moment de la conception des projets urbains. La démarche qui consiste à fermer la ville par des obstructions puis à rechercher des solutions avec des espaces vides internes est moins efficace (NG, WONG et HAN 2006).

1.6 Analyse des tissus urbains par simulation aérodynamique

Nous l'avons vu, l'analyse des parcours de vent dans des tissus urbains théoriques ou réels est possible et porteuse de nombreux enseignements. Les simulations permettent une analyse détaillée de l'écoulement du vent (BLOCKEN 2015) mais restent basées sur une expertise et une procédure exigeante. Son utilisation dans la recherche et la conception progresse rapidement. Les simulations sur les cas urbains réels sont généralement caractérisées par une complexité qui dépasse largement celle des zones urbaines génériques.

Nous avons choisi d'utiliser ce mode de production de données aérauliques pour des tissus réels. Cependant, compte tenu de la difficulté de l'exercice, nous nous sommes appuyés sur l'expertise du CSTB qui a réalisé les simulations. Nous décrivons ici les étapes nécessaires à la réalisations de telles simulations et illustrons notre propos sur les simulations réalisées par le CSTB.

1.6.1 CFD : paramétrage du modèle et simulations numériques aérauliques

Modèles de turbulence

Il existe plusieurs modèles de turbulence pour la simulation en mécanique des fluides numériques ou *Computational fluid dynamics* (CFD). L'objectif de chaque recherche décide du modèle à appliquer. RANS pour *Reynolds Averaged Navier Stokes*, DNS pour *Direct Numerical simulation* ou LES pour *Large Eddy Simulation* sont les principaux modèles mis en oeuvre. Dans le cadre de notre travail, nous avons recours au modèle RANS qui repose sur les équations de Navier Stokes. Cette méthode est largement utilisée et validée en CFD. Selon un récapitulatif établi par (RICHARD et al. 2011), plusieurs ouvrages ont proposé des directives générales pour le lancement de la simulation numérique pour des études sur le *vent piétonnier* comme (MOCHIDA et al. 2002 ; YANG et al. 2008 ; YOSHIE et al. 2007). Si certaines simulations sont réalisées en utilisant le modèle LES, les exigences élevées en matière de calcul (maillage, temps de calcul) de cette méthode en limitent l'application.

Validité de l'outil

YOSHIE et al. (2007) ont réalisé une comparaison entre les résultats d'un essai en soufflerie et ceux de simulations CFD, pour des configurations en plots isolés et des maquettes 3D de quartiers existants. Ils ont montré que les valeurs de vitesse moyenne sont presque identiques dans les zones à grandes vitesses. Les codes CFD tendent cependant à sous estimer la valeur du vent par rapport aux résultats expérimentaux. Ceci est expliqué par l'impossibilité de reproduire parfaitement la volumétrie bâtie existante avec un modèle 3D.

1.7 Synthèse

Au sens de la prévision des paramètres aérauliques par des dimensions morphologiques de la ville, l'état de l'art montre que plus la configuration urbaine se complexifie, plus on a tendance à simplifier la formule mathématique des indicateurs en question. Nous remarquons que les variables les plus fréquemment utilisées sont : la hauteur des bâtiments, la surface de la paroi du bâtiment face au vent et les caractéristiques de l'espacement entre les bâtiments. En reprenant le concept de captation virtuelle présenté dans le chapitre 3, nous avons traduit, d'une manière littérale, approximative ou par

le biais des différentielles, une sélection de ces indicateurs. Nous les présentons dans le Tab. 1.1.

Indicateurs de la littérature	Indicateurs testés
Ratio d'aspect (Oke 1988)	Ratio d'aspect (hw)
Hauteur des bâtiments (Gandemer et al. 1976)	Hauteur moyenne ($hmean$)
Index frontal (Grimmond et al. 1999)	
Distance entre bâtiments (Beranek 1984)	Rayon de la plus grande boule inscrite (r, r', r'')
Porosité (Ng et al. 2006)	Facteur de vue du ciel (svf)
Densité du bâti	Ratio de surfaces bâties (bsf)
Taux de percement horizontal du tissu (Ait-Ameur 2002)	Surface de l'isovist partiel ($parea$)
Rugosité (Macdonald et al. 1998)	Hauteur moyenne de rugosité (hre)
Rugosité relative (Adolphe 2001)	
Sinuosité (Adolphe 2001)	Produit scalaire du plus grand diamètre inscrit dans l'isovist rapporté au vent ($bissp$)
Zone d'influence (Beranek 1984)	Périmètre et surface de l'isovist partiel ($pperim, parea$)
<i>Fetch</i> (Johansson 2012)	Moyenne/longueurs minimale et maximale des rayons de l'isovist ($pavgraylen, pminraylen, pmaxraylen$)

TABLE 1.1 – Liste de quelques indicateurs proposés dans le chapitre 3 en référence aux indicateurs issus de l'état de l'art.

Chapitre 2

Méthodologie : injection de l'information aéraulique dans le contexte du SIG

De la même manière que nous avons introduit le concept de vide urbain et que nous l'avons modélisé comme un réseau de capteurs morphologiques dans le chapitre 3, nous voulons maintenant définir et modéliser le « vide aéraulique » aussi appelé domaine ou veine aéraulique. L'objectif ici est donc, partant d'une collection d'empreintes polygonales de bâtiments issues des données topographiques standard, de construire le domaine aéraulique, de réaliser les simulations de mécanique des fluides numériques, puis de produire les résultats sous la forme d'une collection de « capteurs aérauliques » virtuels dans un plan horizontal à deux mètres du sol. Nous terminons ce chapitre par une présentation du mécanisme d'importation et de regroupement de ces capteurs dans le contexte du SIG.

Il est important de noter ici que l'étape intermédiaire de simulation de mécanique des fluides numériques a été réalisée par M. Sylvain Aguinaga, Ingénieur aérodynamique, membre de la Division Modélisation Numérique au CSTB, à Nantes.

2.1 Construction et maillage du vide aéraulique

2.1.1 Simplification et translation des données topographiques

Après récupération de la BD TOPO®[®], nous importons la couche de bâtiments dans QGIS, la délimitons aux dimensions de notre zone d'étude et

la simplifions comme décrit dans la section 3.1 du chapitre 3 (comblement des cours intérieures et lissage des fronts bâtis). Nous sauvons cette collection d'empreintes polygonales simplifiées de bâtiments (avec l'attributaire correspondant) au format SHP.

Ce fichier d'empreintes est ensuite importé dans le contexte du logiciel SketchUp. Cet import est accompagné d'une translation dans le repère local de la maquette (en effet, pour des raisons d'arithmétique ordinateur, nous cherchons à limiter le nombre de chiffres significatifs des diverses coordonnées). Les polygones 2D de la géomatique sont alors transformés en objets de type `Sketchup::Face`, faces polygonales (donc planes) munies d'un attribut de hauteur, immergées dans un espace vectoriel 3D.

2.1.2 Construction de la veine numérique

Comme le rappelle BOUYER (2009), « la simulation numérique des écoulements d'air en milieu urbain est basée sur une analogie avec les techniques de simulation expérimentales en soufflerie. Il s'agit de recréer une veine de "soufflerie numérique" avec l'avantage de ne pas être contraint pas les dimensions spatiales et de maîtriser la valeur des conditions physiques aux limites. » Ces conditions physiques aux limites influent sur l'écoulement du vent et sur sa simulation. Avant de les détailler, posons quelques définitions.

Zone d'intérêt, zone de rugosité, zone d'étude

Nous appelons **zone d'intérêt**** la partie centrale de la zone urbaine étudiée. Elle est constituée d'un ensemble de volumes bâtis et d'un vide urbain intercalaire. Elle est cernée par d'autres volumes bâtis, appelés obstacles, qui s'opposent à la circulation du vent. Nous appelons cette deuxième zone, la **zone de rugosité****, elle a pour fonction d'entraver l'écoulement du vent incident de façon à le rendre plus conforme aux conditions réelles. Dans le cas d'une zone d'intérêt comprenant un unique bâtiment émergent de grande hauteur H , (FRANKE, HELLSTEN et al. 2007) recommandent de calibrer l'épaisseur de cette zone de rugosité à une valeur comprise entre six et dix fois H . C'est pour cette raison que nous avons choisi un terrain d'étude à distance de grandes tours dans le chapitre 3. La **zone d'étude**** (ou zone à étudier) est l'union des zones d'intérêt et de rugosité.

Dimensions de la veine aéraulique

Comme l'écrit BOUYER (2009), « la veine [numérique] a une géométrie parallélépipédique et ses dimensions sont paramétrées par la taille de la zone

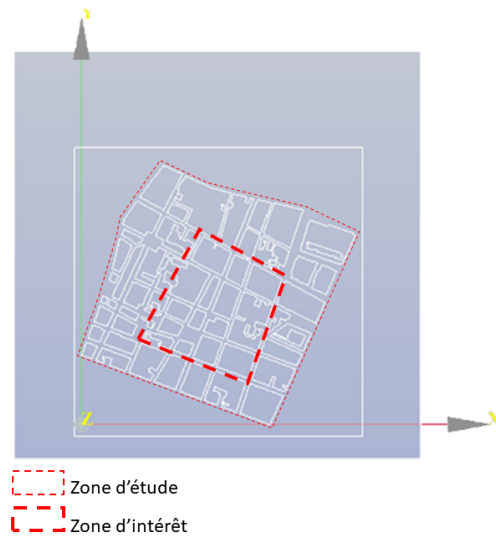


FIGURE 2.1 – Délimitation de la zone d'intérêt et de rugosité d'un exemple urbain

à étudier, qui est inscrite dans une boîte englobante délimitée par la position extrême et la hauteur maximale des bâtiments et aménagements ». L'objectif est ainsi « d'éloigner le plus possible les frontières fictives du volume de la zone d'étude, pour éviter les effets de blocage, tout en gardant une volumétrie raisonnable pour limiter le nombre de mailles volumiques de simulation ». Laisser une étendue suffisante autour de la zone d'étude permet que des phénomènes aérodynamiques comme les re-circulations puissent se développer autour des volumes bâtis.

(BOUYER 2009) n'est pas le seul à proposer un gabarit pour la veine numérique. En effet, d'autres règles de dimensionnement sont proposées par (FRANKE, HELLSTEN et al. 2007 ; TOMINAGA et al. 2008 ; BLOCKEN 2014 ; MERLIER 2015). Pour dimensionner au plus juste cette veine, BLOCKEN (2015) introduit le concept de *blockage ratio* comme rapport entre la surface cumulée de bâtiments dans une section de la zone d'étude orthogonale au vent incident d'une part, et la surface totale de la veine numérique dans cette même section d'autre part (Fig. 2.2). Dans le cas de la veine numérique utilisée pour les simulations du CSTB, nous notons que, quelque soit la direction de vent choisie, le *blockage ratio* est inférieur à 0,5%. Cette valeur est inférieure au seuil des 3% partagée par la communauté des experts de la CFD (FRANKE, HELLSTEN et al. 2007). Un dépassement de cette valeur seuil de 3% aurait engendré des interférences autour des volumes bâtis. On notera par ailleurs, que cette même veine numérique CSTB respecte les règles

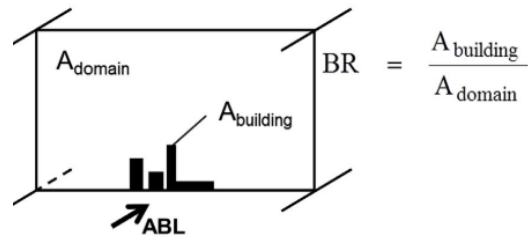


FIGURE 2.2 – Illustration du *blockage ratio* extrait de BLOCKEN (2015).

d'extension amont, aval et latérales de (BOUYER 2009, p. 96).

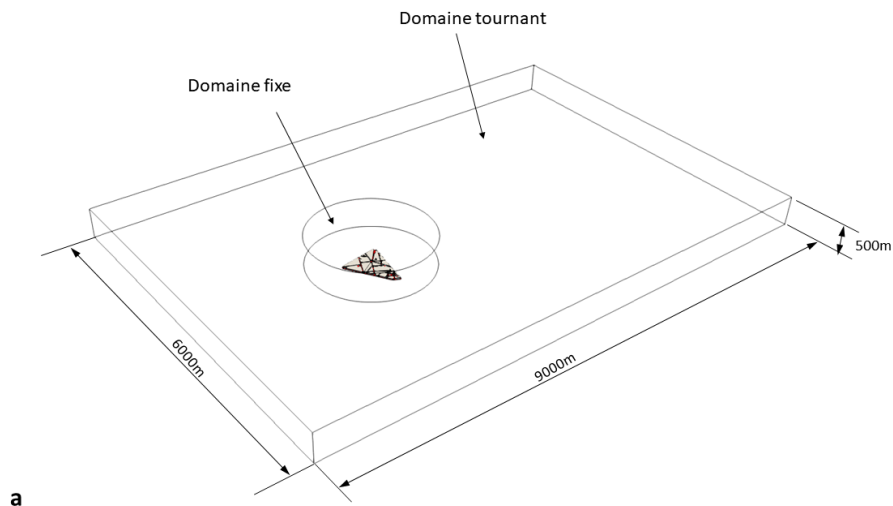


FIGURE 2.3 – Veine numérique utilisée par le CSTB pour les simulations de mécanique des fluides numériques (crédit : Sylvain Aguinaga, CSTB, Nantes).

2.1.3 Soustraction des bâtiments

Le gabarit de la veine numérique ayant été arrêté, nous pouvons la construire comme une géométrie parallélépipédique dans un logiciel de CAO tel que Salomé (<https://www.salome-platform.org/>). Pour obtenir le vide urbain, il nous reste alors à retrancher de cette veine numérique l'ensemble des volumes bâtis. Les contours de ce vide urbain sont alors les toits et les murs des volumes bâtis, mais aussi les parois latérales et supérieure de la veine numérique et enfin la paroi inférieure de cette même veine multiplement

trouée (au sens où on en retranche l'ensemble des empreintes au sol des divers volumes bâtis).

D'un point de vue pratique, la fonctionnalité `SalomeWriterAndExtruder` du plugin `t4su` de SketchUp permet l'export des faces polygonales issues des traitements précédents à destination de Salomé par le biais d'un script Python. Ces faces sont créées (primitive `geompy.MakeFace`) comme des collections de noeuds (primitive `geompy.MakeVertex`), regroupés en contours fermés (primitive `geompy.MakePolyline`). Elles sont ensuite extrudées à l'aide de la primitive `geompy.MakePrism`. Nous obtenons alors, dans le contexte de Salomé, une collection de prismes droits hermétiquement clos correspondant aux bâtiments de la zone d'étude.

Cette collection de prismes droits est finalement retranchée, par opération booléenne (primitive `geompy.MakeCutList`), de la veine numérique pour former l'espace interstitiel ou vide aéraulique, lieu d'écoulement du vent.

2.1.4 Maillage du vide aéraulique

Dans ce vide aéraulique que nous venons de construire, nous souhaitons maintenant calculer des vitesses de vent et des turbulences. Pour ce faire, il faut diviser ce volume interstitiel en un ensemble de volumes élémentaires appelés mailles. Cette discrétisation du vide aéraulique - qui est aussi le domaine de calcul - en mailles est parfaitement couvrante (l'union géométrique des mailles est exactement identique au volume du vide aéraulique) et sans chevauchement (DEHLOUM 2011, p. 67).

Plusieurs formes de mailles élémentaires existent, mais, comme le note (BOUYER 2009, p. 94) : « dans les configurations d'écoulements d'air en milieu urbain, nous préférons les mailles tétraédriques car, étant déstructurées, elles s'adaptent mieux aux formes irrégulières constituées par les nombreux bâtiments présents sur le socle constitué par le sol ». Les simulations numériques dont nous avons bénéficié ont été construites avec un maillage hybride, combinant des mailles tétraédriques dans la zone d'étude et des mailles quadrangulaires dans le reste de la veine numérique.

Concernant la dimension des mailles, trois contraintes différentes sont à intégrer. D'après (TOMINAGA et al. 2008), pour les études de vitesse du vent à l'échelle du piéton, il importe que la dimension de la maille (ou **longueur caractéristique****) dans la zone d'intérêt soit égale au 1/10e de la dimension des bâtiments. D'après (FRANKE, HIRSCH et al. 2004), pour estimer la vitesse de vent au niveau du piéton, il importe que celle-ci soit calculée à la troisième ou quatrième maille au-dessus du sol, ce qui implique que le maillage à proximité du sol dans la zone d'intérêt soit très fin. Enfin, pour (TOPARLAR et al. 2017), il faut imposer des longueurs caractéristiques très

fin (de l'ordre du mètre) à la base des bâtiments puis utiliser des fonctions d'accroissement au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la zone construite.

2.2 Simulations de mécanique des fluides numériques

2.2.1 Paramétrage CFD et résolution numérique des équations de la mécanique des fluides

Les simulations sont faites avec le code OpenFOAM 6 (<https://openfoam.org/>). Le *solver simplefoam* est utilisé dans une approche de type RANS stationnaire avec un modèle de turbulence k-epsilon.

2.2.2 Post-traitement dans ParaView

Pour avoir les paramètres aérauliques au niveau du piéton, il est nécessaire de faire le calcul sur l'ensemble des mailles du domaine. Cependant, comme nous nous intéressons au confort du piéton, nous n'exploitons les résultats que dans un **plan de coupe**** horizontal à hauteur de piéton (soit à une altitude de 1,5 ou 2 mètres). Cette extraction d'un plan de coupe nous semble assimilable à une réduction dimensionnelle dans le domaine aéraulique. En ce sens, elle fait écho à la réduction dimensionnelle que nous avons opérée dans le domaine morphologique (cf. chapitre 3).

Comme l'illustre le schéma de la Fig. 2.4, cette « extraction » correspond en fait à un enchaînement de tâches. La première consiste en une interpolation des valeurs des paramètres aérauliques en chacun des sommets de la maille tétraédrique. La seconde consiste en une projection des sommets des mailles tétraédriques traversées par le plan de coupe sur ce même plan de coupe. Nous appelons **capteurs aérauliques**** les points ainsi projetés.

En pratique, les résultats de la simulation aéraulique réalisée dans le logiciel OpenFOAM sont visualisés dans le logiciel Paraview (<https://www.paraview.org/>). Préalablement à l'export CSV des résultats à destination du SIG, le filtre *paraview.simple.CellDatatoPointData* permet de mettre en oeuvre l'extraction sus-mentionnée.

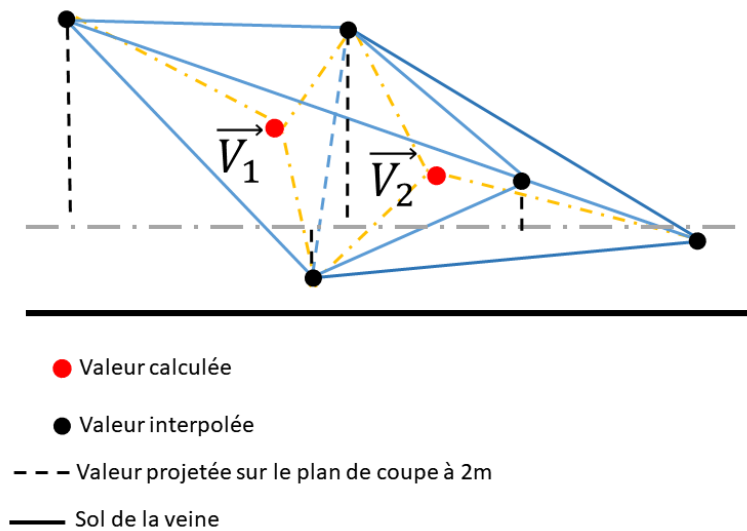


FIGURE 2.4 – Chaque maille tétraédrique porte une information de vitesse (un vecteur de \mathbb{R}^3) qui est interpolée aux sommets du tétraèdre. Les valeurs interpolées en chacun des sommets sont ensuite projetées sur le plan de coupe horizontal.

2.3 Traitement dans QGIS

2.3.1 Importation et translation des données aérauliques

Comme nous venons de l'expliquer, les résultats de la simulation CFD sont post-traités et exportés au format CSV via le logiciel Paraview. Ce fichier CSV est ensuite importé dans QGIS via la primitive `CSVReader` du plugin `t4qg`. Il faut alors reprojeter ces points CFD ou capteurs aérauliques du repère local, dans lequel ils ont été calculés, vers le repère géographique (de code EPSG :2154 pour la Place de Mexico dans notre cas d'étude parisien présenté dans le chapitre 3). Il faut aussi, à partir des trois composantes de vitesse de vent en chacun des points, produire un attribut de vitesse égal à la norme euclidienne de ces trois composantes.

2.3.2 Jointure spatiale des capteurs aérauliques au plus proche capteur morphologique

Le nombre de capteurs aérauliques est très supérieur au nombre de capteurs morphologiques (ainsi, dans le cas du secteur de la place de Mexico à Paris, il y a 32915 capteurs aérauliques pour 900 capteurs morphologiques). Nous choisissons de regrouper les capteurs aérauliques autour des capteurs

morphologiques les plus proches, afin de pouvoir mettre en correspondance les informations du vent avec celles liées à la forme, comme dans la Fig.2.5. Nous réalisons ce regroupement au plus proche voisin en minimisant la distance euclidienne entre capteurs. Ces regroupements définissent des **voisinages de capteurs aérauliques**** aussi appelés **cellules aérauliques****. Celles-ci sont porteuses d'informations aérauliques moyennées dans le but de représenter l'écoulement dans l'ensemble de l'espace ouvert autour du capteur. Nous n'avons pas souhaité stocker les caractéristiques du vent directement sur le capteur à hauteur du piéton estimant que nous aurions eu alors une donnée trop ponctuelle.

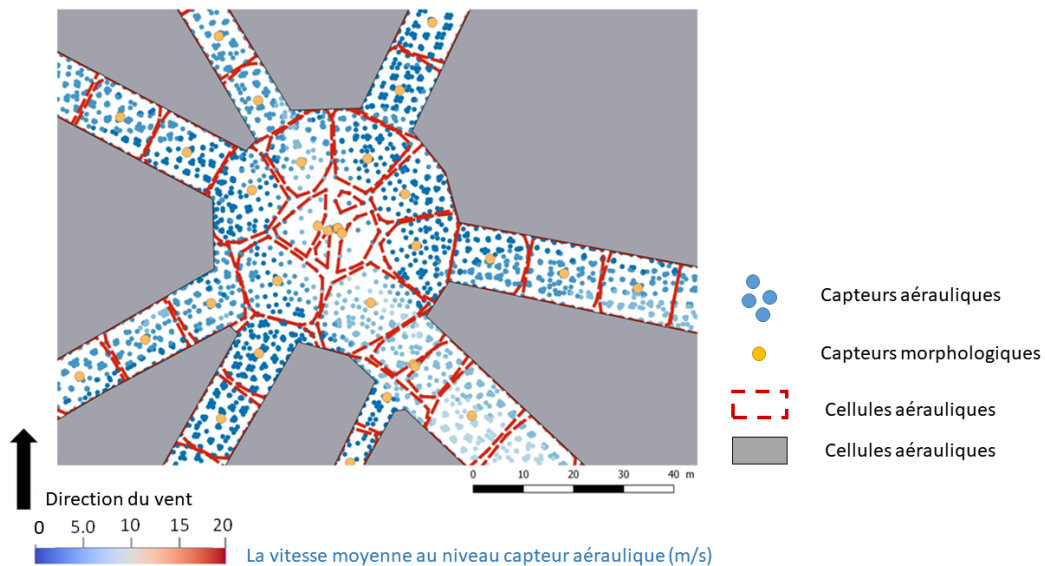


FIGURE 2.5 – Regroupement des capteurs aérauliques sous forme de cellules aérauliques autour de chaque capteur morphologique

L'information aéraulique stockée dans chacun des capteurs aérauliques est double : une norme de vitesse moyenne de vent notée \bar{v} d'une part, une estimation de l'énergie cinétique k d'autre part.

2.3.3 Homogénéité de l'information aéraulique par cellule morphologique

Pour mesurer l'homogénéité des valeurs de \bar{v} et k en chacun des points CFD regroupés dans une même cellule aéraulique, nous avons procédé à des calculs de valeurs moyennes et d'écart-types pour chacune de ces grandeurs. Pour rappel, les valeurs d'écart-types mesurent la dispersion de ces grandeurs au sein d'un même voisinage. Plus l'écart-type est faible et plus le

voisinage (construit à partir de considérations purement morphologiques) est cohérent au sens aéraulique. *A contrario*, plus cet écart-type est élevé et plus le voisinage présente des disparités au sens aéraulique. Comme le montre la Fig. 2.6, nous constatons la relative homogénéité de l'information aéraulique par cellule aéraulique.

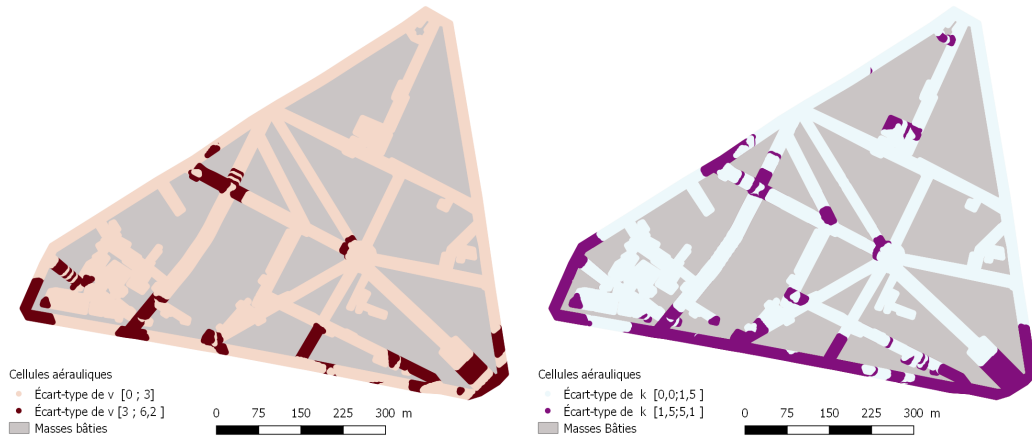


FIGURE 2.6 – (a) Homogénéité de l'indicateur \bar{v} sur les cellules aérauliques, (b) Homogénéité de l'indicateur k sur les cellules aérauliques.

2.4 Conclusion

Pour conclure, nous avons, dans ce chapitre, présenté un ensemble de processus visant à modéliser le vide urbain et à transférer le produit de la simulation en mécanique des fluides numériques dans le contexte d'un SIG. Le résultat ainsi produit est une collection de cellules aérauliques (représentant autant de grandeurs moyennes sur des voisinages de capteurs aérauliques) toutes placées dans un plan horizontal à hauteur de piéton. Comme ces cellules sont associées aux capteurs morphologiques introduits dans le chapitre 3, l'objectif, dans la suite de ce manuscrit (cf. chapitre 3), est de chercher à établir des corrélations entre les informations aérauliques qu'elles embarquent d'une part et les informations des capteurs morphologiques d'autre part.

Quatrième partie

Applications

Chapitre 1

Intérêt du squelette informé pour la signature morphologique de la forme urbaine à l'échelle d'un groupe d'îlots

Dans un éditorial de la revue *Environment and Planning B : Urban Analytics and City Science*, BATTY (2017) revient sur l'expression consacrée « Le tout est plus [autre] que la somme de ses parties » attribuée à Aristote. La question que nous posons dans le cadre de cette première application est de savoir s'il est possible, à partir de la collection de capteurs ponctuels issus du squelette informé du vide urbain, d'inférer une information d'ensemble sur la nature du tissu urbain étudié.

Le but de ce chapitre est plus précisément de produire une analyse morphologique automatique au niveau d'échelle intermédiaire qui est celui d'un ensemble d'îlots urbains. Pour ce faire, un squelette informé est construit pour plusieurs tissus urbains sélectionnés, des indicateurs sont identifiés et calculés au niveau des capteurs du squelette, puis nous analysons la distribution des valeurs des indicateurs à l'aide d'histogrammes de fréquences.

1.1 Compléments méthodologiques

En statistique, l'**histogramme des fréquences**** d'une distribution de valeurs est un outil de représentation de la répartition de ces valeurs par classes. Il présuppose, dans le cas d'une variable continue telle que les indicateurs présentés dans le chapitre 3, d'être en mesure d'identifier un ensemble de classes (ou intervalles) de valeurs et, pour chacune de ces classes, d'être ca-

pable de dénombrer l'ensemble des « individus » qui s'y trouvent. Ce type de représentation en diagramme est un outil susceptible d'aider à l'exploration et à l'organisation de l'information urbaine à caractère morphologique.

Au cours de ce chapitre et pour chacun des indicateurs sélectionnés, nous représentons ainsi la distribution des valeurs de ce dernier sur l'ensemble des capteurs issus de l'échantillonnage du squelette informé. Classiquement, nous regroupons en abscisse l'ensemble des classes couvrant l'intervalle des valeurs possibles de l'indicateur et, en ordonnée, nous dénombrons le nombre d'individus de chacune des classes. Le résultat ainsi produit est une juxtaposition de rectangles qui dessinent un **profil morphologique**** caractéristique du réseau de capteurs et du terrain sous-jacent.

L'examen de ce profil morphologique et de ses dynamiques pour l'ensemble des indicateurs sélectionnés est un marqueur du degré d'homogénéité ou de complexité formelle de chaque tissu urbain.

Nous appelons **signature morphologique**** un ensemble de profils morphologiques homogènes (ce qui implique une relative proximité des tracés des histogrammes de fréquences). Notre objectif ici est de montrer que cette notion de signature morphologique permet d'identifier et de singulariser les divers types de tissus urbains.

Pour ce qui concerne le choix des métriques, nous nous sommes limités à quelques indicateurs statiques a-dimensionnels ou panoptiques. Il est possible que le choix d'un indicateur directionnel produise un histogramme des fréquences riche d'enseignements mais, dans le temps contraint de ce travail de thèse nous n'avons pas pu le vérifier. Plus précisément et parce que nous cherchons à corrélérer le vent en ville et la forme urbaine, il nous est apparu légitime de recueillir des informations relatives à l'ouverture et à la micro-granularité (aspérités) des tissus. Notre choix s'est donc porté sur la longueur moyenne des rayons dans un échantillonnage par abscisse angulaire de l'isovist (avgraylen ou \bar{w}), le ratio d'aspect panoptique (hw) et le facteur de vue du ciel (svf) pour caractériser l'ouverture des tissus. Et, pour caractériser la micro-granularité des tissus, nous avons repris l'indicateur de hauteur moyenne du front bâti (hmean ou \bar{h}) .

1.2 Cas d'étude

Pour tester la validité de la méthode que nous venons de présenter, nous avons identifié huit secteurs différents qui présentent chacun, des particularités morphologiques propres Fig. 1.1.

Le tableau 1.1 répertorie l'ensemble des cas d'étude dans une progression liée au rapport vide-plein. Nous commençons par les sites où le vide prédo-

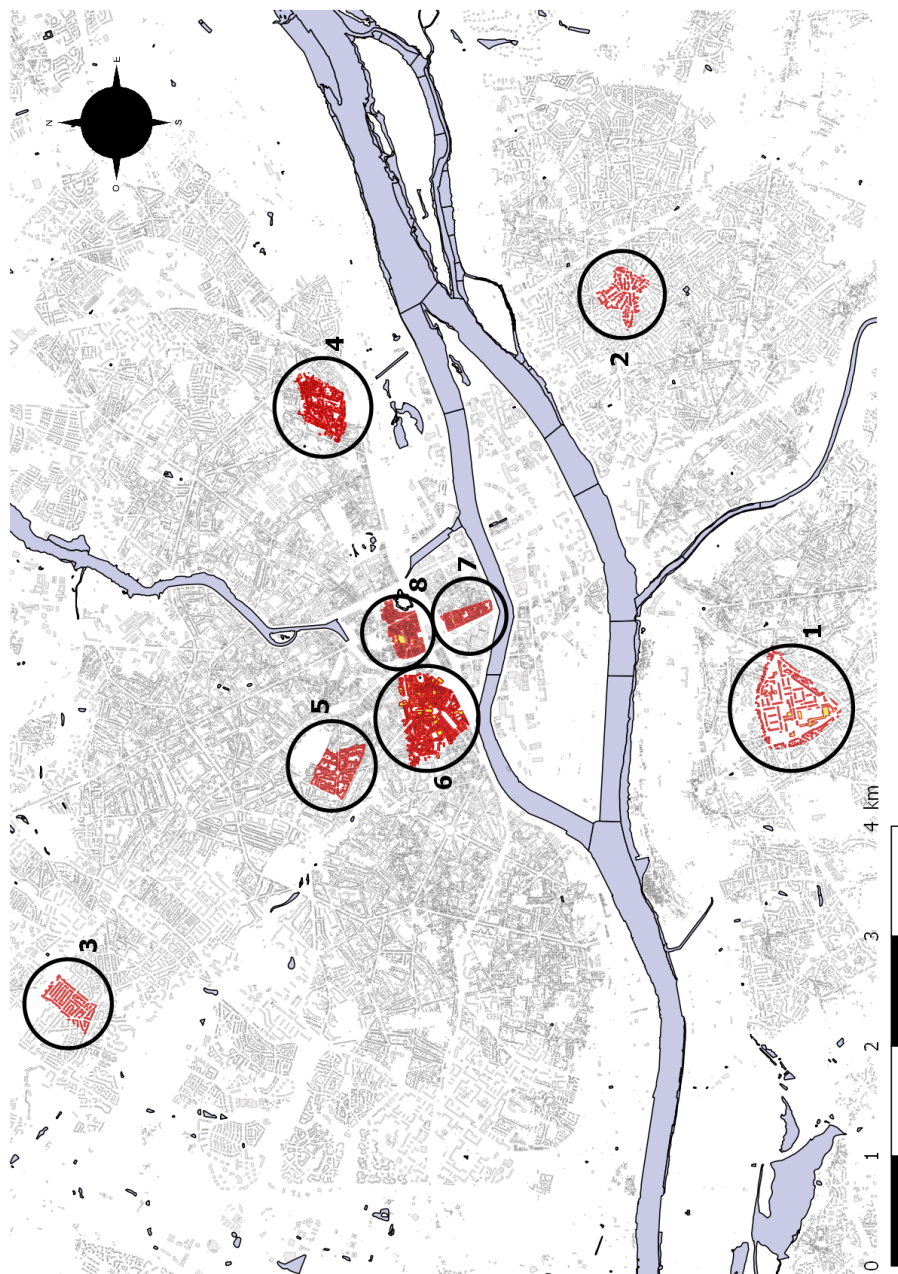


FIGURE 1.1 – Localisation de l'ensemble des cas d'étude de l'agglomération nantaise (France), dans une progression de la périphérie vers le centre urbain : (1) Le château de Rezé, (2) Saint-Sébastien-sur-Loire, (3) La Bouvardière, (4) Dalby, (5) Les Hauts Pavés, (6) Place Graslin, (7) Hôtel-Dieu, (8) Bouffay.

mine et terminons par les sites où la tendance s'inverse et où le plein domine. Dans le tableau qui suit, l'acronyme « Rvp » renvoie à une mesure du rapport vide-plein - comme adaptation du coefficient d'emprise au sol - dans la seule zone d'étude. Nous détaillons ensuite ces cas en les regroupant par nature morphologique commune.

Cas	Nom	Surface (km ²)	Nombre d'empreintes	Rvp (%)
1	Le château de Rezé	0.437	191	19,3
2	St-Sébastien-sur-Loire	0.133	167	19,7
3	La Bouvardière	0.123	195	20,9
4	Dalby	0.198	143	33
5	Les Hauts Pavés	0.143	94	37
6	Place Graslin	0.244	54	61,4
7	Hôtel-Dieu	0.061	15	63,2
8	Bouffay	0.129	35	69,8

TABLE 1.1 – Présentation synthétique des cas d'étude.

Le premier groupe composé des cas 1, 2 et 3 est caractérisé par une disposition des vides fluide, continue et uniforme. Ces cas correspondent à des quartiers péri-urbains et plus précisément à des zones résidentielles. Le système bâti y est « ponctuel » au sens où les bâtiments sont dispersés sur la trame en étant individuellement bordés d'un espace vide privé adjacent à l'espace vide public, sur un ou plusieurs côtés.

Les bâtiments des cas 2 et 3, qui sont des zones de maisons individuelles, ont une hauteur moyenne de 5 à 7 mètres. A contrario, le cas 1 est constitué d'un ensemble de bâtiments plats dont la hauteur peut atteindre 15 mètres.

Les cas 4 et 5 regroupent des morphologies intermédiaires, à mi-chemin entre les zones résidentielles précitées et des tissus plus denses de centre urbain. Dans ce groupe de cas, l'espace intermédiaire ou vide urbain commence à être comblé. L'espace vide « privé » est rejeté en fonds de parcelle et commence à se dissocier de l'espace vide public. La composition urbaine se densifie. Les masses construites se rapprochent et commencent à former des linéaires de fronts bâtis plus conséquents. Des espaces vides privés apparaissent à l'intérieur des blocs.

Le troisième et dernier groupe est celui des cas 6, 7 et 8. Il correspond à des tissus urbains compacts et denses. Leur système bâti est linéaire, avec des emprises au sol de masses construites conséquemment étendues, des espaces privés rejetés en coeur d'îlot et un déroulé de front bâti continu sur la totalité

du contour du « bloc ». Ces trois dernier cas seront développés plus largement dans le chapitre 2.

1.3 Résultats et discussion

Le tableau de résultats que nous présentons dans cette section peut être lu horizontalement comme verticalement. Une lecture horizontale permet d’approfondir la présentation de chacun des cas d’étude au regard des critères que nous avons retenus (ouverture et micro-granularité ou aspérités des tissus). Une lecture verticale permet de mettre en évidence des signatures morphologiques propres à chaque couple tissu-indicateur ainsi que leurs évolutions au fur et à mesure de la progression vide-plein, les tissus étant rangés par densité croissante.

1.3.1 Lecture horizontale du tableau

Cas 1 : Le château de Rezé Les profils \bar{h} (hmean) et \bar{w} (avgraylen) confirment qu’il s’agit d’un secteur où le vide urbain est prédominant. L’espace moyen entre les bâtiments y est élevé et les hauteurs moyennes de bâtiments inférieures à 20 mètres. Sur ce secteur d’étude, le svf est majoritairement compris entre 60% et 80% et le rapport d’aspect inférieur à 0.4.

Cas 2 : Saint-Sébastien-sur-Loire Les profils morphologiques des indicateurs \bar{h} d’une part, \bar{w} d’autre part confirment que ce tissu est un secteur très diffus composé de masses construites de faible hauteur (< 5 mètres) distribuées sur un territoire où le vide urbain prédomine. Conséquemment, le rapport d’aspect moyen est faible (inférieur à 0.4) et la vue du ciel forte (avec un svf crête à plus de 80%, profil concentré sur les fortes valeurs).

Cas 3 : La Bouvardière Les profils morphologiques des indicateurs \bar{h} et \bar{w} sont ici très similaires à ceux du cas 2. Nous notons toutefois que le profil \bar{w} se resserre autour d’une valeur moyenne de 30 mètres. Conséquemment et comme dans les deux cas précédents, le rapport d’aspect moyen est très faible (inférieur à 0.4) et la vue du ciel forte (avec un svf crête proche de 80%).

Cas 4 : Les Hauts-Pavés Nous remarquons ici, que le profil du svf s’est décalé et recentré autour d’une valeur crête de l’ordre de 40% (soit la moitié de la valeur crête du svf du cas 2). Cette moindre visibilité du ciel s’explique conjointement par une légère augmentation du \bar{h} (qui passe de 5 mètres à

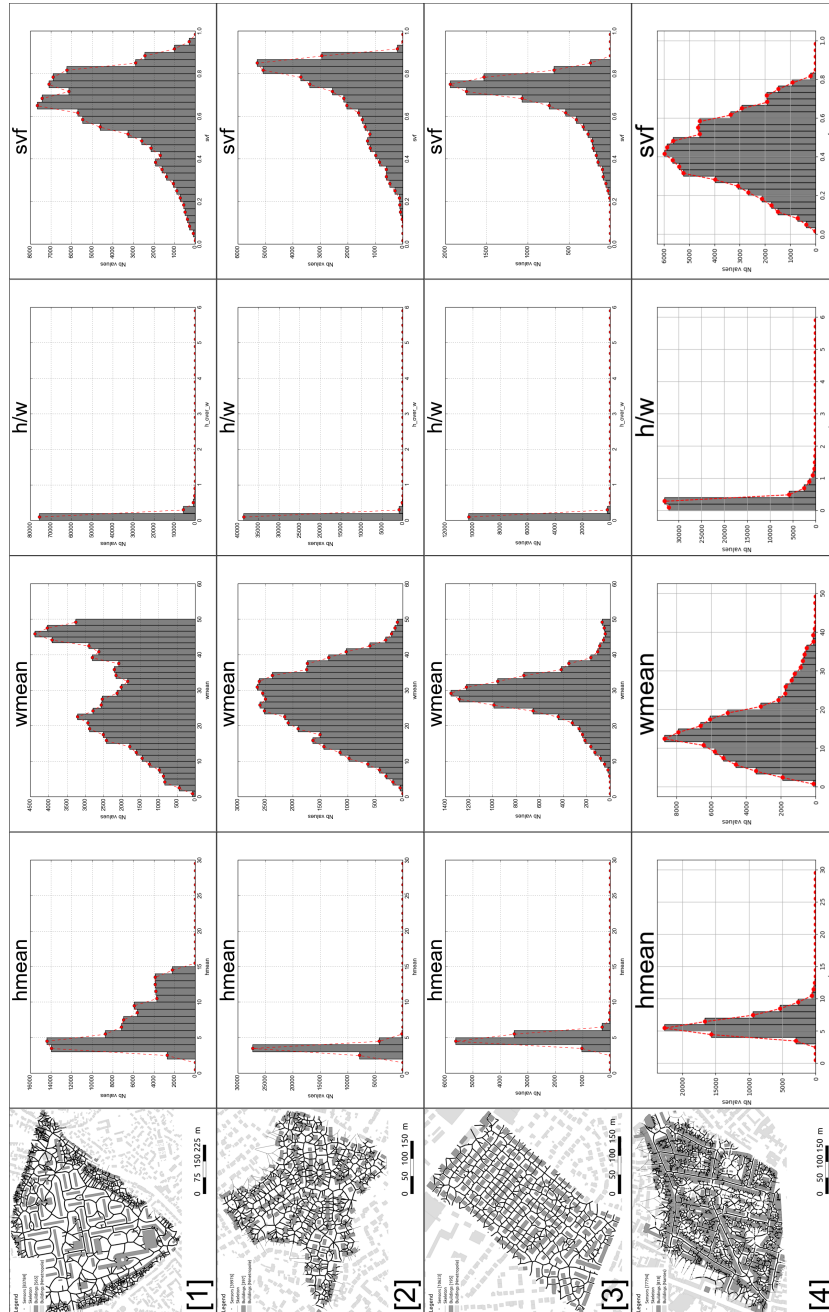


FIGURE 1.2 – Profils par histogrammes de fréquence pour les indicateurs \bar{h} , \bar{w} , h/w et svf . Cas tests 1 à 4.

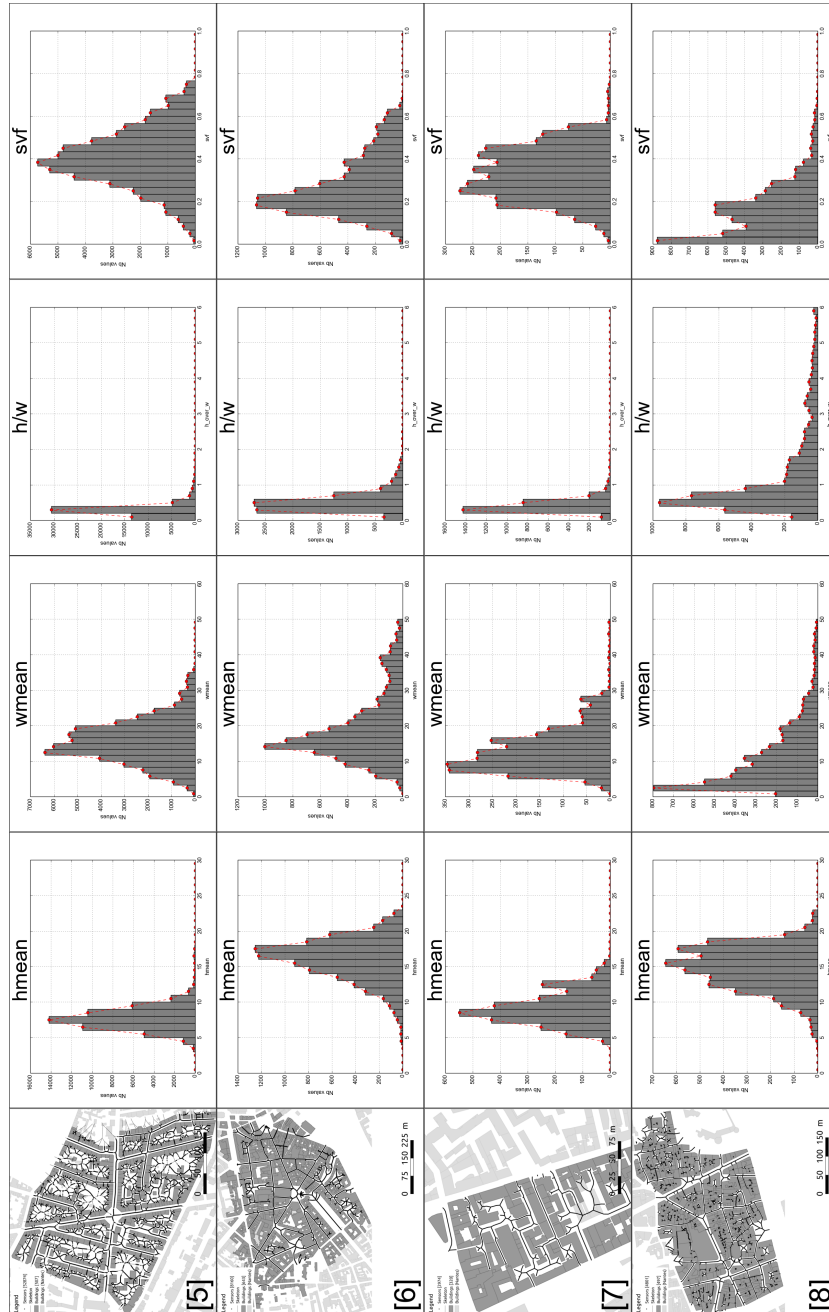


FIGURE 1.3 – Profils par histogrammes de fréquence pour les indicateurs \bar{h} , \bar{w} , h/w et svf . Cas tests 5 à 8.

près de 10) et une diminution du \bar{w} (le profil se recentre autour de valeurs comprises entre 10 et 30 mètres).

Cette évolution des profils du cas 1 au cas 4 met en évidence un « grignotage » du vide urbain. Les empreintes de bâtiments se rapprochent, le pourcentage de masques bâtis augmente. Nous pouvons imaginer que dans une progression qui part de la périphérie (cas 1, 2 ou 3) pour rallier un centre urbain, le cas 4 est intercalaire.

Cas 5 : Dalby Les profils du cas 5 sont quasi identiques à ceux du cas précédent (cas 4). Dans ce secteur, nous constatons que la largeur entre les bâtiments est en moyenne égale au double de leur hauteur.

Cas 6 et 8 : Place Graslin et Bouffay Dans ces deux cas, le décalage du profil du svf vers la gauche confirme la tendance à la fermeture de l'espace (moindre visibilité du ciel depuis les capteurs positionnés dans le vide urbain). Pour le rapport d'aspect, les profils « s'épaississent » là où ils étaient très étroits dans les cas précédents (1, 2, 3, 4 et 5). Pour autant, les profils \bar{w} de ces deux cas sont relativement différents. La distribution de l'indicateur \bar{w} pour le cas du Bouffay met en évidence la présence massive de rues et ruelles de faibles largeurs (autour de 5 mètres).

La progression que nous imaginions précédemment se poursuit. Ces nouveaux profils mettent en évidence que le vide urbain a progressivement disparu au profit du bâti. Dans le cadre de cette progression, il est probable que nous avons rallié un centre urbain compact avec des hauteurs importantes (par rapport au premier cas).

Cas 7 : Hôtel-Dieu Les profils du secteur Hôtel-Dieu sont discordants au sens de la progression que nous avons évoquée. Le profil du \bar{h} et celui du rapport d'aspect ressemblent aux profils d'un secteur « intermédiaire » entre le péri-urbain et l'urbain dense comme le profil du cas 4 ou 5. Celui du \bar{w} ressemble à un profil de largeurs d'un secteur médiéval de centre urbain tel le Bouffay (cf. cas 8). Enfin, le profil du svf est très particulier et massivement regroupé entre 20% et 60%.

1.3.2 Lecture verticale du tableau

La lecture verticale du tableau de résultats met en évidence des dynamiques et regroupements de profils pour chacun des indicateurs. Ces regroupements de profils seront utilisés ultérieurement pour identifier des signatures morphologiques.

Une analyse des divers profils de l'indicateur \bar{h} montre que la hauteur moyenne est un attribut relativement constant, au profil « resserré », dans le péri-urbain (présence de bâtiments de hauteur similaire), alors que, dans le centre urbain dense, elle est clairement moins uniforme.

Les divers profils de l'indicateur \bar{w} mettent en évidence que, dans un gradient qui va du péri-urbain au centre urbain dense, l'espace entre les bâtiments se contracte. La distribution des valeurs montre aussi que la diversité de valeurs qui prévalait dans le péri-urbain, disparaît au profit d'un écartement quasi uniforme.

L'évolution des profils du rapport d'aspect montre que deux dynamiques sont à l'oeuvre lorsque l'on se rapproche du centre urbain dense. Une dilatation du profil s'accompagne d'une légère augmentation de la valeur moyenne (décalage de la « cloche » vers la droite).

L'évolution des profils du svf, enfin, montre un net glissement vers la gauche (d'une valeur moyenne autour de 80% à une valeur moyenne proche de 10%). L'espace se resserre et la vue du ciel diminue lorsque l'on se rapproche du centre urbain.

1.3.3 Discussions et limites

Ambivalence du rapport d'aspect

Les profils du rapport d'aspect et du svf des cas 1 et 2 sont relativement équivalents. Il s'agit de deux secteurs où le vide urbain est équivalement prédominant. Pour autant, les profils \bar{h} et \bar{w} de ces deux cas montrent que ces terrains ont des formes de bâtiments assez différentes. Dans le cas 2, les hauteurs de bâtiments sont à 5 mètres tandis que dans le cas 1 elles culminent à 20 mètres. Nous pouvons raisonnablement en déduire que nous avons affaire à des maisons individuelles dans le deuxième cas et de petits collectifs dans le premier.

De manière assez intuitive, nous en déduisons qu'un même profil de rapport d'aspect (resp. de svf) n'implique pas systématiquement des profils \bar{h} et \bar{w} identiques. Le profil du rapport d'aspect (resp. du svf) ne suffit donc pas à singulariser une forme précise de tissu.

Sensibilité à la taille du réseau de capteurs

Les profils que nous avons présentés correspondent à des « populations de capteurs » de tailles très différentes. Les histogrammes du secteur Hôtel-Dieu (cas 7) représentent les distributions de valeurs de 2974 capteurs tandis que ceux du secteur Le Chateau de Rezé (cas 1) représentent 83784 capteurs, soit

28 fois plus. La question de la sensibilité de ces profils au pas d'échantillonnage en abscisse curviligne du squelette informé est posée, mais elle dépasse le strict cadre de cette thèse.

1.3.4 Signature morphologique

Une relecture du tableau de résultats montre que la combinaison des profils des trois indicateurs (\bar{h} , \bar{w} et svf) définit trois groupes. Le premier, constitué des cas 1, 2 et 3, correspond à un groupe où le vide prédomine. Le second, constitué des cas 4 et 5, correspond à un groupe intermédiaire. Enfin le groupe constitué des cas 6, 7 et 8 est un groupe de tissus où le plein prédomine. Ce dernier groupe de profils nous semble définir une « signature morphologique » de tissu urbain dense, tandis que le premier définit une signature morphologique de tissu urbain plus diffus. Entre ces deux cas extrêmes, nous introduisons une signature morphologique transitoire. La Fig. 1.4 met en évidence les différences entre ces diverses signatures.

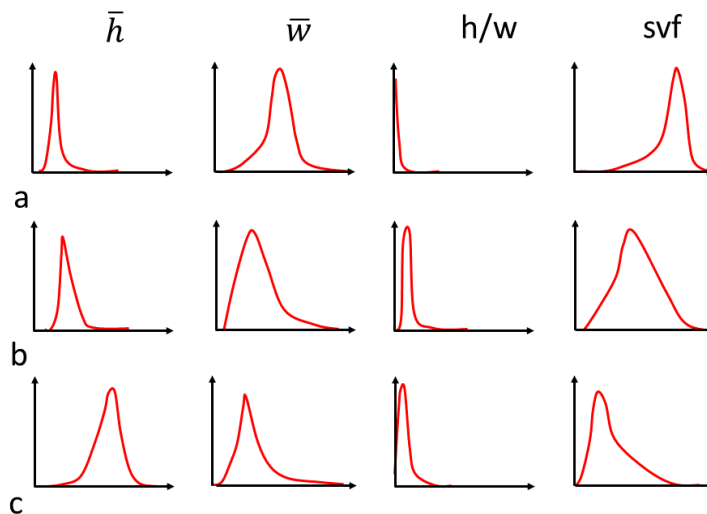


FIGURE 1.4 – Signatures morphologiques théoriques pour a) un tissu urbain diffus, b) un tissu intermédiaire, c) un tissu urbain dense.

Cette proposition de signatures a été réalisée de manière intuitive, par observation des profils, sur un nombre de tissus faible afin de montrer le potentiel de cette approche. Elle mériterait d'être explorée d'une manière plus systématique, en utilisant par exemple des méthodes de nuées dynamiques (BERNABÉ et al. 2013), et sur la base d'un plus grand nombre d'indicateurs.

1.4 Synthèse

Les profils et signatures morphologiques produits dans ce chapitre montrent qu'il est possible d'inférer une information à caractère global à partir de capteurs locaux.

Cette information nous permet aussi de distinguer si un capteur est conforme parce que « dans la tendance générale du tissu » ou, *a contrario*, s'il s'en écarte (auquel cas on peut l'assimiler à une « erreur de mesure »).

Nous ne l'avons pas mis en oeuvre dans le cadre contraint de cette thèse, mais nous pensons que cette information à caractère « zonal » est susceptible de nous aider à analyser les zones d'influence de nos capteurs (cf. notion de *footprint* elliptique) dans le cadre des corrélations forme-vent du chapitre 3 en apportant une information sur la singularité ou la non-singularité d'un site de mesure au sein du tissu dans lequel il se situe.

Chapitre 2

Intérêt du squelette informé pour l'identification des composantes de la forme urbaine

Cette deuxième application résulte d'un constat mis en évidence dans la section 3.3 du chapitre 3. Nous avons développé deux implémentations de l'indicateur ratio d'aspect. La première est a-directionnelle et permet de calculer automatiquement le rapport d'aspect dans le cas de rues canyons. La seconde est panoptique et permet de calculer automatiquement ce rapport d'aspect pour toute autre configuration du fragment urbain étudié. Aussi, pour automatiser le calcul de cet indicateur en tout point ou capteur virtuel de l'espace public il importe préalablement de déterminer automatiquement la nature de l'espace qui l'environne immédiatement (s'agit-il ou non d'un canyon urbain?).

Une autre motivation à cette distinction automatique des canyons urbains (aussi appelés lieux de **canalisation****) des autres fragments de l'espace ouvert (aussi appelés lieux de **collection****) tient à la statistique descriptive et aux diverses corrélations que nous aurons à produire dans la troisième application (cf. chapitre 3). Nous remarquerons ainsi qu'un sous-ensemble d'indicateurs morphologiques des capteurs des lieux de canalisation est plus nettement corrélé avec la vitesse du vent tandis qu'un autre sous-ensemble d'indicateurs morphologiques des capteurs des lieux de collection est plus nettement corrélé avec la turbulence.

Pour l'identification automatique des lieux de canalisation et des lieux de collection, nous continuons à utiliser le squelette informé que nous avons déjà présenté. Nous l'utiliserons pour analyser les variations des indicateurs le long du squelette et ainsi distinguer des allures différentes lors du parcours des branches.

Dans ce chapitre, nous commençons par donner des compléments méthodologiques avant d'identifier quelques cas tests. Nous appliquons ensuite notre méthode pour produire des résultats que nous discutons enfin.

2.1 Complément méthodologique

Pour établir cette classification automatique, quatre indicateurs dynamiques a-directionnels sont utilisés : le rayon de la plus grande boule inscrite (r), la dérivée première de ce rayon dans son évolution le long du squelette urbain (r'), sa dérivée seconde (r'') et la moyenne de la dérivée première ($\overline{r'}$).

Dans ce qui suit, nous expliquons plus en détail l'ensemble du processus.

2.1.1 Détection des espaces de jonction

Nous appelons **espace de jonction****, **espace de transition**** ou **zone d'articulation**** un fragment urbain à l'interface d'un espace de canalisation (comme une rue canyon) et d'un espace de collection (comme une place ou placette). Détecter ces espaces permet de déterminer les frontières de chaque composante dans la trame du vide urbain.

C'est par une approche empirique (observation répétée de cartes figuratives de la distribution r'' sur l'ensemble des capteurs morphologiques) que nous avons remarqué que la dérivée seconde est un indicateur de ces espaces de jonction. En effet, cette dérivée seconde de la fonction qui, à toute abscisse curviligne, associe le rayon de la plus grande boule inscrite centrée au capteur correspondant, est une mesure de l'évolution du taux de variation de r entre deux points successifs du squelette. r'' détermine une accélération de l'ouverture (augmentation forte du rayon) illustrée en Fig. 2.1, ou de la fermeture (diminution accélérée) ou un point d'inflexion.

Chaque perturbation, chaque décrochement du déroulé de façades ou front bâti (comme par exemple au passage d'une rue canyon à une placette) induit une variation durable de la dérivée première r' et consécutivement une fluctuation de la dérivée seconde r'' (qui s'annule en tout autre point). Lorsqu'il existe un seuil ϵ pour lequel $|r''| > \epsilon$, la dérivée seconde met en exergue les limites de chaque type d'espace, elle varie là où un lieu de collection (resp. canalisation) se termine et où un lieu de canalisation (resp. collection) commence.

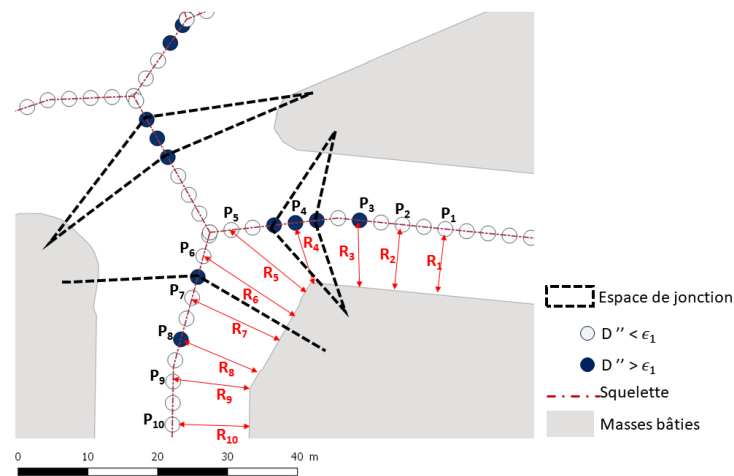


FIGURE 2.1 – Variation de r et de r'' le long d'une rue qui débouche sur une intersection. r'' est non nulle aux points d'inflexion et marque une « accélération » dans l'évolution de r .

2.1.2 Détection des zones de canalisation

Les rues canyons sont oblongues et sont susceptibles d'être à l'origine d'un effet de canalisation (pour un étirement important de la rue) ou d'un effet Venturi (configuration en entonnoir si elle succèdent à un collecteur). Pour cela une étude de la variation de la largeur de la rue ou zone de canalisation est nécessaire.

Comme dans le cas des espaces de jonction, c'est par une approche empirique (observation répétée de cartes figuratives de la distribution r' sur l'ensemble des capteurs morphologiques) que nous avons remarqué que la dérivée première est un indicateur des espaces de canalisation.

Plus précisément, c'est en faisant figurer différemment les points pour lesquels r' est en dessous d'un certain seuil ϵ que nous avons pu distinguer les rues des autres espaces. Les faibles variations ($|r'| < \epsilon$) indiquent que le rayon a de faibles oscillations autour d'une valeur moyenne dominante. Dans ce cas, les capteurs sont localisés dans un milieu relativement stable du point de vue de la mesure de la largeur de l'espace ouvert considéré. Nous détectons alors une zone de canalisation telle qu'une impasse, une allée, une rue, un boulevard, voir Fig. 2.2.

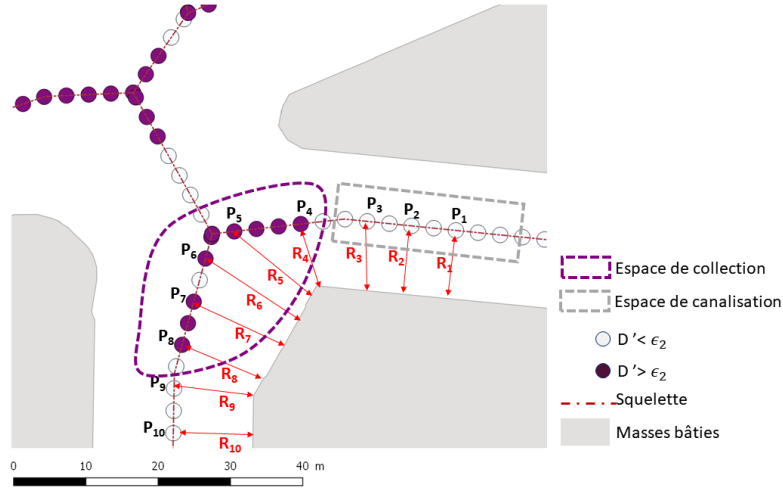


FIGURE 2.2 – Variation de $|r'|$ selon la localisation du capteur, $|r'| < \epsilon$ détection d'une rue

2.1.3 Détection des zones de collection

Nous l'avons vu, une petite valeur de l'indicateur r' ($|r'| < \epsilon$) permet d'identifier les zones de canalisation. La contraposée nous permet d'écrire que lorsque les valeurs de r' sont non nulles ($|r'| > \epsilon$), alors le fragment urbain étudié est une zone de collection (voir Fig. 2.2). Nous avons pu vérifier cette assertion par une démarche empirique (observation de cartes) et constater à cette occasion que la notion de zone de collection est plurielle au sens où elle recouvre des configurations spatiales bien distinctes. Pour distinguer ces diverses sous-catégories (croisement de rues, placette ou place, esplanade), commençons par introduire de nouveaux concepts.

Pré-requis

Soit P un capteur du squelette et r le rayon de la plus grande boule inscrite dans le vide urbain centrée en P . Nous notons $\mathfrak{B}(P, r)^{**}$ cette plus grande boule inscrite.

L'union des plus grandes boules inscrites pour lesquels les capteurs correspondants appartiennent à une zone de collection (i.e. pour lesquels $|r'| > \epsilon$), s'écrit :

$$\bigcup_{|r'| > \epsilon} \mathfrak{B}(P, r) \quad (2.1)$$

Cette union définit un ensemble de zones $(\mathfrak{Z}_i)_{i \in I}$ correspondant chacune, approximativement, à une zone de collection.

Nous appelons **capteur d'articulation**** tout capteur du squelette qui est un noeud (le squelette étant considéré comme un graphe) à l'interface d'au moins trois arcs du squelette.

$\text{Card}_{\mathfrak{Z}_i}^{**}$ est défini comme étant le nombre de capteurs d'articulation appartenant à une même zone \mathfrak{Z}_i donnée (indépendamment de la valeur r' de ces divers capteurs d'articulation).

Distinction en fonction de la valeur de $\text{Card}_{\mathfrak{Z}_i}$

Suite à plusieurs observations de configurations urbaines différentes, nous avons déterminé que le nombre de capteurs d'articulation appartenant à une même zone \mathfrak{Z}_i est un critère prépondérant pour la qualification des diverses variantes d'espace de collection. Nous présentons cette classification dans le tableau 2.1 et l'illustrons par le biais de la Fig. 2.3.

$\text{Card}_{\mathfrak{Z}_i}$	Type de zone de collection
1-3	Carrefour
4	Placette ou place
≥ 5	Esplanade

TABLE 2.1 – Détermination empirique du type d'espace de collection en fonction de l'indicateur $\text{Card}_{\mathfrak{Z}_i}$.

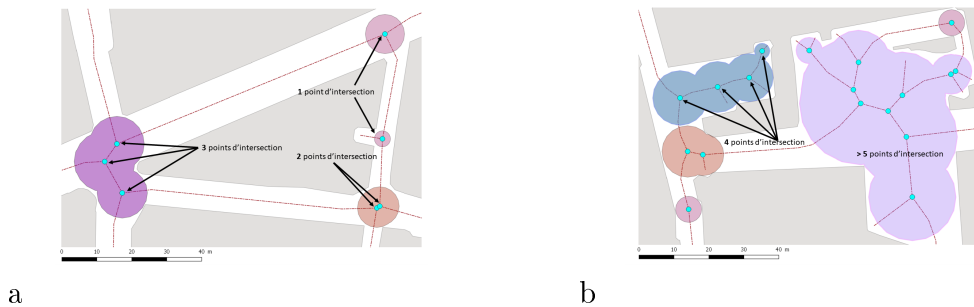


FIGURE 2.3 – Détermination empirique du type d'espace de collection en fonction de l'indicateur $\text{Card}_{\mathfrak{Z}_i}$ (a) de 1 à 3 points d'articulation, carrefour; (b) pour 4 points d'articulation, configuration en place ou placette, pour 5 points d'articulation ou plus, configuration en esplanade.

Distinction en fonction de la valeur de $\overline{r'}$

L'objectif ici est d'identifier les impasses et autres « anfractuosités » du vide urbain, c'est-à-dire les espaces pour lesquels le rayon de la plus grande

boule inscrite converge vers 0 au fur et à mesure de la progression dans la zone d'étude. Cette convergence rapide (sur une courte distance curviligne) de r vers 0 a pour effet d'augmenter significativement, en chaque point, la valeur absolue de sa dérivée r' . Cette augmentation rapide se répercute sur la valeur moyenne $\overline{r'}$ qui est un marqueur de zones en cul-de-sac.

Nos diverses observations semblent confirmer que, lorsque $|\overline{r'}| \gg \epsilon$, la rue est une impasse (zone de collection) alors que, lorsque $|\overline{r'}| < \epsilon$, le tronçon de rue correspondant est assimilable à une zone de canalisation (au sens où il est d'une longueur « suffisante »).

2.2 Cas d'étude

Pour tester la méthode que nous venons de présenter, nous avons identifié trois secteurs différents, situés en France (voir Fig. 2.4), et présentant chacun des particularités morphologiques propres : autour de la place Graslin à Nantes, autour du secteur Hôtel-Dieu à Nantes et au centre du secteur de la Part-Dieu à Lyon.

Les deux secteurs d'étude nantais sont situés au centre ville, entourés de zones densément urbanisées au nord, à l'est et à l'ouest et bordés par un fleuve au sud (la Loire). La direction de vent dominante à l'année dans cette région est de secteur ouest/sud-ouest.

Comme les secteurs nantais, le secteur d'étude à Lyon se situe, lui aussi, au centre ville. Il est bordé d'îlots denses au nord, à l'est et au sud, et longe un fleuve à l'ouest (le Rhône). La direction annuelle des vents dominants sur le territoire lyonnais est celle du couloir rhodanien, orientée nord-sud.



FIGURE 2.4 – Localisation des cas d'étude.

Ces trois cas d'étude sont le résultat de superpositions de plusieurs interventions étagées dans le temps et plus ou moins planifiées. Les formes qui en résultent sont des collections d'îlots où chaque front bâti est constitué de linéaires de bâtiments mitoyens. Pour simplifier la construction de chacun des

squelettes, nous avons décidé de « gommer » les mitoyennetés et de combler les cours intérieures de chacun des îlots afin de limiter le vide urbain aux seules rues et places publiques (comme zones de canalisation et de collection du vent urbain).

Pour reprendre la classification de (BORIE et DENIEUL 1984), nous pouvons considérer que ces trois tissus urbains ont un même système bâti de type linéaire, mais qu'ils ont chacun un système libre (le vide urbain) qui leur est propre.

Pour présenter chacun de ces cas d'étude plus précisément, nous utilisons maintenant la taxonomie des différentes structures urbaines établie par (MARSHALL 2005) en commençant par décrire la trame urbaine, puis la forme des modules unitaires, la forme des jonctions et la distribution de chacune des composantes urbaines.

2.2.1 Secteur de la Part-Dieu à Lyon

Ce secteur correspond à une zone d'étude de 10.4 ha, comportant 243 empreintes de bâtiments distribués dans 15 îlots, voir Fig. 2.5.

Le quartier de la Part-Dieu présente une configuration en grille orthogonale régulière. La prédominance des croisements de rues à angle droit contraint les divers blocs dans des « cellules cubiques ». Pour reprendre la taxonomie systématique élaborée par (MARSHALL 2005), le secteur de la Part-Dieu à Lyon est un modèle cellulaire orthogonal avec une grille rectangulaire, des cellules en X oblongues et une largeur de voies importante. Dans ce modèle *bi-differential gridiron* (pour reprendre l'appellation de MARSHALL (2005)), le vide est réparti d'une manière équitable entre ses diverses composantes (zone de canalisation comme zone de collection).

2.2.2 Place Graslin à Nantes

Ce secteur correspond à une zone d'étude de 25 ha, comportant 495 empreintes de bâtiments distribués dans 54 îlots, voir Fig. 2.6.

Par rapport à la trame urbaine précédente, celle de la place Graslin est plus complexe et plus riche d'un strict point de vue morphologique. Elle présente une combinaison de deux types de motifs de base : un motif radial ramifié à l'échelle macro et un motif rectiligne triangulaire à l'échelle micro. C'est un modèle hybride.

L'axe et les lignes centrales convergent vers la place centrale et établissent le lien avec d'autres places.

Dans ce tissu urbain, nous remarquons la présence d'un espace ouvert plus marqué avec une place au centre et une place à l'ouest. Une mise en

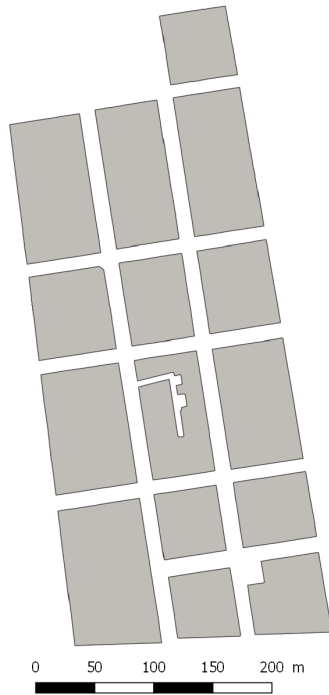


FIGURE 2.5 – Plan masse du secteur de la Part-Dieu à Lyon.

valeur de la continuité des zones de collection et de leur connectivité.

2.2.3 Secteur Hôtel-Dieu à Nantes

Ce secteur correspond à une zone d'étude de 6.1 ha, comportant 160 empreintes de bâtiments distribués dans 15 îlots, voir Fig. 2.7.

Le secteur Hôtel-Dieu à Nantes est le produit de la superposition de deux systèmes d'urbanisation relevant chacun de deux époques bien distinctes dans le temps. Une analyse rapide du plan masse, nous permet d'identifier plusieurs cours aux formes irrégulières, sans motif reconnaissable, avec une abondance d'allées comme d'impasses. Dans ce cas nous ne pouvons pas parler de module unitaire, ni de jonction, puisque ce tissu est, d'un point de vue formel, assez « chaotique ».

2.3 Résultats et discussion

Pour rappel et parce que nous avons délibérément choisi de combler les coeurs d'îlots (pour simplifier notamment la production du squelette de l'espace ouvert), les analyses que nous produisons avec notre outil automatique



FIGURE 2.6 – Plan masse du secteur de la Place Graslin à Nantes

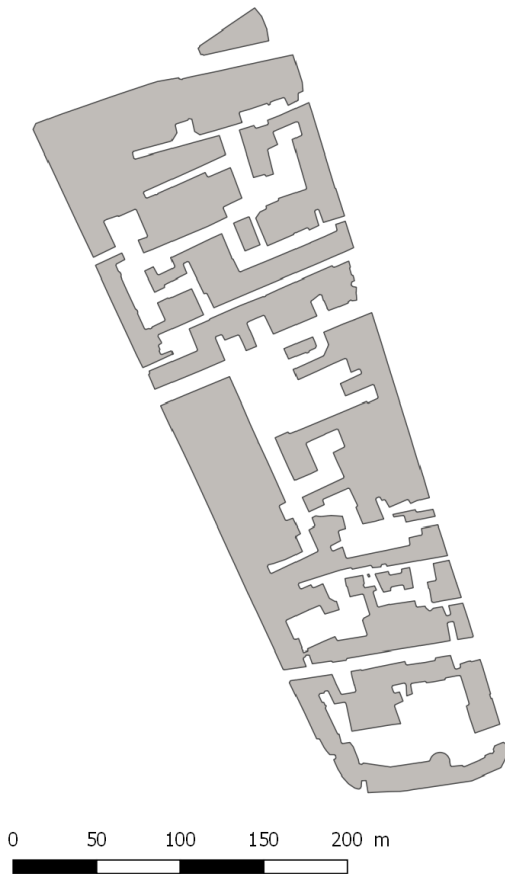


FIGURE 2.7 – Plan masse du secteur Hôtel-Dieu à Nantes

ne nous permettent pas de qualifier les cours intérieures.

Les résultats que nous présentons maintenant sont issus d'une application systématique de la méthode que nous avons développée et d'une observation des cartographies qui en résultent pour chacun des cas d'étude. Une analyse des bénéfices et limites de cette approche suit.

2.3.1 Reconnaissance des espaces de jonction

Les espaces de jonction sont ceux pour lesquels les capteurs vérifient $|r''| > \epsilon$. Les cartographies de la Fig. 2.8 présentent une distribution des valeurs de $|r''|$ sur nos trois terrains d'étude. Elles font ressortir les zones d'articulation du squelette des espaces ouverts, en mettant en évidence la transition entre les zones de canalisation (rues) et les zones de collection (intersections, places, etc.).

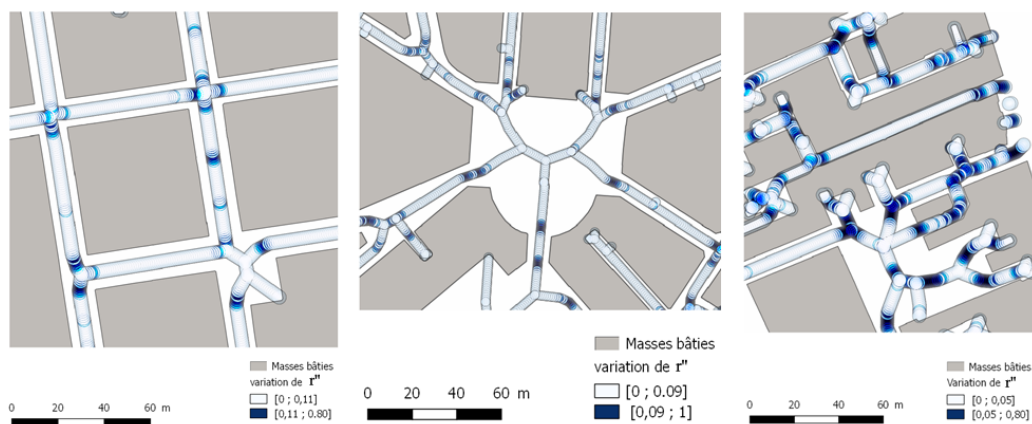


FIGURE 2.8 – Représentation de l'indicateur $|r''|$ sur nos trois terrains d'étude (a) secteur de la Part-Dieu à Lyon, (b) secteur de la Place Graslin à Nantes, (c) secteur Hôtel-Dieu à Nantes.

Dans le cas de la Part-Dieu, nous avons arbitrairement et empiriquement défini la valeur du seuil ϵ à 0.11 (Fig. 2.8.a). Dans le cas de la place Graslin, cette première valeur de seuil n'étant pas assez sensible pour détecter les articulations de cette forme moins régulière, nous avons réduit le seuil ϵ à 0.09 (Fig.2.8.b). Enfin, dans le cas Hôtel-Dieu (Fig. 2.8.c), qui est encore plus complexe, nous avons fixé ϵ à 0.05. L'abaissement de ce seuil nous semble corrélé à une complexité accrue de la forme des espaces ouverts ainsi qu'à une sinuosité croissante de la trame urbaine.

La Fig. 2.9 confirme que l'indicateur r'' est un excellent marqueur de transition quelque soit l'environnement immédiat. Il permet effectivement de

signaler une entrée dans une intersection, comme une entrée dans une rue canyon, ou encore un décrochement dans la rectilinéarité du front bâti.

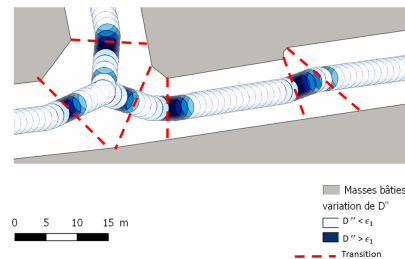


FIGURE 2.9 – Les zones de transition (celles pour lesquelles $|r''| > \epsilon$) mettent en évidence les anfractuosités du front bâti.

Les sections de l'Hôtel-Dieu (Fig.2.8.c) présentent un nombre important d'articulations contrairement à La Part-Dieu (Fig.2.8.a). Nous remarquons aussi que, le long des rues, il y a des capteurs avec une valeur élevée de dérivée seconde en raison des petites courbes, saillies ou décrochements des déroulés de façades des îlots urbains étudiés.

2.3.2 Séparation des zones de canalisation et des zones de collection

Comme nous l'avons précisé dans la section 2.1.2, $|r'| < \epsilon$ (comme dérivée première du rayon de la plus grande boule inscrite en chacun des points de captation) est un marqueur de zone de canalisation. D'une manière similaire et en application de la section 2.1.3, $|r'| > \epsilon$ est un marqueur de zone de collection. D'après nos premières observations sur chacun de ces trois cas, il n'existe pas de valeur seuil ϵ universelle. Cette valeur est étroitement liée à la configuration géométrique propre à chacune des zones.

Pour le cas de la Part-Dieu, l'observation de la Fig. 2.10.a nous a conduit à fixer la valeur du seuil ϵ à 0.5. Ainsi, lorsque $|r'| < 0.5$, le capteur correspondant est placé dans une zone de canalisation et, lorsque $|r'| > 0.5$, le capteur correspondant est placé dans une zone de collection. Dans cette même figure, les canyons ou zones de canalisation sont représentées par des collections de *buffer* circulaires de couleur blanche, tandis que les places ou intersections (zones de collection) sont représentées par des *buffer* circulaires de couleur foncée.

Pour le secteur de la Place Graslin de la Fig. 2.10.b, cette valeur de seuil de 0.5 ne fonctionne pas, la configuration urbaine étant plus diversifiée

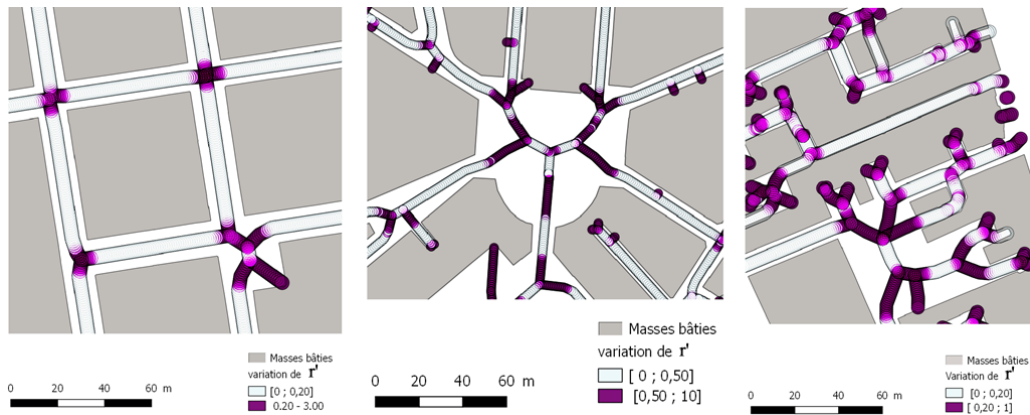


FIGURE 2.10 – Distribution de la dérivée r' dans le vide urbain pour les trois cas d'étude. Ce que nous présentons ici sont des fragments de chacun des cas afin d'avoir une vue détaillée sur l'évolution de la dérivée première le long du squelette informé (a) secteur la Part-Dieu, (b) secteur de la Place Graslin, (c) secteur Hôtel-Dieu.

(au sens où les composantes du fragment urbain étudié sont de formes plus diverses). Dans cette configuration urbaine, et pour identifier les diverses zones de collection, nous abaissons empiriquement la valeur du seuil ϵ à 0.2.

Enfin, pour le secteur Hôtel-Dieu de la Fig. 2.10.c, nous fixons cette valeur de seuil à 0.05. Il apparaît clairement que l'absence de trame urbaine complique l'identification automatique des composantes par cette méthode.

Cela montre aussi que, dans le cas Hôtel-Dieu, il y a une franche instabilité de la distance du squelette aux façades de bâtiments qui le jouxtent.

2.3.3 Qualification des zones de collection

Pour analyser plus en détail les zones de collection, nous utilisons d'une part la classification basée sur la valeur de l'indicateur Card_{3_i} comme présenté dans le tableau 2.1 et d'autre part la classification basée sur la valeur de l'indicateur $\overline{r'}$.

La Fig. 2.11 montre le résultat de la qualification des zones d'intersection. Chaque couleur correspond à un nombre de capteurs d'articulation comme indiqué dans le tableau 2.1. Les segments jaunes sont ceux pour lesquels l'indicateur $\overline{r'}$ n'est pas nul. Ils correspondent clairement aux impasses et autres anfractuosités.

En comparant les trois cas d'étude, nous constatons que les *buffers* à quatre ou cinq points d'intersection sont plus nombreux dans le secteur Hôtel-Dieu que dans celui de la Place Graslin et quasiment absents du secteur de

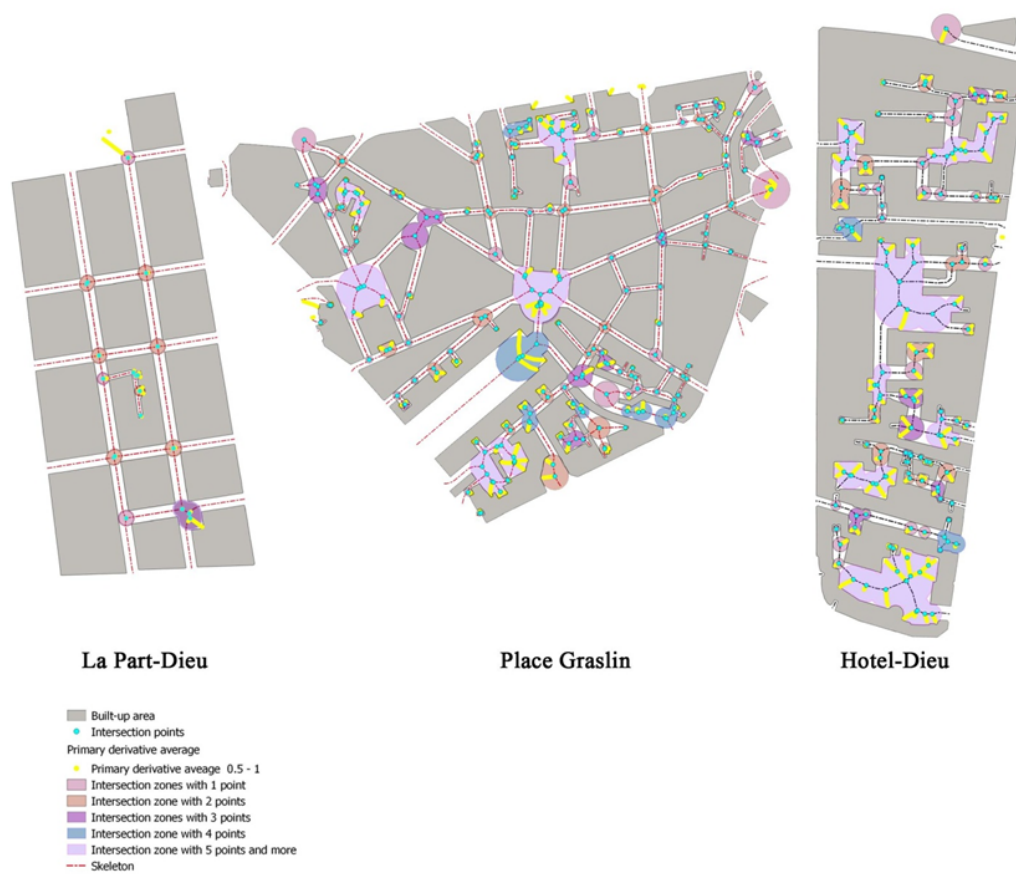


FIGURE 2.11 – Classification des zones de collection telles que détectées par la méthode basée sur la valeur de l'indicateur Card_{3_i} et la valeur de l'indicateur $\overline{r^i}$.

la Part-Dieu.

2.3.4 Principales limites identifiées

Détermination empirique arbitraire des valeurs de seuil ϵ

Qu'il s'agisse d'identifier les espaces de transition (ceux pour lesquels $|r''| > \epsilon$), mais aussi les espaces de canalisation ($|r'| < \epsilon$) ou de collection ($|r'| > \epsilon$), voire les impasses et autres anfractuosités ($|\overline{r'}| \gg \epsilon$), la détermination des valeurs de seuils est prépondérante. Nous l'avons vu, les valeurs de ces seuils diffèrent selon la morphologie du terrain d'étude que l'on cherche à qualifier. Même si nous ne sommes pas, à ce stade, en mesure de le prouver formellement, nous avons l'intuition que la valeur de seuil est, pour chaque terrain, fonction d'un ensemble de caractéristiques propre au fragment urbain et traduisant son « rythme », sa fragmentation, les distributions et fréquences de ses anfractuosités, etc.

Détection et qualification inappropriée de certaines esplanades

Dans le cas d'espaces ouverts de grande amplitude (tels que des esplanades, grandes places oblongues par exemple), nous avons constaté que le processus de détection automatique les identifie comme des lieux de canalisation et non comme des lieux de collection. Il semble que ces lieux conjointement rectilignes et fortement étirés soient assimilés à des grands boulevards pour lesquels la dérivée première du rayon de la plus grande boule inscrite s'annule (Fig. 2.12). Abaisser la valeur du seuil ϵ dans l'équation $|r'| > \epsilon$ pour les détecter non comme des lieux de canalisation mais comme des lieux de collection nous expose à transformer l'ensemble des canyons en lieux de collection.

Un processus inadapté aux tissus péri-urbains

Dans le cas d'un tissu péri-urbain avec un système bâti pavillonnaire, les continuités ou linéarités du front bâti disparaissent et le vide interstitiel prédomine. Cette prédominance du vide conduit à rapprocher les capteurs d'articulation et, *de facto*, à faire disparaître la plupart des espaces de canalisation au profit des espaces de collection (cf. Fig 2.13). La méthode visant à distinguer les zones de canalisation des zones de collection via $|r'| < \epsilon$ est donc clairement inadaptée au péri-urbain.

Dans le cas d'un centre urbain dense tel ceux que nous avons traités, le vide urbain est essentiellement constitué d'espace public bordé de fronts bâtis (pour rappel, un préalable à l'élaboration du squelette informé nous a conduit

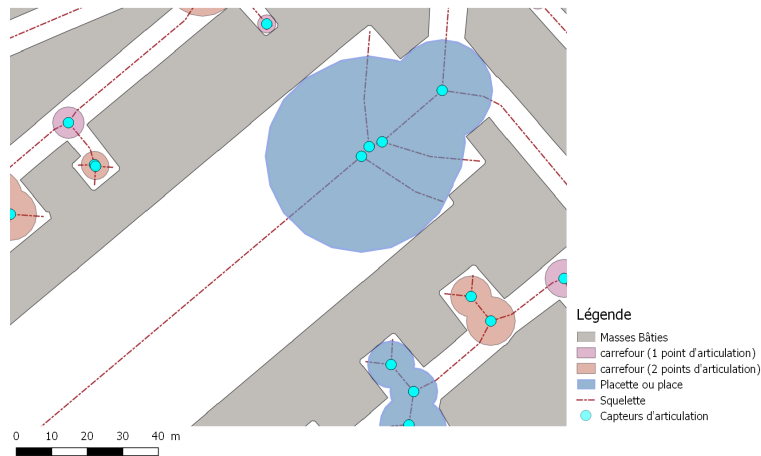


FIGURE 2.12 – Limite de la détection automatique des zones de collection via $|r'| > \epsilon$.

à combler les coeurs d'îlots). Dans le cas du péri-urbain, le vide urbain est une juxtaposition d'espace public et d'espace privé. La canalisation qui, dans l'urbain dense, est bien marquée et par là même facilement identifiable, a des contours plus flous dans l'urbain diffus.

2.4 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons montré que l'on peut distinguer les zones de jonction, des zones de collection, des zones de canalisation et identifier les impasses et autres anfractuosités de l'espace ouvert urbain à l'aide de quatre indicateurs dynamiques a-directionnels. La dérivée seconde r'' du rayon de la plus grande boule inscrite r permet d'identifier les zones de jonction. La dérivée première r' permet de séparer les zones de canalisation ($|r'| < \epsilon$) des zones de collection ($|r'| > \epsilon$). Enfin, la moyenne de cette dérivée première \bar{r}' permet d'identifier les impasses et autres anfractuosités de l'espace ouvert urbain ($\bar{r}' \gg \epsilon$).

Si cette approche est simple à mettre en oeuvre et globalement convaincante, trois limites subsistent cependant. La première de ces limites a trait à la détermination experte des seuils ϵ qui varient selon la nature de la composante urbaine à identifier et la morphologie du tissu étudié. La seconde limite est relative à la détection inappropriée – au sens d'une stricte lecture urbaine des formes – des esplanades comme zone de canalisation et non de collec-

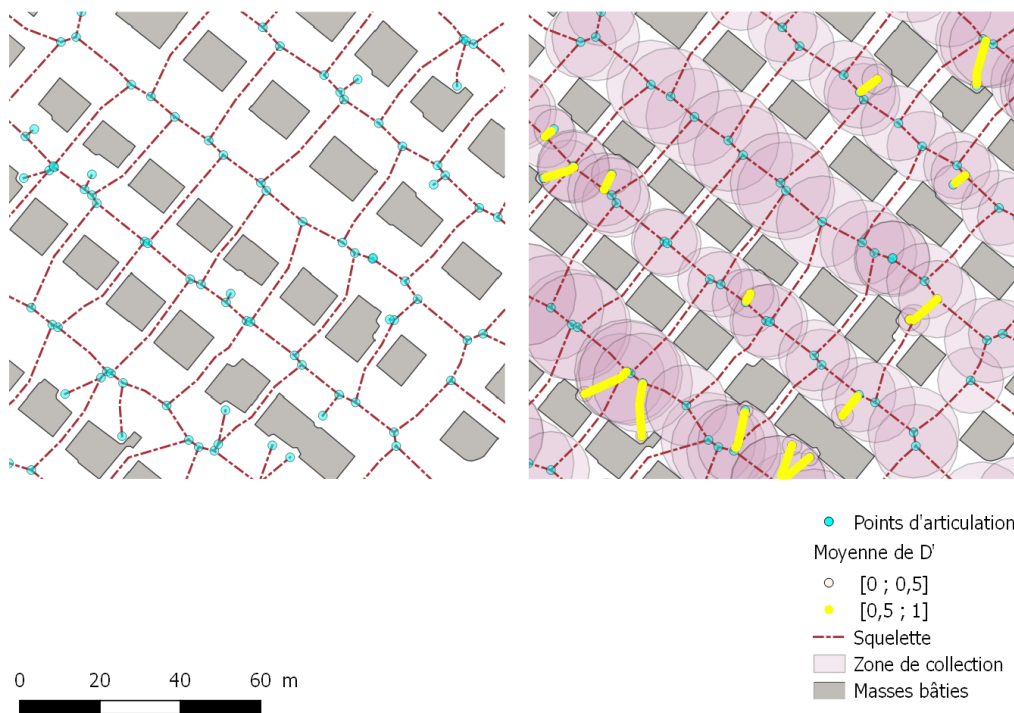


FIGURE 2.13 – Dans le péri-urbain, le squelette informé met en évidence la prédominance des zones de collection. Les zones de canalisation disparaissent, les capteurs d'articulation étant très proches.

tion¹. La troisième et dernière limite est liée à l'inadaptation de l'approche par squelette informé dans le cas de tissu urbain diffus².

La Fig. 2.14 est une illustration du pouvoir de synthèse du squelette informé. Malgré l'enchaînement de réductions dimensionnelles successives opérées lors de sa création, nous pouvons constater que, en l'absence des empreintes de bâtiments, il reste néanmoins possible de « lire » l'espace urbain.

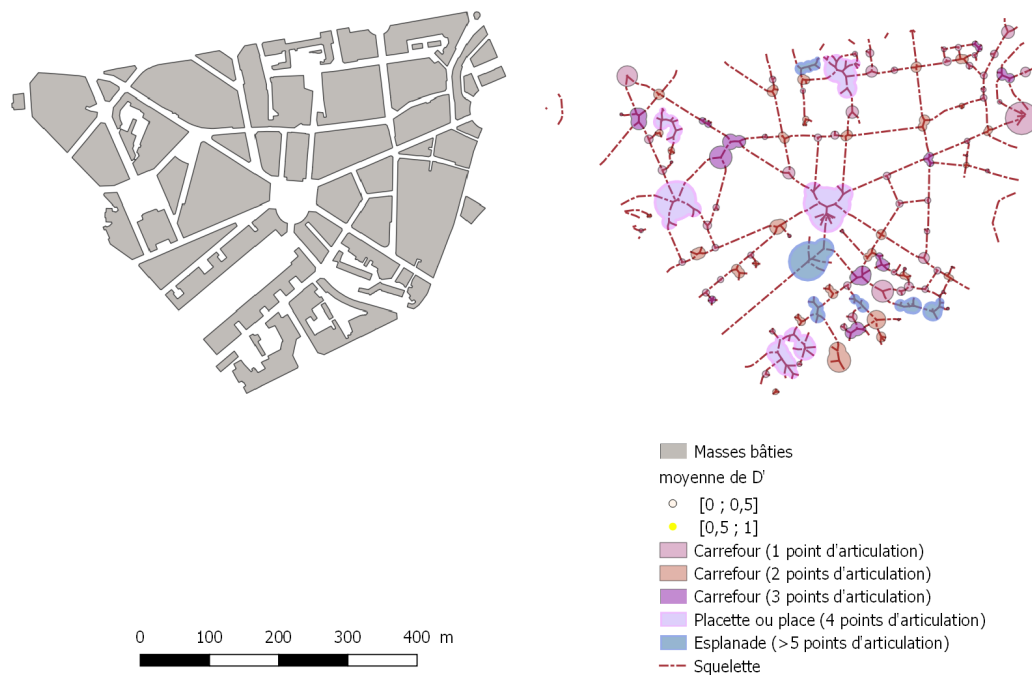


FIGURE 2.14 – Illustration du pouvoir de synthèse du squelette informé. En l'absence des empreintes de bâtiments, l'espace urbain reste « lisible ».

1. Il pourrait ici être intéressant de creuser la question du rapport de forme entre rue canyon et esplanade.

2. Cette troisième et dernière limite doit être nuancée dans la mesure où le squelette nous informe quand même de l'absence de canalisation et de la présence quasi exclusive de collections.

Chapitre 3

Utilisation du squelette informé pour établir des corrélations forme-vent

Les deux chapitres précédents nous ont permis d'analyser la forme de la ville au prisme du vent qui y circule. Dans le premier de ces deux chapitres, nous avons introduit la notion de signature morphologique et mis en évidence, à l'aide du squelette informé, des continuités dans la relation vide-plein, lors d'une progression allant de l'urbain diffus au centre urbain dense. Dans le second chapitre, nous avons utilisé le squelette informé pour identifier des composantes urbaines à un niveau d'échelle très local. Cette troisième et dernière application du squelette informé vise à établir des corrélations forme-vent.

3.1 Une hypothèse de directionnalité

Les deux premières applications ont exploité, pour la première, des indicateurs statiques à caractère a-directionnel ou panoptique, et, pour la seconde, des indicateurs dynamiques ou statiques a-directionnels. Dans ces deux cas, qu'il s'agisse de produire une signature morphologique ou d'identifier une composante urbaine, nous avons enrichi le squelette informé d'attributs « intrinsèques », c'est-à-dire propres au tissu étudié et indépendants de toute direction dominante.

Concernant le traitement du vent en ville, nous avons émis l'hypothèse qu'un seul traitement a-directionnel ou panoptique n'est pas suffisant. Lorsque le vent tourne, les effets dominants changent. Il nous semble intuitivement qu'une bonne analyse de la forme ne peut faire l'impasse sur les effets di-

rectionnels. C'est ce que nous avons essayé de traduire en définissant un ensemble d'indicateurs morphologiques directionnels.

3.2 Un phénomène complexe avec une multiplicité de paramètres

Contrairement aux deux premières applications, celle présentée ici n'est pas purement morphologique puisqu'elle vise à mettre en correspondance la forme et le vent. Nous avons ainsi deux types d'informations à collecter, traiter et représenter : des informations à caractère morphologique d'une part et des informations à caractère aéraulique d'autre part. Les premières ont un paramétrage qui leur est propre et qui est fonction d'un certain nombre de données d'entrée que nous expliciterons dans la section suivante. De la même manière les informations à caractère aéraulique ont leur propre paramétrage et leurs spécificités que nous présenterons ultérieurement. La directionnalité que nous avons évoquée plus tôt compliquera le traitement d'ensemble puisqu'elle imposera de corrélérer les informations morphologiques et aérauliques pour un ensemble de directions données.

3.3 Compléments méthodologiques

Dans cette section, nous ferons trois types de compléments. Les premiers traitent des choix faits pour le paramétrage préliminaire au calcul des indicateurs morphologiques. Les seconds compléments concernent la mise en place de l'analyse des corrélations, autrement dit la construction de la matrice de corrélation.

3.3.1 Paramétrage du « moteur » morphologique

Comme nous tenterons par la suite des corrélations entre facteurs morphologiques et aérauliques, il est important de se poser la question des paramètres propres à notre méthode qui pourront avoir une influence sur l'établissement de ces corrélations. Trois facteurs régissent le calcul des indicateurs morphologiques : la valeur du pas utilisée pour l'échantillonnage curviligne, le nombre de rayons (ou pas de l'abscisse angulaire) et la longueur du rayon du *buffer* circulaire (ou longueur de rayon de l'isovist). Dans le cas des indicateurs directionnels, un quatrième paramètre s'ajoute qui a trait à l'angle d'ouverture.

Pas d'échantillonnage de l'abscisse curviligne

La zone source (zone sur laquelle les informations sont collectées pour le calcul de l'indicateur) du capteur est fonction de sa position. A proximité d'obstacles (un coin de bâtiment dans une intersection, par exemple), l'isovist généré depuis la position à partir de laquelle il est calculé peut évoluer très brutalement, tout comme les valeurs des indicateurs morphologiques associés. La position du capteur est donc un élément prépondérant dans la captation des ressources de l'environnement immédiat. Dans notre cas, le capteur est positionné sur le squelette échantillonné et l'augmentation ou la diminution de la distance curviligne qui sépare les points influe sur l'information transmise par le capteur de forme.

Diminuer ce pas d'échantillonnage curviligne sur une même composante (tronçon de rue ou zone d'intersection) augmente la précision et permet une captation plus fine de l'information locale. Mais diminuer ce pas engendre aussi une possible redondance de l'information sur une même zone et une augmentation importante de la quantité de calcul. Pour trouver une valeur de pas limitant cette redondance tout en garantissant une captation suffisamment fine, nous avons estimé qu'il faut un capteur au moins dans chaque intersection et chaque tronçon de rue. Soit r le plus petit des rayons des plus grandes boules inscrites associées à l'ensemble des capteurs de la zone d'étude, et soit l la plus petite des longueurs de tronçons de rues, pour satisfaire la condition de couverture énoncée précédemment, il faut alors que le pas d'échantillonnage soit égal à $\min\left(r, \frac{l}{2}\right)$ comme illustré en Fig. 3.1.

Dans la pratique, pour maximiser cette distance et diviser substantiellement le nombre de capteurs, nous avons imposé systématiquement un capteur en chaque noeud – intersection – du squelette et fixé la valeur du pas d'échantillonnage à $\frac{l}{2}$.

Pas d'échantillonnage de l'abscisse angulaire

Le pas d'échantillonnage de l'abscisse angulaire pour le calcul des indicateurs panoptiques ou directionnels permet de déterminer le nombre de rayons à lancer pour générer l'isovist (cf. l'isovist en partie droite de la Fig. 3.3). Ce nombre est important dans la mesure où il conditionne fortement le temps de calcul d'une part et le nombre d'empreintes de bâtiments interceptées d'autre part. A partir d'une analyse de sensibilité, (RODLER et LEDUC 2019) proposent de fixer ce nombre de rayons à 64. Nous avons repris cette valeur telle quelle.

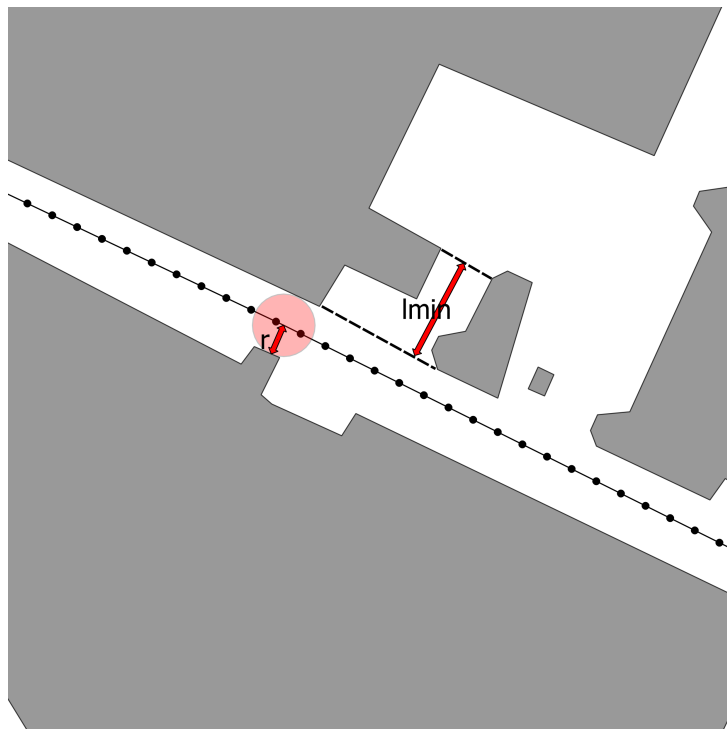


FIGURE 3.1 – Le pas d'échantillonnage des capteurs est égal à $\min\left(r, \frac{l}{2}\right)$.

Étendue de la zone source ou longueur du rayon

La portée ou longueur du rayon est un paramètre déterminant pour l'établissement du *buffer* circulaire comme pour la génération de l'isovist. Comme nous cherchons à corréliser forme du tissu et vent, il faut dimensionner cette grandeur en fonction d'une distance à partir de laquelle nous supposons que la forme détaillée du tissu urbain a moins d'influence sur ce qui est mesuré en un point précis. Cette distance dépendrait donc de la morphologie de chaque cas test. Si l'on part du principe que, pour tout capteur placé au centre d'une intersection, il importe de définir une zone source ralliant l'ensemble des autres intersections (afin de pouvoir « accéder » à l'ensemble des « entrants aérauliques » de la zone et d'inclure les îlots entourant l'intersection), alors il apparaît que cette longueur est liée aux dimensions de l'ensemble des îlots voisins du point. Parce que nous arrêtons que la zone source doit couvrir la totalité des côtés de chaque îlot, nous fixons la portée du rayon à la valeur l_{\max} de la plus grande des longueurs des tronçons de rues de l'échantillon urbain étudié (Fig. 3.2).

Angle d'ouverture β (dans le cas directionnel)

Nous n'avons pas, dans le cadre de ce travail de thèse, réalisé d'étude de sensibilité des indicateurs directionnels aux valeurs de ce paramètre β . Pour définir l'angle d'ouverture dans lequel nous calculerons les informations directionnelles, il nous a semblé pertinent d'opter pour un angle de 45° , intermédiaire entre une fermeture complète (ouverture d'angle nulle) et une ouverture complète (ouverture d'angle à 90°), cf. l'isovist partiel orienté au sud-ouest sur la Fig. 3.3.

3.3.2 Construction de la matrice de corrélation

Deux tables attributaires en données d'entrée

A cette étape du processus, nous disposons de deux données d'entrée importées dans le contexte du SIG QGIS, ou plus précisément de deux couches de N tuples¹ pour reprendre un concept de la géomatique. N étant le nombre de capteurs.

La première des deux couches, de nom SK, correspond aux informations morphologiques. Cette couche est un ensemble de N tuples sk_i où chaque sk_i est un enregistrement de 237 attributs morphologiques. Ces 237 attributs se répartissent en 25 « groupes » d'attributs directionnels calculés selon 9

1. Dans le cas d'application parisien que nous présentons par la suite, N=900.

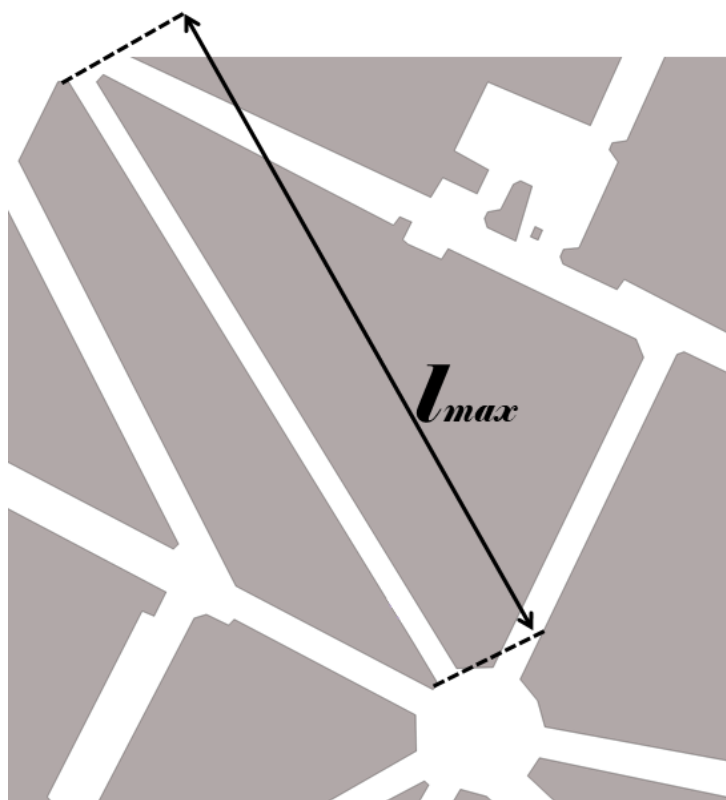


FIGURE 3.2 – L'étendue de la zone source est fixée à la plus grande des longueurs des tronçons de rues de la zone d'étude.

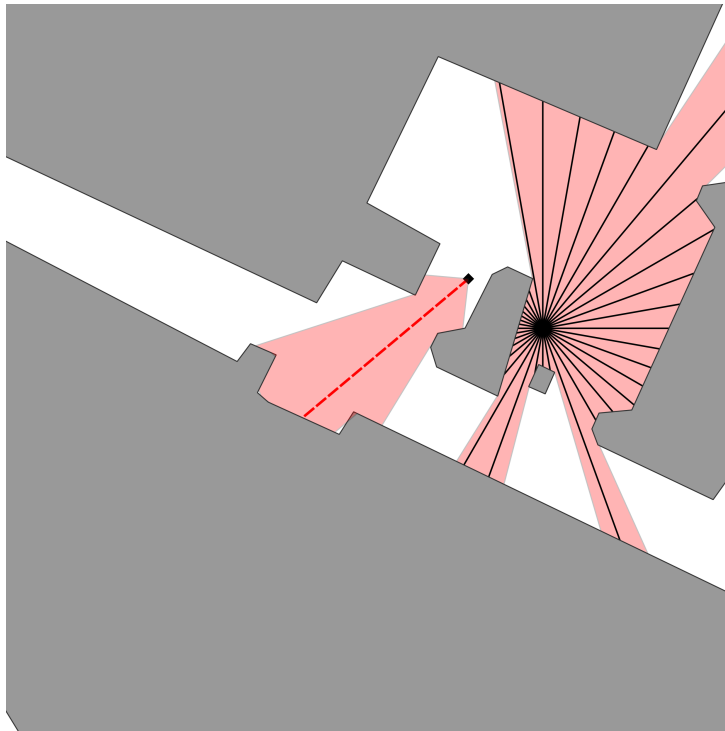


FIGURE 3.3 – Choix du pas d'échantillonnage angulaire ou nombre de rayons lancés pour la détermination de l'isovist (à droite) et choix de l'angle d'ouverture β dans le cas directionnel (à gauche).

directions² et 12 autres attributs (qui peuvent être a-directionnels ou panoptiques).

La deuxième des deux couches, de nom CFD, correspond aux informations issues des capteurs aérauliques autour des plus proches sk_i . Cette couche est un ensemble de N tuples cf_d_i où chaque cf_d_i est un enregistrement comprenant 36 attributs aérauliques complétés de l'identifiant du sk_i le plus proche. Pour rappel, ces 36 attributs correspondent, pour chaque groupement de capteurs aérauliques, à la moyenne \bar{v}_α et à l'écart-type σ_{v_α} des normes euclidiennes du vecteur vitesse de vent $\|\vec{v}_\alpha\|$ et à la moyenne \bar{k}_α et à l'écart-type σ_{k_α} de l'énergie cinétique k_α pour chacune des 9 directions dominantes α retenues.

Comme nous pouvons le remarquer, dans une conception de type base de données relationnelle, il existe déjà une jointure entre ces deux tables SK et CFD par le biais de la « clef étrangère » sk_i stockée dans chaque tuple cf_d_i .

Matrice de corrélation

L'objectif de cette section est de présenter le processus qui, à partir des deux couches de données SK et CFD, construit la matrice \mathfrak{M} . Cette matrice finale comporte $9 \times N$ tuples de 37 attributs morphologiques complétés de 4 attributs aérauliques, soient 41 attributs. Dans cette table, les attributs morphologiques sont, pour 25 d'entre-eux, directionnels et pour les 12 restants a-directionnels ou panoptiques. Quant aux attributs aérauliques, il s'agit des suivants : \bar{v} , σ_v , \bar{k} et σ_k . Nous recherchons des corrélations entre attributs morphologiques et attributs aérauliques.

Comme nous pouvons le remarquer, \mathfrak{M} ne comporte plus, en termes d'attributs directionnels, que de données « génériques » au sens où elles sont indépendantes d'une valeur de direction principale donnée (ce qui revient quasiment à diviser le nombre de colonnes par 9, puisque, par exemple, les divers attributs $phmean_\alpha$ sont fusionnés en un unique $phmean$). En revanche, elle comporte 9 fois plus de tuples. Chaque sk_i a été répliqué 9 fois (soit autant de fois qu'il y a de directions principales de vent).

La matrice \mathfrak{M} est présentée en Fig. 3.4. Son processus de construction consiste, pour chacun des N tuples sk_i à :

- répliquer le tuple 9 fois (soit autant de fois qu'il y a de directions principales α dans l'ensemble $\{ 0^\circ, 40^\circ, 80^\circ, 120^\circ, 160^\circ, 200^\circ, 240^\circ, 280^\circ, 320^\circ \}$),
- conserver l'ensemble des attributs morphologiques a-directionnels et panoptiques,

2. α prend ses valeurs dans l'ensemble $\{ 0^\circ, 40^\circ, 80^\circ, 120^\circ, 160^\circ, 200^\circ, 240^\circ, 280^\circ, 320^\circ \}$.

- pour chacune des 9 valeurs de directions principales α :
 - récupérer les attributs $\bar{v}_\alpha, \sigma_{v_\alpha}, \bar{k}_\alpha$ et σ_{k_α} du tuple cfd_i et les stocker dans les attributs correspondants $\bar{v}, \sigma_v, \bar{k}$ et σ_k de la matrice \mathfrak{M} ,
 - récupérer l'ensemble des attributs morphologiques directionnels associés à la direction principale α et les stocker dans des attributs de \mathfrak{M} indépendants de toute notion de direction.

$$\begin{array}{c}
 \alpha_1 \\
 \vdots \\
 \alpha_9
 \end{array}
 \left(
 \begin{array}{ccccccc}
 \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ n \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} r_1 h w_1 \\ \vdots \\ r_n h w_n \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \dots p a n_1 \dots \\ \ddots \\ \dots p a n_n \dots \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \dots * w d_1 \dots \\ \ddots \\ \dots * w d_n \dots \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} b i s s p_1 \\ \vdots \\ b i s s p_n \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \dots d y n_1 \dots \\ \ddots \\ \dots d y n_n \dots \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \dots \sigma_{k_1} \\ \ddots \\ \bar{v}_n \dots \sigma_{k_n} \end{bmatrix} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ n \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} r_1 h w_1 \\ \vdots \\ r_n h w_n \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \dots p a n_1 \dots \\ \ddots \\ \dots p a n_n \dots \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \dots * w d_1 \dots \\ \ddots \\ \dots * w d_n \dots \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} b i s s p_1 \\ \vdots \\ b i s s p_n \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \dots d y n_1 \dots \\ \ddots \\ \dots d y n_n \dots \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \dots \sigma_{k_1} \\ \ddots \\ \bar{v}_n \dots \sigma_{k_n} \end{bmatrix}
 \end{array}
 \right)$$

FIGURE 3.4 – Composition de la matrice de corrélation \mathfrak{M} .

3.3.3 Paramétrage et traitement statistique

La matrice \mathfrak{M} comporte $9 \times N$ lignes et 41 colonnes. Ces colonnes sont constituées de 37 variables explicatives (les attributs morphologiques) et 4 variables « expliquées » (attributs aérauliques). Parce que nous cherchons à établir une relation linéaire entre chacune des variables expliquées (aérauliques) et une ou plusieurs variables explicatives (morphologiques), nous allons utiliser une approche par régression linéaire.

Un regroupement par zone de canalisation vs. zone de collection

Dans un premier temps, nous avons traité indifféremment l'ensemble des capteurs (ou lignes) de la matrice \mathfrak{M} pour l'établissement des corrélations. Nous avons ensuite fait l'hypothèse que la corrélation des variables « expliquées » (aérauliques) avec les variables explicatives (morphologiques) serait meilleure en analysant séparément les capteurs par zone de canalisation d'une part et par zone de collection d'autre part. Nous avons donc construit, sur le même modèle, deux autres matrices à partir de \mathfrak{M} : $\mathfrak{M}_{\text{canalisation}}$ et $\mathfrak{M}_{\text{collection}}$. Les résultats que nous présentons dans la suite de ce chapitre rendent compte de cette triple approche.

Choix de l'algorithme

Diverses méthodes (Pearson, Kendall, Spearman) existent pour le calcul de corrélations avec l'outil logiciel R. Faute d'idée préconçue sur le choix de l'algorithme et après discussion avec M. Gilles Hunault (Université d'Angers), nous avons opté pour la méthode de Pearson qui est aussi celle qui est proposée par défaut (fonction `cor`) dans le logiciel.

Filtrage des indicateurs morphologiques pertinents par régression linéaire univariée

L'ensemble des variables explicatives (morphologiques) est de grande taille. Pour le décimer, nous cherchons à identifier le sous-ensemble de variables explicatives qui satisfasse un niveau de corrélation suffisant. En l'occurrence, nous décidons arbitrairement de supprimer les variables morphologiques pour lesquelles aucun des coefficients de corrélation avec les quatre variables expliquées n'excède le seuil de 30%.

Pour compléter cette sélection des meilleures variables explicatives, nous avons aussi utilisé les seuils de significativité des corrélations (qui reposent sur le principe de l'hypothèse), c'est-à-dire en l'occurrence que nous avons sélectionné les variables explicatives pour lesquelles le test $p\text{-val} < 0.05$ est vrai.

3.4 Cas d'étude - secteur de la Place de Mexico à Paris

Le terrain d'étude que nous avons choisi est implanté à Paris (France), dans un secteur de 32 ha, au nord-ouest du Trocadéro. Ce secteur de centre urbain comprend 613 empreintes de bâtiments (cf. Fig. 3.5), ceinturées à l'est par l'avenue Raymond Poincaré, au sud par les avenues Georges Mandel et Henri Martin et à l'ouest par le square Lamartine et l'avenue Victor Hugo.

3.4.1 Préparation de la maquette

Pour que le CSTB puisse réaliser des simulations de mécanique des fluides numériques (CFD), nous avons préparé une maquette simplifiée de la zone en regroupant les 613 empreintes de bâtiments (cf. Fig. 3.6a) en 24 empreintes de blocs (cf. Fig. 3.6b), en supprimant les cours intérieures et en lissant les divers fronts bâtis (simplification via la fonction `qgis:simplifygeometries`, complétée d'une intervention manuelle).

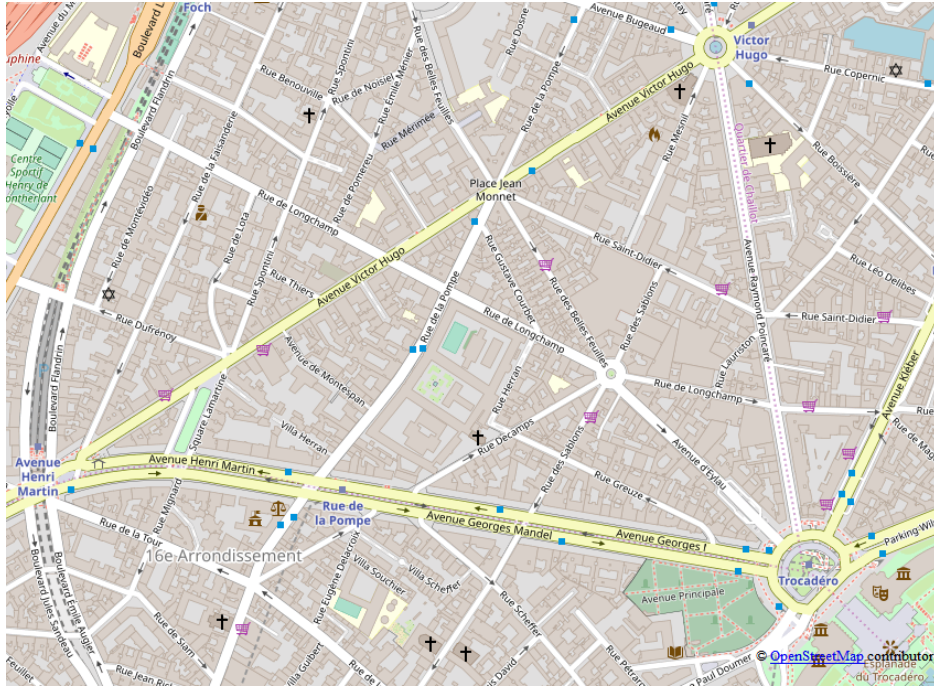


FIGURE 3.5 – Secteur de la Place de Mexico à Paris.



FIGURE 3.6 – Représentation du secteur de la Place de Mexico à Paris en : (a) un plan masse à 613 empreintes de bâtiments, (b) une maquette simplifiée à 24 empreintes de blocs.

3.4.2 Caractérisation morphologique

Une signature morphologique de tissu compact

Pour caractériser morphologiquement cette zone d'étude de 32 ha, nous avons repris la méthode des signatures du chapitre 1, l'avons appliquée à la maquette détaillée à 613 bâtiments et produit les quatre profils présentés dans la Fig. 3.7. Ces profils confirment que le cas d'étude est situé dans un secteur urbain dense où la vue du ciel est réduite (principalement comprise entre 20 et 40%), les rues relativement larges (autour de 20 mètres) et le front bâti en moyenne à R+5 (autour de 20 mètres).

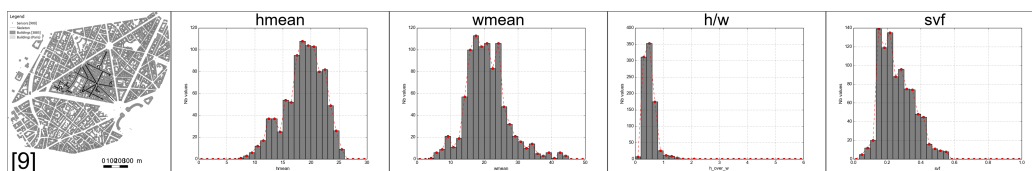


FIGURE 3.7 – Profils morphologiques du (a) secteur de la Place de Mexico pour (b) l'indicateur \bar{h} , (c) l'indicateur \bar{w} , (d) l'indicateur h/w et (e) l'indicateur svf.

Identification des composantes

Cette étape est indispensable à double titre. Qu'il s'agisse du calcul du rapport d'aspect (directionnel vs. panoptique), ou du regroupement par zones de canalisation vs. zones de collection pour construire les matrices $\mathfrak{M}_{\text{canalisation}}$ et $\mathfrak{M}_{\text{collection}}$, nous devons procéder à une identification des composantes comme présenté dans le chapitre ??.

Comme cette identification des composantes urbaines est une opération qui repose sur des indicateurs calculés dans un plan horizontal (et non des indicateurs volumiques), nous nous limitons à sa mise en oeuvre sur la maquette simplifiée à 24 empreintes de blocs.

Trois limites ont été identifiées pour la méthode présentée dans le chapitre ?? . L'une d'elle « est relative à la détection inappropriée – au sens d'une stricte lecture urbaine des formes – des esplanades comme zone de canalisation et non de collection ». La partie sud de l'avenue d'Eylau, attenante au Trocadéro, est typique de cette difficulté. Pour solutionner notre « problème », nous avons combiné cette détection des zones de canalisation vs. collection par la méthode du squelette avec une méthode classique de la géomatique dite de « dilatation-érosion » (avec une taille de *buffer* fixée arbitrairement à 12 mètres). Cet enchaînement de géo-traitements est illustré

dans la Fig. 3.8.

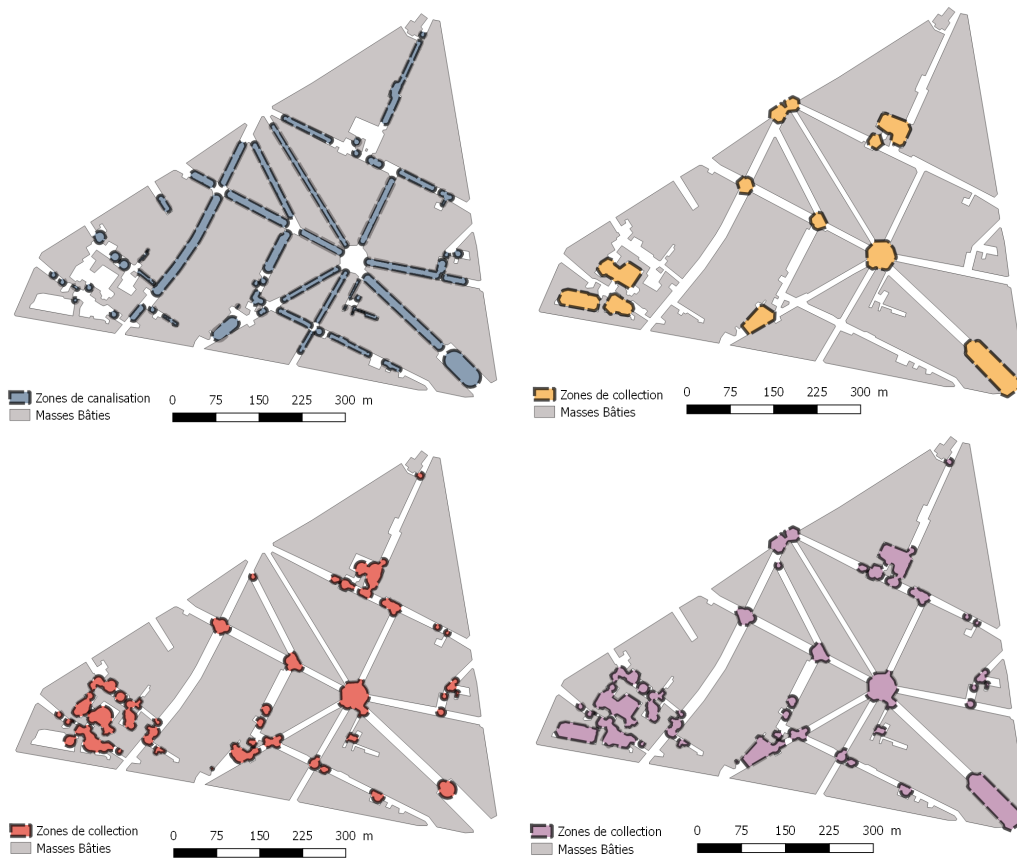


FIGURE 3.8 – (a) Détection des zones de canalisation par la méthode décrite dans le chapitre ?? ($|r'| < 0.2$), (b) Détection des zones de collection par « dilatation-érosion » avec un *buffer* fixé à 12 mètres, (c) Détection des zones de canalisation par la méthode décrite dans le chapitre ?? ($|r'| \geq 0.2$), (d) Ces zones de collection sont obtenues par la conjonction des méthodes à l'origine des deux cartes (b) et (c). Pour mieux représenter les zones, nous avons reconstruit les plus grandes boules inscrites en chaque capteur morphologique.

Pour remarque, une approche exclusivement par « dilatation-érosion » avec une telle taille de *buffer* ne permet pas d'identifier les petites intersections comme zone de collection. C'est typiquement le cas au croisement de la rue Saint-Didier et de la rue des Sablons, ou au croisement de la rue Herran et de la rue Decamps.

3.4.3 Passage de la maquette en veine numérique

En octobre 2018, Monsieur Sylvain Aguinaga (CSTB) nous a transmis deux fichiers VTK de résultats de simulations aérauliques sur le secteur de la Place de Mexico à Paris (maquette simplifiée à 24 empreintes de blocs). Ces deux fichiers correspondent à des plans de coupe horizontaux situés respectivement à 1,5 mètre et 2 mètres du sol. Ils totalisent 32915 « capteurs aérauliques » en lesquels sont stockés, pour chacune des neuf directions de vent³, la vitesse moyenne U et l'énergie cinétique turbulente k . La vitesse de référence du vent est fixée à 10 m/s à 10 mètres d'altitude et le profil de vent retenu est de type Eurocode rugo IIIb. Les dimensions de la veine numérique sont de 6000 mètres de front, 9000 mètres de long et 500 mètres de haut. Le maillage totalise 2,5 million de mailles.

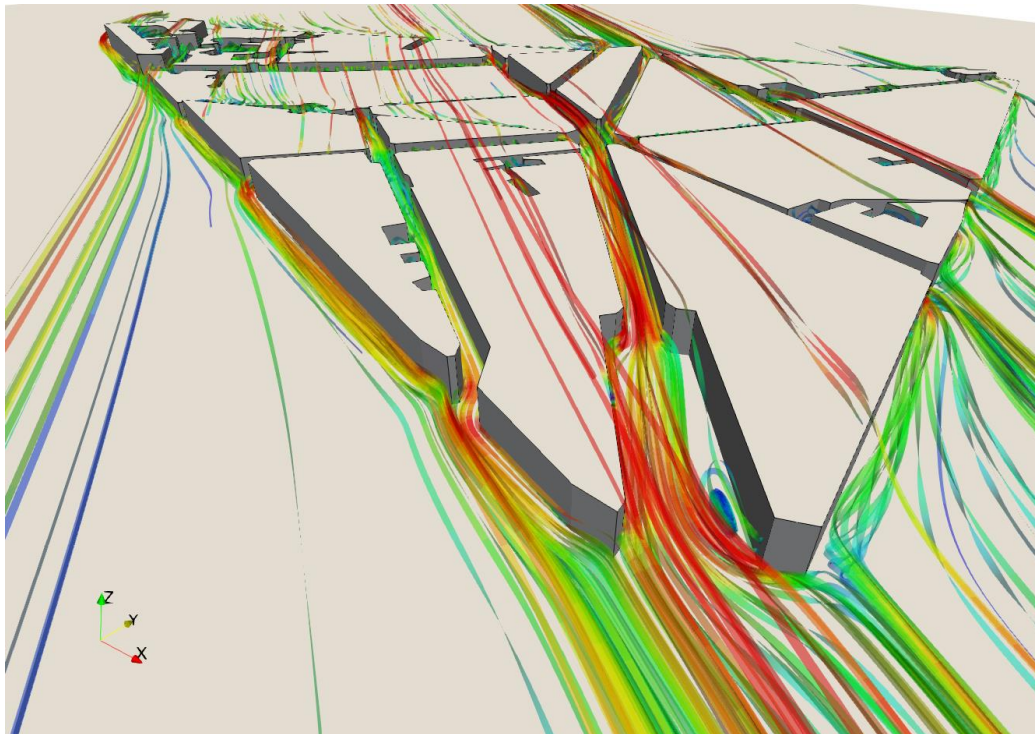


FIGURE 3.9 – Visualisation des résultats de simulation de mécanique des fluides numériques dans Paraview.

3. Les neuf directions de vent étudiées sont : 0°, 40°, 80°, 120°, 160°, 200°, 240°, 280° et 320°.

3.5 Résultats et discussion

Dans cette section, nous renvoyons, pour les éléments de détail, aux tableaux placés en annexe. Ce que nous présentons dans ce corps de texte fait référence aux principaux enseignements que nous tirons de cette analyse des corrélations.

Les tableaux de résultats en annexe A sont présentés sur trois colonnes. La première correspond aux taux de corrélation pour l'ensemble des capteurs du vide urbain. La seconde correspond aux taux de corrélation pour l'ensemble des capteurs des zones de canalisation et la troisième pour l'ensemble des capteurs des zones de collection. Dans l'ensemble des cas, les indicateurs sont listés dans l'ordre de corrélation décroissant.

Les tableaux de résultats en annexe B correspondent au filtrage par niveau de significativité des corrélations avec la vérification du test $p\text{-val} < 0.05$.

Les résultats que nous discutons dans ce corps de texte correspondent à ceux qui sont synthétisés dans le tableau 3.1. En première lecture, nous pouvons constater l'absence totale de l'indicateur écart-type de l'énergie cinétique dans ce tableau. En effet, comme aucun des indicateurs morphologiques que nous avons étudiés ne corrèle avec cet indicateur aéraulique, nous l'avons simplement retranché pour faciliter la lecture d'ensemble.

3.5.1 Corrélation à la vitesse moyenne \bar{v}

Il s'agit ici d'interpréter les colonnes 2, 3 et 4 du tableau 3.1. Ce tableau met en évidence que la vitesse moyenne de vent est l'indicateur aéraulique avec lequel le plus d'indicateurs morphologiques corrèlent.

Nous constatons que 10 indicateurs directionnels (sur les 25 que nous avons testés) corrèlent à plus de 30% et avec un $p\text{-val} < 0.05$. Cette présence massive concerne essentiellement le gabarit de l'isovist (aire et périmètre) partiel qui, par ailleurs, corrèle mieux dans sa déclinaison « au vent » (bwd). Les indicateurs relatifs à l'ouverture, qu'ils soient partiels (phmean, phw, psvf) ou panoptiques (hw, svf) sont notoirement absents de cette sélection. L'indicateur a-directionnel r corrèle assez fortement avec \bar{v} dans les zones de collection. Concernant les indicateurs dynamiques, on remarque la relative bonne corrélation des indicateurs Kurt(r), \bar{r} et Skew(r) dans les zones de canalisation, tandis que de manière assez contre-intuitive, les dérivées première r' et seconde r'' sont totalement absentes de cette sélection.

Les meilleurs taux de corrélation à la vitesse moyenne de vent sont obtenus, pour les zones de collection, par les périmètres partiels au vent (44%) et sous le vent (43%). Pour ce qui concerne les zones de canalisation, l'aire et le périmètre de l'isovist partiel sous le vent corrèlent à hauteurs respectives

de 38% et 34%.

3.5.2 Corrélation à l'écart-type de la vitesse σ_v

Très peu d'indicateurs morphologiques corrént effectivement (avec les critères que nous avons retenus du moins) avec l'écart-type de la vitesse σ_v et, notoirement, aucun d'entre-eux ne corréle en zone de collection. Pour ce qui concerne les indicateurs directionnels, seul le pmaxraylen au vent (que l'on peut interpréter comme une distance au masque bâti qui protège l'observateur du vent) corréle en zone de canalisation. Les indicateurs dynamiques Kurt(r) et Skew(r) corrént à hauteurs respectives de 37% et 36% pour l'ensemble du vide urbain.

3.5.3 Corrélation à l'énergie cinétique \bar{k}

Dans le cas de l'énergie cinétique, nous relevons que très peu d'indicateurs directionnels corrént effectivement. Seuls pminraylen (conjointement au et sous le vent) et le psvf sous le vent corrént à hauteurs respectives de 40% et 38%. Concernant l'indicateur \bar{k} , on relève par contre de bons taux de corrélation de la part des indicateurs panoptiques et a-directionnel du tableau. Qu'il s'agisse des zones de collection comme de canalisation.

3.5.4 Observations marquantes

Le tableau récapitulatif 3.1 présente l'ensemble des indicateurs morphologiques pour lesquels la corrélation avec l'un des indicateurs aéraulique est supérieure ou égale à 30% en valeur absolue et pour lesquels le test pval < 0.05 est vrai.

Pour conclure cette analyse de corrélation, quelques points nous semblent importants à dégager :

1. Les meilleurs taux de corrélation sont obtenus, pour le premier, à 47% entre les indicateurs \bar{k}_{vide} et svf, et, pour le second, à 44% entre les indicateurs \bar{v}_{coll} et pperim_bwd.
2. En termes de lecture des résultats de corrélation, une approche distinguant les zones de canalisation des zones de collection s'impose. Les indicateurs morphologiques semblent mieux corrélés aux indicateurs aérauliques en zone de collection qu'en zone de canalisation.
3. Seuls les indicateurs svf, pperim_fwd et Kurt(r) corrént simultanément en zone de canalisation, zone de collection et vide urbain. Tandis

	\bar{u}_{vide}	\bar{u}_{canal}	\bar{u}_{coll}	$\sigma_{v_{\text{vide}}}$	$\sigma_{v_{\text{canal}}}$	$\sigma_{v_{\text{coll}}}$	\bar{k}_{vide}	\bar{k}_{canal}	\bar{k}_{coll}
r			40				41		32
hw			-36				-37		-35
svf							47	31	40
pavgraylen_bwd	37		39						
pmaxraylen_bwd	40		42		36				
pmaxraylen_fwd			42						
pmaxraylen_*wd	38		42				40		
pminraylen_*wd									
parea_bwd	37		36						
parea_fwd		38							
pperim_bwd	41		44						
pperim_fwd	37	34	43						
psvf_fwd							38		
Kurt(r)		32		37	35				
\bar{r}		34					35		
Skew(r)		31		36					

TABLE 3.1 – Tableau récapitulatif des indicateurs morphologiques pour lesquels la corrélation avec l'un des indicateurs aéraulique est supérieure ou égale à 30% en valeur absolue et pour lesquels le test pval < 0.05 est vrai. Les valeurs inscrites dans ce tableau correspondent à des taux de corrélation en %.

que le premier corrèle avec l'énergie cinétique (\bar{k}) sur ces trois zones, les deux autres corrèlent avec la vitesse (\bar{v}).

4. L'indicateur \bar{v} corrèle fréquemment avec les indicateurs morphologiques orientés dans leur déclinaison au vent (bwd).
5. L'indicateur \bar{v}_{canal} corrèle aussi avec les indicateurs morphologiques dynamiques, tandis que l'indicateur \bar{v}_{coll} corrèle principalement avec les indicateurs orientés.
6. L'indicateur \bar{k} corrèle principalement avec les indicateurs morphologiques a-directionnels ou panoptiques.
7. L'indicateur σ_v corrèle de manière assez peu significative avec les indicateurs de forme que nous avons sélectionnés.
8. Seul l'indicateur hw (qui est a-directionnel dans le cadre des zones de canalisation et panoptique dans le cadre des zones de collection) corrèle négativement avec \bar{v} et \bar{k} .

3.5.5 Représentations graphiques et cartographiques des corrélations

Cette section a pour but d'illustrer les différents tableaux de corrélation présentés en annexe (cf. A et B) sous formes graphique et cartographique. Nous ne présentons ici que les corrélations pour lesquelles le taux de corrélation est supérieur à 30% et le pval < 0.05.

Principaux diagrammes de dispersion

Les diagrammes de la Fig. 3.10 présentent des nuages de points combinant tous une variable morphologique différente en abscisse et une variable aéraulique différente en ordonnée. Seuls huit diagrammes sont présentés correspondant, pour chaque variable aéraulique expliquée (à l'exception du $\sigma_{v_{\text{coll}}}$ qui ne corrèle avec aucune variable morphologique), à la variable morphologique explicative qui corrèle le plus (cf. le tableau de synthèse 3.1).

Des corrélations positives : Les droites de régression présentées mettent en évidence, dans chacun des cas, des corrélations positives avec accroissement simultané des deux paramètres.

Effets de peigne : Les diagrammes (d), (e), (f) et (g) de la Fig. 3.10 présentent une particularité forte liée au caractère panoptique (svf) ou a-directionnel dynamique (Kurt(r)) de la variable morphologique explicative

utilisée. Les points de ces diagrammes de dispersion semblent effectivement alignés verticalement comme sur les dents d'un peigne. L'effet est moins marqué dans le cas des diagrammes (d), (e) et (f) où chaque valeur de svf est répliquée neuf fois (autant que de directions principales), que dans le cas du diagramme (g) où chaque valeur de Kurt(r) est répliquée un grand nombre de fois (les capteurs d'un même tronçon de voie partagent une même valeur de Kurtosis neuf fois !).

Effet additif : Le diagramme de dispersion (d) s'obtient par « addition » des diagrammes (e) et (f). En effet, pour un même couple de variables \bar{k} et svf, nous affichons – dans le premier cas – l'ensemble des capteurs du vide et – dans les deux derniers – l'ensemble des capteurs des zones de canalisation (e) et collection (f). Pour cette même raison (mais avec les variables pperim_bwd et \bar{v}) le diagramme (c) est un sous-ensemble du diagramme (a).

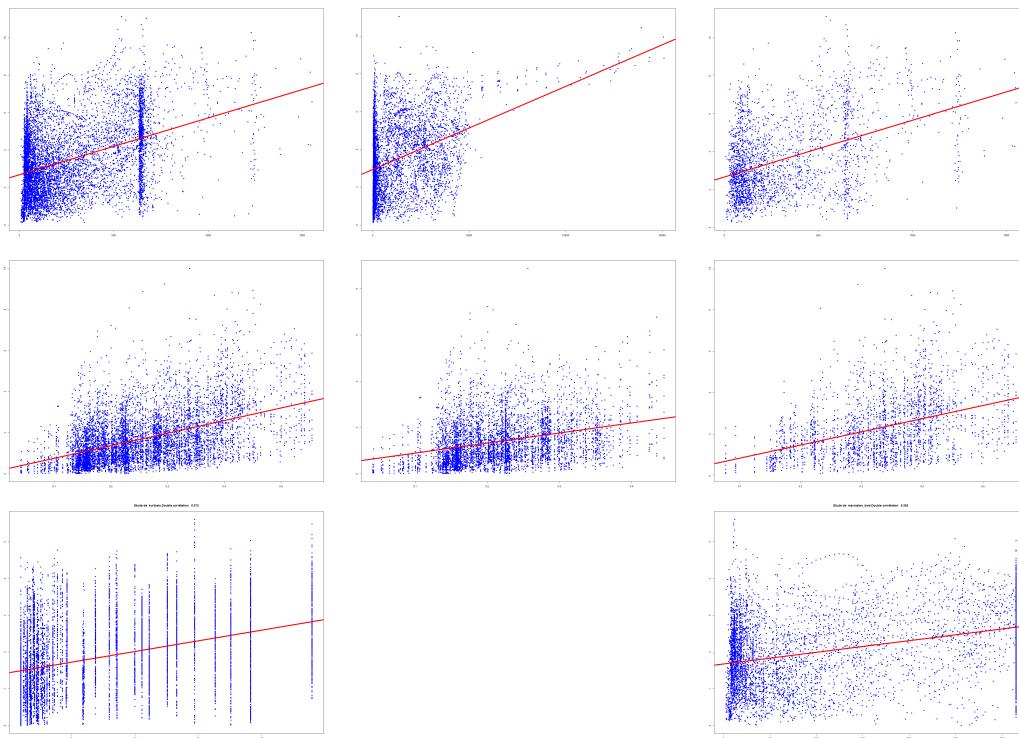


FIGURE 3.10 – Diagrammes de dispersion et droites de régression (en rouge) entre différentes paires de variables morphologiques explicatives (en abscisse) et variables aérauliques expliquées (en ordonnée) : (a) $\underline{pperim_bwd}$ et \bar{v}_{vide} , (b) \underline{parea} et \bar{v}_{canal} , (c) $\underline{pperim_bwd}$ et \bar{v}_{collec} , (d) svf et \bar{k}_{vide} , (e) svf et \bar{k}_{canal} , (f) svf et \bar{k}_{coll} , (g) Kurt(r) et $\sigma_{v_{vide}}$, (h) $\underline{pmaxraylen_bwd}$ et $\sigma_{v_{canal}}$.

Corrélation par le biais de représentations cartographiques

Les diagrammes de dispersion de la Fig. 3.10 sont des représentations qui permettent de mettre en évidence d'éventuelles corrélations. Ils présentent néanmoins l'inconvénient majeur d'être « a-spatiaux » au sens où ils suppriment toute référence au terrain d'étude. *A contrario*, les « cartes de chaleur » de la Fig. 3.11 « re-spatialisent » les indicateurs au sens où ils les « ré-ancrent » sur le fond de carte du terrain d'étude.

Ces cartes de chaleur sont produites via la fonctionnalité *heatmap* de QGIS qui consiste à créer un *raster* de densité à partir des attributs de la couche de points vecteurs donnée (en l'occurrence l'ensemble des capteurs du squelette informé munis de leurs attributs morphologiques et aérauliques respectifs).

Dans la Fig. 3.11, la carte de chaleur aéraulique correspond à l'intensité de la vitesse de vent représentée en chacun des 32915 capteurs aérauliques, par un dégradé de couleur bleue. Dans cette même figure, les six cartes de chaleur qui suivent correspondent aux intensités de six indicateurs morphologiques directionnels différents représentées en chacun des 900 capteurs du squelette informé, par un dégradé de couleur orange. Nous avons ici choisi de ne représenter que les indicateurs pour lesquels la corrélation avec $\overline{v_{\text{vide}}}$ est significative (taux de corrélation supérieur à 30% et $p\text{val} < 0.05$). Pour toutes ces cartes, la direction principale est fixée à 40° (du nord-est au sud-ouest).

Ces cartes confirment que l'approche univariée ne suffit pas pour établir une corrélation entre une variable explicative morphologique (issue de l'ensemble des 37 indicateurs que nous avons étudiés) et la variable expliquée aéraulique $\overline{v_{\text{vide}}}$. Nous faisons ce même constat pour toutes les autres variables.

Corrélation par superposition cartographique

L'approche univariée, même si elle ne suffit pas à expliquer la corrélation, suggère qu'une approche multivariée (visant à corrélérer chaque variable aéraulique expliquée à plusieurs variables morphologiques explicatives) pourrait éventuellement mieux mettre en évidence la corrélation forme-vent. D'un strict point de vue cartographique, nous avons traduit cette idée par la superposition des cartes de chaleur de l'ensemble des indicateurs morphologiques « signifiants ».

La Fig. 3.12 présente trois cartes de chaleur. La première est une carte de chaleur aéraulique et représente l'intensité de la vitesse moyenne de vent $\overline{v_{\text{vide}}}$ en chacun des 32915 capteurs du squelette, par un dégradé de couleur bleue. La deuxième est, elle aussi, une carte de chaleur aéraulique et représente

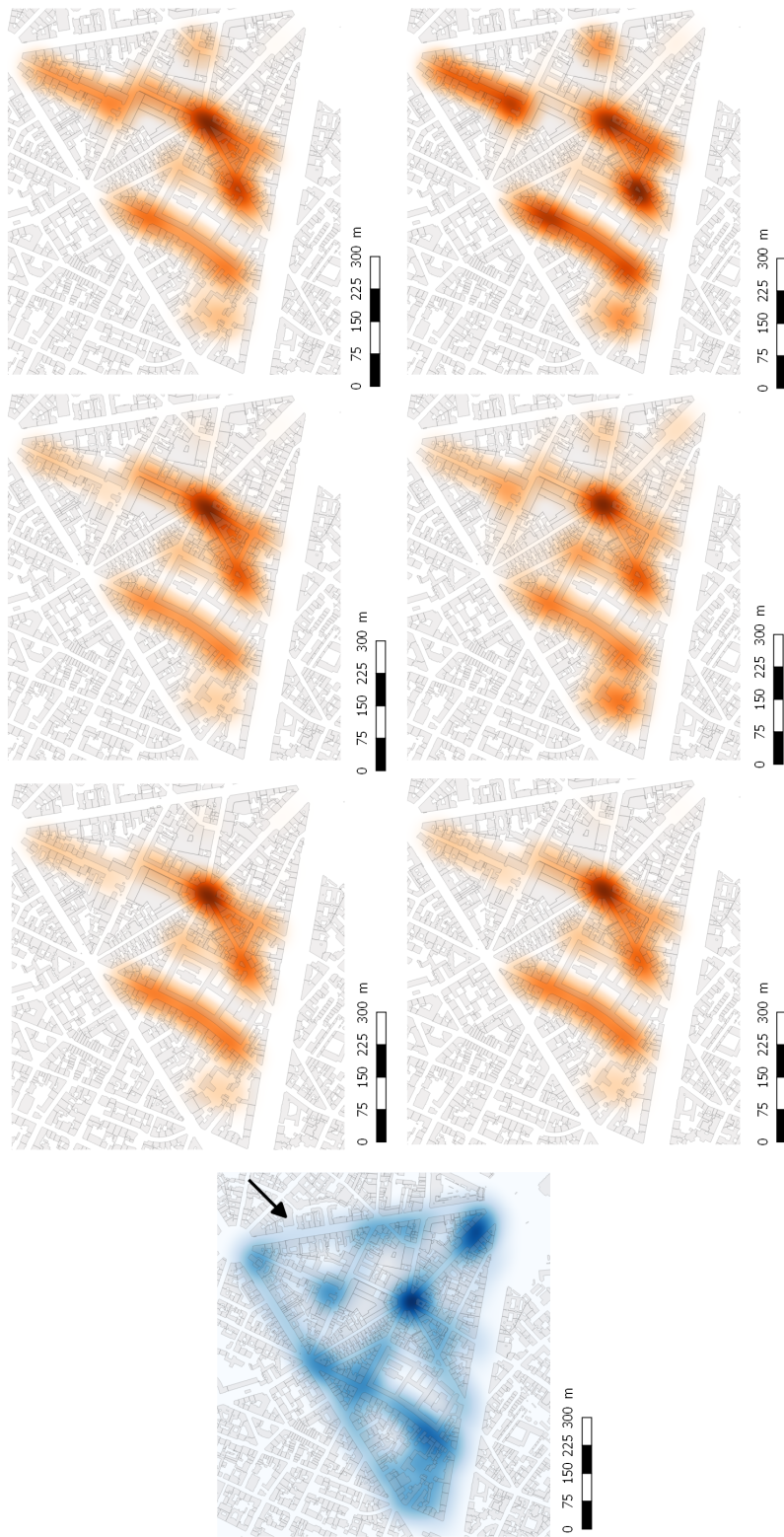


FIGURE 3.11 – « Cartes de chaleur » pour l'ensemble des capteurs du vide urbain et pour une direction de vent orientée à 40° . Les indicateurs morphologiques sont représentés par taux de corrélation décroissant : (a) $\overline{v_{\text{vide}}}$, (b) pperim_bwd , (c) pmaxraylen_*wd , (d) parea_bwd , (e) pavgraylen_bwd , (f) pavgraylen_fwd .

l'intensité de la vitesse moyenne de vent $\overline{v_{vide}}$ en chacun des 900 capteurs du squelette, par un dégradé de couleur bleue. Cette deuxième carte présente donc une synthèse de la première par regroupement d'informations aérodynamiques au niveau de chaque cellule morphologique.

La troisième enfin est le produit d'une superposition de cartes de chaleur morphologiques représentant chacune une variable explicative prépondérante de $\overline{v_{canal}}$ d'une part et de $\overline{v_{coll}}$ d'autre part.

Dans cette superposition de cartes et pour les zones de canalisation, les variables explicatives de $\overline{v_{canal}}$ apparaissent, dans un ordre de corrélation décroissant :

Indicateur	r_{heatmap}	Transparence (%)
parea_fwd	2	50
pperim_fwd	4	40
\bar{r}	6	30
Kurt(r)	8	20
Skew(r)	10	0

TABLE 3.2 – Tableau des valeurs (taille du noyau et taux de transparence) utilisées pour superposer les diverses cartes de chaleur explicatives de la variable aérodynamique $\overline{v_{canal}}$.

De la même manière, dans cette superposition de cartes et pour les zones de collection, les variables explicatives de $\overline{v_{coll}}$ apparaissent, dans un ordre de corrélation décroissant :

Indicateur	r_{heatmap}	Transparence (%)
pperim_bwd	2	85
pperim_fwd	3	80
pmaxraylen_fwd	4	75
pmaxraylen_*wd	5	70
pmaxraylen_bwd	6	65
r	7	60
pavgraylen_bwd	8	55
parea_bwd	9	50
$\frac{1}{hw}$	10	0

TABLE 3.3 – Tableau des valeurs (taille du noyau et taux de transparence) utilisées pour superposer les diverses cartes de chaleur explicatives de la variable aérodynamique $\overline{v_{coll}}$.

Nous avons choisi, dans cette troisième carte, de distinguer les zones de

canalisation des zones de collection conformément à notre deuxième observation marquante (cf. section 3.5.4). La carte obtenue par superposition des six indicateurs morphologiques explicatifs de $\overline{v_{vide}}$ donne des résultats moins satisfaisants.

Les différences de rendu entre les deux premières cartes de la Fig. 3.12 sont dues à la réduction drastique du nombre de capteurs (de 32915 capteurs aérauliques à 900 capteurs morphologiques) et à l'« effet moyenne » des informations aérauliques embarquées qui l'accompagnent. On note cependant que les principales tendances sont préservées lors de ce processus de réduction de l'information aéraulique.

A contrario, les deux dernières cartes ont des rendus relativement comparables. Ce constat nous conforte dans l'idée que la superposition des 14 cartes de chaleur morphologiques corrèle assez significativement avec la carte de chaleur aéraulique sur les 900 capteurs du squelette informé.

3.6 Discussion

Cette troisième application montre que, dans le cas du secteur de la Place de Mexico à Paris, le squelette informé et sa capacité d'analyse statique et dynamique de la forme peuvent être utilisés pour nous renseigner sur la distribution du vent en ville. Pour que nous puissions « monter en généralité », il faudrait valider cette assertion sur un grand nombre de cas urbains présentant (ou non) une diversité morphologique.

Une évolution possible de ce travail consisterait à étudier la corrélation des variables aérauliques expliquées avec d'autres variables morphologiques explicatives. Ces nouveaux indicateurs morphologiques pourraient notamment décrire des rapports de forme à des niveaux d'échelle distincts (du local au zonal). Ils pourraient aussi chercher à décrire la forme locale dans son rapport aux angles des bâtiments les plus proches. Nous pouvons par ailleurs imaginer développer de nouveaux indicateurs propres aux zones de transition (distincts de ceux des zones de canalisation ou collection).

Nous concluons ce chapitre en notant que notre proposition de raffinement des zones de canalisation vs. collection par la méthode de dilatation-érosion est probablement à revoir. Elle introduit effectivement un niveau de lecture de la forme urbaine qui n'est peut-être pas compatible avec une description aéraulique du tissu.



FIGURE 3.12 – (a) Carte de chaleur de la vitesse de vent moyenne pour les 32915 capteurs aérauliques, (b) Carte de chaleur de $\overline{v_{vide}}$ pour les 900 capteurs morphologiques, (c) Superposition des 14 cartes de chaleur morphologiques pour les indicateurs corrélés à $\overline{v_{canal}}$ (en mauve) et $\overline{v_{collec}}$ (en orange).

Cinquième partie

Conclusion

Chapitre 1

Discussion conclusive et perspectives

1.1 Conclusion générale

Notre recherche s'inscrit dans une logique de contribution aux outils du *design* urbain en phase préliminaire dans la perspective d'un processus itératif. Son objectif principal est de produire un outil simple à utiliser, utile à la prévision de l'écoulement aéraulique, à une échelle locale et à hauteur de piéton, à partir des caractéristiques morphologiques urbaines.

Pour satisfaire cet objectif principal, nous avons identifié trois objectifs intermédiaires :

- Produire une lecture de la forme urbaine adaptée aux problématiques de vent dans la ville.
- Documenter les différentes composantes urbaines et leurs caractéristiques morphologiques.
- Proposer des indicateurs morphologiques à différentes échelles susceptibles de prendre en compte des effets du vent.

Pour satisfaire ces objectifs, nous avons, dans un premier temps, fait le point des méthodes disponibles permettant à la fois de lire la forme urbaine et d'embarquer des informations morphologiques. Cet état de l'art nous a conduit à prendre deux décisions concernant l'outil visé. Celui-ci doit permettre de :

- Lire la ville dans une approche « physiologique » qui divise les composantes urbaines en systèmes d'éléments unitaires de même nature.
- Adopter une approche dynamique pour parcourir le vide urbain et une approche d'analyse orientée champs pour capter et mesurer l'espace urbain.

Ces deux décisions nous ont conduite à produire un squelette informé qui sert à *réduire* la forme urbaine et à la synthétiser. Par échantillonnage curviligne, ce squelette est ponctué d'un ensemble de capteurs virtuels et ponctuels au niveau desquels nous mesurons l'espace environnant. Cette discrétisation est développée de manière à accélérer le traitement morphologique du tissu urbain étudié ce qui permet d'envisager de traiter un grand nombre de cas en un temps raisonnable.

Pour décrire la forme urbaine, nous avons proposé 37 indicateurs morphologiques qui visent tous, mais chacun d'une manière relativement différente, à mesurer :

- Le gabarit du vide qui conditionne sa capacité d'ouverture au vent.
- La porosité qui conditionne la capacité d'écoulement ou de rétention d'un fluide par la trame bâtie.
- La rugosité qui caractérise l'état de surface ou le grain de la trame bâtie et conditionne l'écoulement du vent.
- La profondeur qui conditionne l'écoulement du vent.

Par ailleurs, le squelette peut intégrer de l'information aéraulique et la traiter dans le contexte d'un SIG.

Nous avons proposé différents types de « zones source », pour le calcul de différents groupes d'indicateurs. Celles-ci permettent d'explorer la zone étudiée à plusieurs échelles, du local au global, et sous des formes différentes (comme la panopticit   ou la directionnalité). En résultat, nous avons un squelette informé et une capacité à appliquer des analyses pour des enjeux différents.

La démonstration de l'efficacité des outils et méthodes proposés a été faite pour trois types d'applications.

La première application montre que le squelette informé peut être utilisé pour inférer une information à caractère global à partir de capteurs locaux. Nous avons ainsi produit des profils et signatures morphologiques de quartiers qui ouvrent des perspectives intéressantes pour établir des typologies de quartiers relativement à leur forme. Ces typologies ne reposent pas sur un ensemble d'indicateurs moyens mais sur des profils de distribution des valeurs des indicateurs. L'application a été mise en oeuvre sur un certain nombre de cas d'étude sur la commune de Nantes et les signatures urbaines obtenues varient bien d'une manière représentative du gradient d'urbanisation de la périphérie au centre ville.

Dans la seconde application, nous avons montré que l'on peut, grâce à l'outil et aux indicateurs dynamiques ainsi cr  s, distinguer différentes zones du vide urbain (des zones de jonction, des zones de collection, des zones de canalisation) et identifier les impasses et autres anfractuosités de l'espace. Cette démonstration a été faite sur trois cas d'étude de morphologie com-

pacte.

Enfin dans la troisième application, nous montrons que le squelette informé et sa capacité d'analyse statique et dynamique de la forme peuvent être utilisés pour nous renseigner sur la distribution du vent en ville. La tentative de production d'une carte de la variation de nos indicateurs susceptibles de représenter la vitesse du vent, à partir de l'information morphologique, montre qu'appliquer une distinction entre les zones de canalisation ou les zones de collection apporte un plus dans l'analyse du vent en ville. En effet, les indicateurs les mieux à même de représenter les variations de la vitesse de vent ne sont pas forcément les mêmes dans ces zones. Notons que l'approche est menée sur un seul quartier, elle mériterait d'être étendue à un corpus plus grand.

1.2 Perspectives

Comme nous l'avons vu tout au long de ce mémoire, notre approche comporte des limites qui nécessiteraient d'être mieux analysées et dépassées. Les outils sont maintenant en place pour faciliter cette analyse. Notre outil est un support d'information morphologique locale et globale, reposant sur une représentation cartographique, et une démarche dynamique pour synthétiser le vide urbain.

Pour ce qui est de la représentation du vide urbain, le squelette pourrait être construit, non pas sur la plus grande boule inscrite, mais sur une autre information, par exemple, qui intégrerait la troisième dimension, à l'heure actuelle ignorée dans sa construction. Cela pourrait donner une lecture différente de la forme urbaine plus proche du parcours du vent. On pourrait également imaginer construire l'analyse à différentes hauteurs afin de mieux rendre compte de l'augmentation de la place du vide avec l'altitude et ainsi intégrer des gradients verticaux.

En ce qui concerne la méthode de mesure de l'information morphologique, il faudrait vérifier la pertinence des décisions prises sur les échantillonnages spatiaux : rayon du *buffer*, pas d'échantillonnage du squelette, angle d'ouverture, abscisse angulaire.

Pour ce qui est de la production des indicateurs, plusieurs améliorations pourraient être apportées à la méthode « capter » dans la définition de la zone source affectée à chaque indicateur. Les isovistes que nous avons utilisés pour la détermination de plusieurs indicateurs, sont calculés selon la méthode du lancer de rayon. Nous proposons d'essayer une implémentation alternative afin de mieux traduire l'espace « vu » par le vent et non pas par un observateur. Cela inclut une prise en considération des éventuels débouchés

(ouverture vers une place ou passage vers une rue) à proximité du capteur, leur nombre, leur répartition par rapport au capteur et la distance de séparation. Nous pouvons aussi imaginer d'autres indicateurs plus liés aux angles urbains, ou des indicateurs décrivant plus les anfractuosités du tracé urbain.

En ce qui concerne l'établissement de corrélations vent-forme, il faudrait reproduire la recherche sur un corpus de cas plus grand et plus varié. Une étude de corrélations multivariées est possible, en testant éventuellement d'autres variables morphologiques explicatives, notamment avec des échelles emboîtées (du local au zonal).

Un autre point important qui n'a pas pu être traité dans cette thèse est la validation opérationnelle, c'est-à-dire la vérification que ce type d'outil répond bien aux attentes des concepteurs. Le simple retour d'évaluation que nous avons eu avec le CSTB montre que cet outil graphique éveille des intérêts notamment en raison de la simplicité des résultats présentés et donc de son pouvoir de médiation.

En effet, les développements futurs que nous avons évoqués précédemment, devraient permettre d'améliorer l'outil à transmettre aux acteurs de l'urbanisme opérationnel. Le schéma de la Fig. 1.1 montre les changements que nous proposons. Nous rappelons que, en l'état actuel et tel que présenté dans le cadre de cette thèse, l'outil est divisé en quatre étapes : *Simplifier*, *mesurer*, *capter*, *identifier*. Dans le schéma que nous envisageons pour le futur outil, les deux premières phases seront préservées (en l'occurrence les méthodes mises en place au cours de la thèse qui concernent la simplification de la maquette urbaine et le déploiement des capteurs virtuels) et les deux dernières seront modifiées. Dans ce schéma rénové, la troisième étape de mesure est largement simplifiée. Il suffit de calculer, en chaque capteur, une sélection des indicateurs que nous avons testés (ceux qui permettent de distinguer les composantes urbaines et ceux qui corrélerent le mieux avec les indicateurs aérauliques). Enfin, et c'est l'argument principal, il n'y a aucune simulation de CFD dans l'enchaînement en perspective. C'est-à-dire que, dans la quatrième étape, l'identification du vent et de la forme disparaît au profit d'une étape de visualisation qui reste à consolider.

Enfin, les informations produites par ce type d'outil pourraient ouvrir des perspectives dans d'autres domaines. On pense naturellement à prise en compte des apports solaire ou lumineux. Une autre application pourrait aussi viser à l'amélioration des classifications géoclimatiques *Local Climate Zones* qui n'intègrent pas le vent dans l'analyse des formes, alors que celui-ci est un paramètre primordial pour la formation d'îlots de chaleur urbain. Notre approche pourrait ainsi servir à proposer des paramètres spécifiques au vent dans ces typologies.

L'outil présente une première étape pour construire un démonstrateur

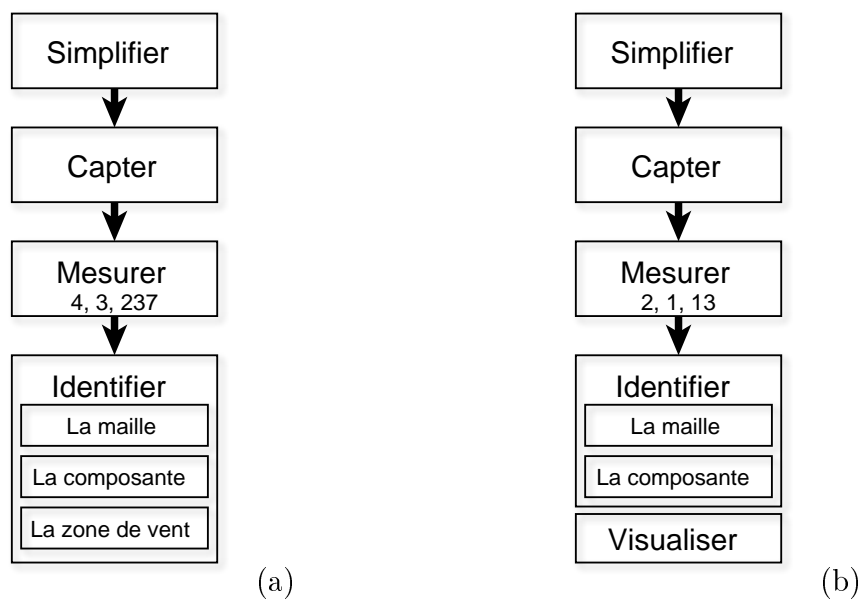


FIGURE 1.1 – (a) Le modèle implémenté dans la thèse, (b) Le modèle en perspective. Les nombres qui figurent dans la case *Mesurer* correspondent, dans chacun des cas, au nombre d'indicateurs à calculer effectivement.

aidant à une planification urbaine de la *friendly town* évoquée par Francis Tibbalds qui satisfait le principe de construction d'environnements « lisibles » aussi appelés *legible environments*.

1.3 Remerciements au CSTB

Cette section est dédiée à la présentation des divers échanges que nous avons eus, dans le cadre de ce travail de thèse, avec des membres du site nantais du CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). Il s'agit en l'occurrence de présenter l'enchaînement des trois réunions ainsi que l'avis expert rendu par rapport aux résultats que nous avons présentés.

1.3.1 Un échange direct sur trois réunions

Première réunion le 14 novembre 2016

Cette réunion s'est tenue en présence de MM. Sylvain Aguinaga¹ et Fabrice de Oliveira.

Cette réunion introductive a permis de présenter le cadre et les ambitions de ce travail doctoral à nos interlocuteurs. Elle a aussi permis d'exposer nos besoins en termes de données de simulation aéraulique. Le support de communication utilisé se résume à deux planches graphiques qui ont permis d'expliquer le contexte, la problématique et le début de méthodologie. Nous avons, à l'occasion de cette première réunion, précisé notre approche en termes de lecture des tracés urbains, composition de vide-plein, mais aussi nos objectifs d'étude de corrélation de la forme du vide avec le mouvement du vent au niveau du piéton. Cette réunion nous a aussi permis d'illustrer notre approche par la « squelettisation » sur un exemple.

Deuxième réunion le 15 janvier 2018

Cette réunion s'est tenue en présence de Sylvain Aguinaga, Thomas Leduc et Marjorie Musy, dans les locaux de AAU-CRENAU (École nationale supérieure d'architecture de Nantes).

Au cours de cette deuxième réunion, nous nous sommes plus focalisés sur l'avancement de la méthodologie. Nous avons ainsi présenté le mécanisme de construction de l'outil de « squelettisation informée » comme support pour le stockage de l'information morphologique. Nous avons aussi présenté un exemple d'évolution d'un indicateur morphologique le long du squelette, sur le secteur d'étude de la Part-Dieu à Lyon et son utilité pour l'identification urbaine.

Troisième réunion le 27 septembre 2019

Cette réunion s'est tenue en présence de Sylvain Aguinaga, Thomas Leduc et Marjorie Musy, dans les locaux de l'IRSTV (Centrale Nantes).

Lors de cette troisième et dernière réunion, nous avons présenté les résultats des études de corrélation entre l'information morphologique d'une part et l'information aéraulique d'autre part. Nous avons détaillé les modifications faites sur l'outil descriptif pour améliorer les corrélations avec la distribution

1. M. S. Aguinaga est ingénieur en aérodynamique au sein de la Division Modélisation Numérique du CSTB, membre de l'entité Climatologie Aérodynamique Pollution et Epuration (CAPE).

du vent (introduction de nouveaux indicateurs intégrant la notion de directionnalité). Nous avons en retour recueilli les avis d'un expert du domaine et évoqué divers pistes prospectives afin d'améliorer l'outil.

1.3.2 Contribution du CSTB

Les données aérauliques livrées par le CSTB

Les simulations aérauliques faites par le CSTB ont été réalisées spécialement pour mon travail de thèse. Nous avons choisi le cas d'étude du secteur de la Place de Mexico à Paris.

La contribution du CSTB a pris la forme de :

- Données aérauliques (au format *VTK MultiBlock*) selon neuf directions sur le cas de Paris pour un plan horizontal situé à 1,5 mètre du sol et un autre situé à 2 mètres du sol.
- Un fichier PDF, avec des illustrations décrivant les détails techniques : dimensions de la veine numérique, profil de vent utilisé, caractéristiques géométriques du maillage, et image en perspective des flux du vent présentés en *streamline*.

Le retour expert issu de la réunion du 27 septembre 2019

La discussion qui a eu lieu à l'occasion de la troisième et dernière réunion a permis de consigner les quelques points suivants :

- Le squelette informé et la méthode développée dans le cadre de cette thèse semblent intéressants pour obtenir des résultats rapides dans le cas d'études d'impact d'un nouvel ouvrage (le projet de « La Tour Occitanie » situé dans le quartier Matabiau à Toulouse est évoqué à titre d'illustration) mais aussi pour caractériser le niveau de « ventilation » d'un projet d'éco-quartier.
- La mise en oeuvre d'études aérauliques à l'échelle d'un quartier ou d'une ville est un processus qui semble actuellement sinon hors de portée du moins très coûteux (une semaine de temps de calcul) pour la CFD. L'approche par le squelette informé pourrait permettre de satisfaire des attentes réelles en termes de caractérisation de la vulnérabilité (asphyxie/ventilation) à l'échelle du quartier.
- La préparation d'une maquette numérique de ville destinée à être utilisée pour des simulations CFD en veine numérique est un processus coûteux qui nécessite une réelle expertise en termes de maillage (50% du temps de l'étude est consacré à sa préparation). *A contrario*, le squelette informé est un processus qui est appliqué, dans le plan, à

une collection d'empreintes de bâtiments.

- L'information associée au squelette informé est locale, détaillée au niveau du capteur. A partir de cette information il est possible de caractériser le voisinage de la position notamment par rapport aux masses construites (pied d'une tour, en espace ouvert, à un coin de rue, etc.).

A l'occasion de cette réunion, Sylvain Aguinaga a aussi attiré notre attention sur un point important vis-à-vis des enjeux aérauliques urbains susceptibles de renforcer l'attractivité et l'efficacité de l'outil : développer le squelette informé avec une focalisation sur la discrétisation de l'espace autour des ouvrages se distinguant des bâtiments environnants par une hauteur importante.

Sixième partie

Annexes

Annexe A

Tableaux des coefficients de corrélation

Corrélation avec \bar{v}_{vide}		Corrélation avec \bar{v}_{canal}		Corrélation avec \bar{v}_{coll}	
Indicateurs	Cor.	Indicateurs	Cor.	Indicateurs	Cor.
pperim_*wd	0,43	parea_*wd	0,42	pperim_*wd	0,48
parea_*wd	0,43	pmaxraylen_bwd	0,40	pavgraylen_*wd	0,45
pperim_bwd	0,41	pperim_*wd	0,40	parea_*wd	0,44
pavgraylen_*wd	0,41	pperim_bwd	0,39	pperim_bwd	0,44
pmaxraylen_bwd	0,40	pavgraylen_*wd	0,39	pperim_fwd	0,43
pmaxraylen_*wd	0,38	parea_fwd	0,38	pmaxraylen_fwd	0,42
parea_fwd	0,38	parea_bwd	0,38	pmaxraylen_*wd	0,42
pavgraylen_fwd	0,38	pavgraylen_fwd	0,37	pmaxraylen_bwd	0,42
pavgraylen_bwd	0,37	pavgraylen_bwd	0,37	pavgraylen_fwd	0,40
pperim_fwd	0,37	pmaxraylen_*wd	0,37	distance	0,40
parea_bwd	0,37	pminraylen_*wd	0,35	parea_fwd	0,39
pmaxraylen_fwd	0,36	\bar{r}	0,34	pavgraylen_bwd	0,39
pminraylen_*wd	0,32	pperim_fwd	0,34	pminraylen_*wd	0,38
distance	0,32	pmaxraylen_fwd	0,33	parea_bwd	0,36
Kurt(r)	0,30	distance	0,33	Kurt(r)	0,35
Skew(r)	0,29	Kurt(r)	0,32	Skew(r)	0,33
\bar{r}	0,26	Skew(r)	0,31	pminraylen_bwd	0,31
pminraylen_bwd	0,26	pminraylen_bwd	0,27	pminraylen_bwd	0,30
phmean_*wd	0,25	pminraylen_bwd	0,26	phmean_*wd	0,30
pminraylen_bwd	0,24	phmean_*wd	0,23	svf	0,25
phmean_bwd	0,21	psvf_*wd	0,21	\bar{r}	0,24
psvf_*wd	0,21	psvf_fwd	0,21	phmean_bwd	0,24
psvf_fwd	0,20	phmean_bwd	0,20	psvf_*wd	0,21
psvf_bwd	0,17	psvf_bwd	0,18	phmean_fwd	0,20
phmean_fwd	0,17	phmean_fwd	0,16	psvf_fwd	0,19
svf	0,15	bissp	0,16	r'	0,17
bissp	0,11	svf	0,11	psvf_bwd	0,16
r'	0,09	bsf	0,06	σ_r	0,10
hre	0,06	hre	0,05	hre	0,09
bsf	0,06	σ_r	0,01	bsf	0,07
σ_r	0,04	r'	0,00	bissp	0,01
$\sigma_{r'}$	-0,02	$\sigma_{r'}$	-0,02	r''	0,00
r''	-0,05	r''	-0,11	$\sigma_{r'}$	-0,03
hw	-0,11	hw	-0,12	phw_bwd	-0,20
phw_bwd	-0,23	phw_bwd	-0,25	phw_fwd	-0,20
phw_*wd	-0,25	phw_*wd	-0,26	phw_*wd	-0,24
phw_fwd	-0,25	phw_fwd	-0,27	hw	-0,36

TABLE A.1 – Coefficients de corrélation des indicateurs morphologiques à la vitesse moyenne du vent \bar{v} .

Corrélation avec \bar{k}_{vide}		Corrélation avec \bar{k}_{canal}		Corrélation avec \bar{k}_{coll}	
Indicateurs	Cor.	Indicateurs	Cor.	Indicateurs	Cor.
svf	0,47	svf	0,31	svf	0,40
pminraylen_bwd	0,41	distance	0,29	psvf_fwd	0,39
distance	0,41	pminraylen_bwd	0,28	pminraylen_bwd	0,33
pminraylen_*wd	0,40	pminraylen_*wd	0,27	distance	0,32
psvf_fwd	0,38	\bar{r}	0,25	pminraylen_*wd	0,31
\bar{r}	0,35	psvf_fwd	0,22	\bar{r}	0,28
psvf_*wd	0,32	pminraylen_bwd	0,20	psvf_*wd	0,28
pminraylen_bwd	0,30	psvf_*wd	0,17	pavgraylen_fwd	0,25
pavgraylen_fwd	0,26	pavgraylen_fwd	0,14	pavgraylen_*wd	0,16
pavgraylen_*wd	0,21	pavgraylen_*wd	0,12	pminraylen_bwd	0,16
psvf_bwd	0,19	psvf_bwd	0,09	parea_fwd	0,13
pavgraylen_bwd	0,13	pavgraylen_bwd	0,08	r'	0,11
parea_fwd	0,13	parea_fwd	0,06	pperim_fwd	0,10
parea_*wd	0,11	parea_*wd	0,06	parea_*wd	0,09
pperim_fwd	0,09	pmaxraylen_bwd	0,05	pmaxraylen_fwd	0,09
r''	0,08	pperim_bwd	0,04	psvf_bwd	0,06
pperim_*wd	0,08	parea_bwd	0,04	pperim_*wd	0,06
parea_bwd	0,07	pperim_*wd	0,03	hre	0,06
pperim_bwd	0,06	pmaxraylen_*wd	0,02	pmaxraylen_*wd	0,06
pmaxraylen_*wd	0,04	pperim_fwd	0,02	Kurt(r)	0,05
pmaxraylen_fwd	0,04	phmean_bwd	0,01	σ_r	0,04
r'	0,04	r''	0,01	pavgraylen_bwd	0,03
pmaxraylen_bwd	0,04	pmaxraylen_fwd	0,00	parea_bwd	0,03
bissp	-0,02	bissp	-0,01	bsf	0,01
phmean_bwd	-0,03	phmean_*wd	-0,03	pperim_bwd	0,01
hre	-0,08	r'	-0,03	Skew(r)	0,01
bsf	-0,09	bsf	-0,05	pmaxraylen_bwd	0,01
phmean_*wd	-0,09	phmean_fwd	-0,06	phmean_bwd	0,00
phmean_fwd	-0,11	hre	-0,08	r''	-0,02
σ_r	-0,12	phw_bwd	-0,10	bissp	-0,04
$\sigma_{r'}$	-0,13	phw_*wd	-0,14	$\sigma_{r'}$	-0,07
phw_bwd	-0,17	Skew(r)	-0,15	phmean_*wd	-0,08
Skew(r)	-0,18	Kurt(r)	-0,17	phw_bwd	-0,09
Kurt(r)	-0,19	$\sigma_{r'}$	-0,17	phmean_fwd	-0,11
phw_*wd	-0,23	phw_fwd	-0,18	phw_*wd	-0,23
phw_fwd	-0,26	hw	-0,23	phw_fwd	-0,27
hw	-0,37	σ_r	-0,25	hw	-0,35

TABLE A.2 – Coefficients de corrélation des indicateurs morphologiques à l'énergie cinétique \bar{k} .

Corrélation avec $\sigma_{v_{vide}}$		Corrélation avec $\sigma_{v_{canal}}$		Corrélation avec $\sigma_{v_{coll}}$	
Indicateurs	Cor.	Indicateurs	Cor.	Indicateurs	Cor.
Kurt(r)	0,37	pmaxraylen_bwd	0,36	phmean_*wd	0,25
Skew(r)	0,36	pperim_*wd	0,35	parea_*wd	0,25
pmaxraylen_bwd	0,28	pperim_bwd	0,35	Kurt(r)	0,23
phmean_*wd	0,27	Skew(r)	0,35	parea_fwd	0,22
pmaxraylen_*wd	0,27	Kurt(r)	0,35	parea_bwd	0,21
parea_*wd	0,25	pmaxraylen_*wd	0,34	Skew(r)	0,21
hw	0,24	parea_*wd	0,34	phmean_fwd	0,19
pmaxraylen_fwd	0,24	parea_fwd	0,30	phmean_bwd	0,18
pperim_*wd	0,23	pmaxraylen_fwd	0,30	pmaxraylen_*wd	0,18
parea_fwd	0,22	parea_bwd	0,30	pmaxraylen_bwd	0,16
pperim_bwd	0,22	pperim_fwd	0,30	pavgraylen_*wd	0,16
phmean_bwd	0,22	pavgraylen_*wd	0,28	pmaxraylen_fwd	0,16
parea_bwd	0,22	pavgraylen_fwd	0,27	pavgraylen_bwd	0,14
phmean_fwd	0,20	pavgraylen_bwd	0,26	pavgraylen_fwd	0,13
pperim_fwd	0,19	phmean_*wd	0,25	pperim_*wd	0,11
pavgraylen_*wd	0,16	phmean_bwd	0,21	pperim_bwd	0,11
pavgraylen_fwd	0,14	bissp	0,18	pperim_fwd	0,10
pavgraylen_bwd	0,14	phmean_fwd	0,17	\bar{r}	0,08
bissp	0,13	\bar{r}	0,12	phw_fwd	0,06
hre	0,11	bsf	0,12	phw_*wd	0,05
bsf	0,09	hre	0,11	phw_bwd	0,04
σ_r	0,06	σ_r	0,10	bissp	0,04
$\sigma_{r'}$	0,05	hw	0,10	hw	-0,01
r'	0,03	psvf_fwd	0,09	r'	-0,01
\bar{r}	-0,01	pminraylen_*wd	0,09	r''	-0,01
phw_*wd	-0,05	$\sigma_{r'}$	0,08	hre	-0,02
phw_bwd	-0,05	psvf_*wd	0,08	σ_r	-0,03
phw_fwd	-0,07	r'	0,06	$\sigma_{r'}$	-0,04
psvf_fwd	-0,07	psvf_bwd	0,06	pminraylen_bwd	-0,06
psvf_bwd	-0,08	distance	0,05	psvf_bwd	-0,06
psvf_*wd	-0,08	pminraylen_bwd	0,04	pminraylen_bwd	-0,07
pminraylen_*wd	-0,11	pminraylen_bwd	0,02	psvf_fwd	-0,09
r''	-0,12	r''	-0,10	psvf_*wd	-0,09
pminraylen_bwd	-0,14	svf	-0,13	pminraylen_*wd	-0,09
pminraylen_bwd	-0,14	phw_bwd	-0,17	distance	-0,10
distance	-0,14	phw_*wd	-0,18	bsf	-0,11
svf	-0,26	phw_fwd	-0,20	svf	-0,14

TABLE A.3 – Coefficients de corrélation des indicateurs morphologiques à l'écart-type de la vitesse σ_v .

Annexe B

Tests de significativité

Indicateurs morphologiques	Cor. \bar{v}_{vide}			Cor. \bar{v}_{canal}			Cor. \bar{v}_{coll}		
	wd	fwd	bwd	wd	fwd	bwd	wd	fwd	bwd
Orientation des indicateurs statiques directionnels									
Périmètre de l'isovist partiel (<i>pperim</i>)	0,43	0,37	0,41	0,40	0,34	0,39	0,48	0,43	0,44
pvals		0,01	0,01		0,04	0,15		0,04	0,03
Surface de l'isovist partiel (<i>parea</i>)	0,43	0,38	0,37	0,42	0,38	0,38	0,44	0,39	0,36
pvals		0,92	<0,01		<0,01	0,01		0,82	<0,01
Rayon moyen de l'isovist partiel (<i>pavgraylen</i>)	0,41	0,38	0,37	0,39	0,37	0,37	0,45	0,40	0,39
pvals		0,38	<0,01		0,13	<0,01		0,77	0,04
Rayon maximal de l'isovist partiel (<i>pmaxraylen</i>)	0,38	0,36	0,40	0,37	0,33	0,40	0,42	0,42	0,42
pvals	<0,01	0,28	<0,01	0,66	0,17	0,90	<0,01	<0,01	<0,01
Hauteur moyenne partielle (<i>phmean</i>)						0,3			
pvals									
Indicateurs statiques a-directionnels									
Ratio d'aspect (<i>hw</i>)								-0,36	
pvals								<0,01	
Rayon de la plus grande boule inscrite (<i>r</i>)		0,32			0,32			0,40	
pvals		<0,01			<0,01			<0,01	
Indicateurs dynamiques									
Rayon moyen de la plus grande boule inscrite (\bar{r})					0,34				
pvals					<0,01				
Kurtosis (<i>Kurt(r)</i>)		0,30			0,32			0,35	
pvals		0,84			0,025			0,35	
Skewness (<i>Skew(r)</i>)					0,31			0,33	
pvals					<0,01			0,58	

TABLE B.1 – Coefficients de corrélation à la vitesse moyenne du vent \bar{v} , $\geq 30\%$ (en valeur absolue), avec test de significativité pval. Les cases colorées en vert sont celles pour lesquelles l'hypothèse $pval < 0.05$ est vérifiée.

Indicateurs morphologiques	Cor. \bar{k}_{vide}			Cor. \bar{k}_{canal}			Cor. \bar{k}_{coll}			
	wd	fwd	bwd	wd	fwd	bwd	wd	fwd	bwd	
Orientation des indicateurs statiques directionnels										
Facteur de vue du ciel partiel ($psvf$)	0,32	0,38						0,39		
pvals		<0.01						0,75		
Rayon minimal de l'isovist partiel ($pminraylen$)	0,40	0,41	0,30				0,31	0,33		
pvals	0,01	0,33	0,10				0,95	0,55		
Indicateurs statiques a-directionnels										
Ratio d'aspect (hw)	-0,37									
pvals	<0.01									
Rayon de la plus grande boule inscrite (r)	0,41							0,32		
pvals	<0.01							<0.01		
Indicateurs statiques panoptiques										
Ratio d'aspect (hw)							-0,35			
pvals							0.03			
Facteur de vue du ciel (svf)	0,47			0,31			0,40			
pvals	<0.01			<0.01			<0.01			
Indicateurs dynamiques										
Rayon moyen de la plus grande boule inscrite (\bar{r})	0,35									
pvals	<0.01									

TABLE B.2 – Coefficients de corrélation à l'énergie cinétique \bar{k} , $\geq 30\%$ (en valeur absolue), avec test de significativité pval. Les cases colorées en vert sont celles pour lesquelles l'hypothèse pval < 0.05 est vérifiée.

Indicateurs morphologiques	Cor. $\sigma_{v_{vide}}$			Cor. $\sigma_{v_{canal}}$			Cor. $\sigma_{v_{coll}}$		
	wd	fwd	bwd	wd	fwd	bwd	wd	fwd	bwd
Orientation des indicateurs statiques directionnels									
Périmètre de l'isovist partiel (<i>pperim</i>)				0,35	0,30	0,35			
pvals					0,94	0,16			
Surface de l'isovist partiel (<i>parea</i>)				0,34	0,30	0,30			
pvals					0,63	0,08			
Le rayon maximal de l'isovist partiel (<i>pmaxraylen</i>)				0,34	0,30	0,36			
pvals				0,97	0,27	0,02			
Indicateurs statiques dynamiques									
Kurtosis (<i>Kurt(r)</i>)	0,37			0,35					
pvals	0,25			<0,01					
Skewness (<i>Skew(r)</i>)	0,36			0,35					
pvals	<0,01			0,50					

TABLE B.3 – Coefficients de corrélation à l'écart-type de la vitesse σ_v , $\geq 30\%$ (en valeur absolue), avec test de significativité pval. Les cases colorées en vert sont celles pour lesquelles l'hypothèse $pval < 0.05$ est vérifiée.

Index

- $\mathfrak{B}(P, r)$, 110
Card $_{3_i}$, 111
Écart-type de la dérivée première
des rayons des plus
grandes boules inscrites
($\sigma_{r'}$), 63
Écart-type des rayons des plus
grandes boules inscrites
(σ_r), 63
atomiste, 37
buffer circulaire, 49
plenum, 37
- arrière-plan, 49
attributs, 48
- bâti linéaire, 35
bâti planaire, 35
bâti ponctuel, 35
Building surface fraction, 55
- canalisation, 107
canopée urbaine, 69
capteur d'articulation, 111
capteur virtuel, 48
capteurs aérauliques, 91
cellules aérauliques, 93
champ d'isovist, 40
coefficient d'aplatissement ou
Kurtosis des rayons des
plus grandes boules
inscrites (Kurt(r)), 63
- Coefficient d'asymétrie ou
skewness des rayons des
plus grandes boules
inscrites (Skew(r)), 63
collection, 107
couche limite, 68
- Dérivée première du rayon de la
plus grande boule inscrite
(r'), 62
Dérivée seconde du rayon de la
plus grande boule inscrite
(r''), 62
densité du bâti, 80
différentielle, 51
direction principale, 50
dynamique, 51
- espace de jonction, 108
espace de transition, 108
espace non construit, 35
espace ouvert, 35
- facteur de protection, 72
Facteur de vue d'une portion de
ciel (psvf), 61
Facteur de vue du ciel (svf), 56
fetch, 80
- hauteur de déplacement, 69
Hauteur moyenne de rugosité
(hre), 56

Hauteur moyenne du déroulé de
 façades partiel (phmean),
 60
 Height of roughness elements, 56
 histogramme des fréquences, 96
 horizon artificiel, 40, 49, 53

 index frontal, 80
 indicateur a-directionnel, 50
 indicateur directionnel, 50
 indicateur panoptique, 50
 isovist, 40, 49
 isovist partiel au vent, 58
 isovist partiel sous le vent, 58

 longueur caractéristique, 90
 Longueur de rayons moyenne
 (pavgraylen), 58
 longueur de rugosité, 69

 micro-échelle, 67
 Moyenne de la dérivée première
 des rayons des plus
 grandes boules inscrites
 (\bar{r}'), 63
 Moyenne des rayons des plus
 grandes boules inscrites
 (\bar{r}), 63

 Périmètre de l'isovist partiel
 (pperim), 58
 panoptique, 49
 plan de coupe, 91
 plein, 34
 plus grande boule inscrite, 49
 Plus grande longueur de rayons
 (pmaxraylen), 58
 Plus petite longueur de rayons
 (pminraylen), 58
 point d'arrêt, 68
 point de génération, 40, 49
 point de stagnation, 71

 porosité, 67
 premier plan, 49
 profil morphologique, 97
 prospect équivalent, 81

 rapport d'aspect d'une rue canyon
 (hw), 54
 rapport d'aspect moyen, 55
 Rapport d'aspect partiel (phw),
 60
 ratio d'aspect d'une place ou d'un
 espace ouvert (hw), 57
 ratio d'aspect d'une rue canyon
 (hw), 54
 ratio de surface bâtie (bsf), 55
 rayon de la plus grande boule
 inscrite (r), 54
 rugosité, 67, 80
 rugosité moyenne, 82
 rugosité relative du tissu urbain,
 82

 signature morphologique, 97
 Sinuosité, 82
 Sky view factor, 56
 squelette, 44
 statique, 51
 Surface de l'isovist partiel (parea),
 58
 système des espaces libres, 35
 système du bâti, 34

 taux de percement horizontal du
 tissu urbain, 82

 Valeur absolue du produit scalaire
 du vecteur unitaire de la
 direction principale avec le
 vecteur unitaire du plus
 grand diamètre inscrit
 dans l'isovist (bissp), 60
 vide urbain, 35

voisinages de capteurs aérauliques,
93

zone d'étude, 87

zone d'articulation, 108

zone d'influence, 48

zone d'intérêt, 87

zone de rugosité, 87

zone de sillage, 71

zone source, 48

Bibliographie

- ADOLPHE, Luc (avr. 2001a). « A Simplified Model of Urban Morphology : Application to an Analysis of the Environmental Performance of Cities ». In : *Environment and Planning B : Planning and Design* 28.2, p. 183-200. ISSN : 0265-8135. DOI : 10.1068/b2631. URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1068/b2631>.
- (2001b). « Modelling the Link Between Built Environment and Urban Climate : Towards Simplified Indicators of the City Environment. » In : *Seventh International IBPSA Conference*. Rio de Janeiro, Brazil, p. 679-684.
- AIT-AMEUR, Karima (2002). « Vers une méthode multicritère de caractérisation du microclimat dans les espaces publics urbains : validation d'un système d'indicateurs "morpho-climatiques" et d'un indicateur de confort ». Thèse de doctorat dirigée par Adolphe, Luc Sciences pour l'ingénieur. Architecture Nantes 2002. Thèse de doct., p. 288. URL : <http://www.theses.fr/2002NANT2008>.
- BAKER, N. et al. (1996). « The urban porosity model : simplified parameters as indicators of environmental performance ». In : *Fourth European conference solar energy in architecture and urban planning*. Bedford, pp. 300-305.
- BATTY, Michael (2017). « Benedikt's challenge : Reconstructing the whole from the parts ». In : *Environment and Planning B : Urban Analytics and City Science* 44.3, p. 395-397. ISSN : 23998091. DOI : 10.1177/2399808317703876.
- BELGACEM, Houda, T. LEDUC et Marjorie MUSY (2018). « Mesure et représentation cartographique de l'impression de confinement d'un piéton immergé dans la ville ». In : *SHS Web of Conferences* 47, p. 01011. DOI : 10.1051/shsconf/20184701011.
- BENEDIKT, M. L. (1979). « To take hold of space : isovists and isovist fields ». In : *Environment and Planning B : Planning and Design* 6.1, p. 47-65.
- BENTLY, Ian et al. (1985). *Responsive environments : A manual for designers*. Elsevier Ltd, p. 152. ISBN : 0750605669.

- BERANEK, W. J. (1984a). « Wind Environment around Building Configurations ». In : *Heron* 29.1, p. 33-70. URL : <http://heronjournal.nl/29-1/2.pdf>.
- (1984b). *Wind environment around single buildings of rectangular shape*. Delft, The Netherlands.
- BERNABÉ, Anne et al. (2013). « Classification automatique des tissus urbains par la méthode des nuées dynamiques ». In : *31emes rencontres universitaires de l'AUGC*. Cachan, France, p. 11. URL : <http://augc2013.ens-cachan.fr/Data/Articles/Contribution1150.pdf>.
- BERNARD, Jérémy et al. (juil. 2018). « Sky View Factor Calculation in Urban Context : Computational Performance and Accuracy Analysis of Two Open and Free GIS Tools ». In : *Climate* 6.3, p. 60. ISSN : 2225-1154. DOI : 10.3390/cli6030060. URL : <http://www.mdpi.com/2225-1154/6/3/60>.
- BLOCKEN, Bert (juin 2014). « 50 years of Computational Wind Engineering : Past, present and future ». In : *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 129, p. 69-102. ISSN : 01676105. DOI : 10.1016/j.jweia.2014.03.008. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016761051400052X>.
- (2015). « Computational Fluid Dynamics for urban physics : Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations ». In : *Building and Environment* 91. ISSN : 03601323. DOI : 10.1016/j.buildenv.2015.02.015.
- BLOCKEN, Bert et Jan CARMELIET (2004). « Pedestrian Wind Environment around Buildings : Literature Review and Practical Examples ». In : *Journal of Thermal Envelope and Building Science* 28.2, p. 107-159. ISSN : 1097-1963. DOI : 10.1177/1097196304044396. URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1097196304044396>.
- BORIE, Alain et François DENIEUL (1984). *Méthode d'analyse morphologique des tissus urbains traditionnels*. Rapp. tech. Paris, France : UNESCO - Studies et documents on the cultural heritage, 3 [24], p. 118. URL : <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000062310>.
- BOTTEMA, Marcel (1993). « Wind climate and urban geometry ». Thèse de doct. Technische Universiteit Eindhoven, p. 213.
- (1997). « Urban roughness modelling in relation to pollutant dispersion ». In : *Atmospheric Environment*. ISSN : 13522310. DOI : 10.1016/S1352-2310(97)00117-9.
- BOUKETTA, Samira et Y. BOUCHAHM (2011). « L'Effet De La Géométrie Urbaine Sur L'Écoulement Du Vent Et La Ventilation Naturelle Extérieure ». In : 15.March, p. 639-659.

- BOUSSOUALIM, Aïcha (2002). « Contribution à la caractérisation de l'impact et de l'incidence du microclimat sur l'usage et les activités en espace public extérieur - Etude de cas à Blagnac ». Thèse de doct. Ecole polytechnique de l'Université de Nantes. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01083203>.
- BOUYER, Julien (2009). « Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments ». Thèse de doct. Université de Nantes, ED SPIGA, p. 325.
- BOZONNET, Emmanuel, Rafik BELARBI et Francis ALLARD (2006). « Modeling air flows around buildings in urban environment ». In : *International Workshop on Energy Performance and Environmental Quality of Buildings* July, p. 1-6.
- CARMONA, M. (2010). *Public Places, Urban Spaces : The Dimensions of Urban Design*. Architectural Press. URL : <https://books.google.fr/books?id=YttMnQEACAAJ>.
- CARMONA, M. et al. (2012). *Urban spaces. The dimensions of urban design*. ISBN : 0750666560.
- CORBUSIER, Le (1946). *Manière de penser l'urbanisme*. Boulogne-sur-Seine, France : Éditions de l'Architecture d'Aujourd'hui, Collection ASCORAL.
- COUCLELIS, Helen (1992). « People Manipulate Objects (but Cultivate Fields) : Beyond the Raster-Vector Debate in GIS ». In : *Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space, International Conference GIS - From Space to Territory : Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning*. Sous la dir. d'Andrew U FRANK, Irene CAMPARI et Ubaldo FORMENTINI. Lecture Notes in Computer Science. Pisa, Italy : Springer, p. 65-77.
- DAVIS, Larry S. et M. L. BENEDIKT (sept. 1979). « Computational models of space : Isovists and isovist fields ». In : *Computer Graphics and Image Processing* 11.1, p. 49-72. ISSN : 0146664X. DOI : 10.1016/0146-664X(79)90076-5. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0146664X79900765>.
- DEHLOUM, Linda (2011). « Simulation numérique de l'écoulement du vent dans un site urbain ». Mémoire de Magister en énergétique. Université Des Sciences et de la Technologie Mohammed Boudiaf, Oran, Algérie.
- DUPAGNE, Albert et Jacques TELLER (1999). « La place Saint-Lambert et l'œil liégeois ». In : *Annales du bâtiment et des travaux publics*. URL : <http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/28949>.
- ELLIN, Nan (juin 2006). *Integral Urbanism*. New York : Routledge, p. 184. ISBN : 9780203956854. DOI : 10.4324/9780203956854. URL : <https://www.taylorfrancis.com/books/9780203956854>.

- EWING, Reid et al. (2006). « Identifying and Measuring Urban Design Qualities Related to Walkability ». In : *Journal of Physical Activity and Health* 3.Suppl 1, p. 223-240. ISSN : 15433080. DOI : 10.13072/midss.126. URL : http://forum.activelivingresearch.com/sites/default/files/JPAH%7B%5C_%7D15%7B%5C_%7DEwing.pdf.
- FLAMAND, O (2003). « Actions du vent sur les ouvrages - Effets dynamiques ». In :
- FRANKE, Jörg, Antti HELLSTEN et al. (2007). *Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment*. COST Actio. Hamburg, Germany, p. 52. ISBN : 3-00-018312-4. URL : <http://theairshed.com/pdf/COST%20732%20Best%20Practice%20Guideline%20May%202007.pdf>.
- FRANKE, Jörg, C HIRSCH et al. (2004). « Recommendations on the use of CFD in wind engineering ». In : *COST Action C14 : Impact of Wind and Storm on City Life and Urban Environment*, p. 1-11.
- FRY, Tony (août 2014). *City Futures in the Age of a Changing Climate*. London (UK) : Routledge, p. 218. ISBN : 9781315765969. DOI : 10.4324/9781315765969. URL : <https://www.taylorfrancis.com/books/9781315765969>.
- GÁL, Tamás, F. LINDBERG et J. UNGER (jan. 2009). « Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases : comparison and application to urban climate ». In : *Theoretical and Applied Climatology* 95.1-2, p. 111-123. ISSN : 0177-798X. DOI : 10.1007/s00704-007-0362-9. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s00704-007-0362-9>.
- GANDEMER, J. et A. GUYOT (1976). *Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti. Guide méthodologique et conseils pratiques*. Technique. Paris : Direction de l'aménagement foncier et de l'urbanisme (DAFU), 130 p.
- (1981). *La protection contre le vent : aérodynamique des brise-vent et conseils pratiques*. CSTB, p. 132. URL : <https://books.google.fr/books?id=3uNeGwAACAAJ>.
- HAMAINA, Rachid (2013). « Enrichissement des référentiels géographiques pour la caractérisation morphologique des tissus urbains ». Thèse de doctorat (PhD Thesis). Ecole Centrale de Nantes, ED SPIGA.
- HARVEY, Chester et al. (oct. 2015). « Effects of skeletal streetscape design on perceived safety ». In : *Landscape and Urban Planning* 142, p. 18-28. ISSN : 01692046. DOI : 10.1016/j.landurbplan.2015.05.007. URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169204615001139>.
- HATZFELD, Hélène (2012). « La place et le sens du vide dans la composition urbaine au XXe siècle ». In : *137e congrès du Comité des travaux his-*

- toriques et scientifiques (Cths)*. Tours, France. URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01620468>.
- HÉMON, Pascal (2004). *Vibrations couplées avec le vent*. Rapp. tech., p. 62.
- HILLIER, B. et J. HANSON (1988). *The social logic of space*. Cambridge University Press. ISBN : 0521367840.
- JOHANSSON, Erik (2006). « Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate : A study in Fez, Morocco ». In : *Building and Environment* 41.10, p. 1326-1338. ISSN : 03601323. DOI : 10.1016/j.buildenv.2005.05.022.
- JOHANSSON, Lars (2012). « Modelling near ground wind speed in urban environments using high-resolution digital surface models and statistical methods ». In :
- JOHNSON, Glenn T. et Ian D. WATSON (fév. 1984). « The Determination of View-Factors in Urban Canyons ». In : *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23.2, p. 329-335. ISSN : 0733-3021. DOI : 10.1175/1520-0450(1984)023<0329:TDOVFI>2.0.CO;2. URL : <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0450%7B%5C%7D281984%7B%5C%7D29023%7B%5C%7D3C0329%7B%5C%7D3ATDOVFI%7B%5C%7D3E2.0.CO%7B%5C%7D3B2>.
- KUBOTA, Tetsu et al. (2008). « Wind tunnel tests on the relationship between building density and pedestrian-level wind velocity : Development of guidelines for realizing acceptable wind environment in residential neighborhoods ». In : *Building and Environment* 43.10, p. 1699-1708. ISSN : 03601323. DOI : 10.1016/j.buildenv.2007.10.015.
- KUSHOL, Abu Syed Sufian et al. (2013). « Effect of Street Morphology on Microclimate in Residential Areas Following FAR Rule in Dhaka City ». In : *29th Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future, Munich, Germany (PLEA 2013)*. Munich, Germany.
- LEBORGNE, Aurélie (2018). « Appariement de formes basé sur une squelettisation hiérarchique (HAL Id : tel-01694036) ». In :
- LEDUC, T. et Kevin HARTWELL (déc. 2018). « The automatic classification of urban open space by a pattern-matching method of the viewshed at intersections ». In : *Environment and Planning B : Urban Analytics and City Science*. ISSN : 2399-8083. DOI : 10.1177/2399808318816994. URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/2399808318816994>.
- LEDUC, T. et Philippe WOLOSZYN (2015). « Pour une approche du paysage sonore par analogie au visuel - si le son donne à voir, le champ de vision donne-t-il à entendre? » In : *Soundspaces : Espaces, expériences et politiques du sonore*. Sous la dir. de Claire GUIU et al. Rennes, France : Presses Universitaires de Rennes, p. 241-250. ISBN : 978-2-7535-3460-5. URL : <http://www.pur-editions.fr/detail.php?idOuv=3696>.

- LÉVY, Albert (2005). « Formes urbaines et significations : revisiter la morphologie urbaine ». In : *Espaces et sociétés* 122.4, p. 25. ISSN : 0014-0481. DOI : 10.3917/esp.122.0025.
- LYNCH, Kevin Andrew (1960). *The image of the city*. Cambridge : MIT Press.
- MACDONALD, R. W., R. F. GRIFFITHS et D. J. HALL (1998). « An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays ». In : *Atmospheric Environment* 32.11, p. 1857-1864. ISSN : 13522310. DOI : 10.1016/S1352-2310(97)00403-2.
- MARSHALL, Stephen (2005). *Streets & Patterns*. Oxon (UK) : Spon Press, p. 333. ISBN : 0415317509.
- MERLIER, Lucie (2015). « Interactions between urban structures and air flows : Numerical study of the effects of urban morphology on the building wind environment and the related building energy loads ». Thèse de doct. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA Lyon), p. 412. URL : <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2015ISAL0070/these.pdf>.
- MOCHIDA, A. et al. (avr. 2002). « Comparison of various revised k- ϵ models and LES applied to flow around a high-rise building model.pdf ». In : *Wind and Structures* 5.2_3_4, p. 1-18. ISSN : 1226-6116. DOI : 10.12989/was.2002.5.2_3_4.227. URL : <http://koreascience.or.kr/journal/view.jsp?kj=KJKHCF%7B%5C%7Dpy=2002%7B%5C%7Dvnc=v5n2%7B%5C%7D3%7B%5C%7D4%7B%5C%7Dsp=227>.
- MONFRONT, Claire et Benjamin TAVEAU (2014). *La densification de la ville : processus de répartition du plein et du vide*. Rapp. tech.
- MOONEN, Peter et al. (sept. 2012). « Urban Physics : Effect of the microclimate on comfort, health and energy demand ». In : *Frontiers of Architectural Research* 1.3, p. 197-228. ISSN : 20952635. DOI : 10.1016/j.foar.2012.05.002. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.foar.2012.05.002>.
- NG, Edward, Hyuk-Hien WONG et Meiqi HAN (2006). « Permeability , porosity and better ventilated design for high density cities ». In : *Plea 2006 - The 23th Conference on Passive and Low Energy Architecture* September, p. 6-8. URL : <https://www.researchgate.net/publication/255574838>.
- OKE, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates*. Routledge. ISBN : 9780415043199. URL : https://books.google.fr/books?id=K%5C_2dW7crfVIC.
- (mar. 1988). « Street design and urban canopy layer climate ». In : *Energy and Buildings* 11.1-3, p. 103-113. ISSN : 03787788. DOI : 10.1016/0378-7788(88)90026-6. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0378778888900266>.

- OKE, T. R. (2006). *Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites*. Rapp. tech. World Meteorological Organization - Instruments et observing methods report No. 81. URL : https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo-td_1250.pdf.
- PEPONIS, John et al. (1997). « On the description of shape and spatial configuration inside buildings : convex partitions and their local properties ». In : *Environment and Planning B : Planning and Design* 24.5, p. 761-781.
- PIOMBINI, Arnaud (2013). « Contexte spatial des ambiances urbaines et usage des lieux ». In : *Ambiances [En ligne], Environnement - Modélisation - Caractérisation*, p. 14. ISSN : 2266-839X. DOI : 10.4000/ambiances.261. URL : <http://ambiances.revues.org/261>.
- RATTI, C. (août 2004). « Space Syntax : Some Inconsistencies ». In : *Environment and Planning B : Planning and Design* 31.4, p. 487-499. ISSN : 0265-8135. DOI : 10.1068/b3019. URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1068/b3019>.
- RENAUDIE, Serge (2011). *La ville par le vide*. movitcity. T. 33. Ivry sur Seine, France : Movitcity édition, p. 71. ISBN : 978-2-9539873-0-0.
- RICHARD, M. Aynsley et al. (sept. 2011). *Urban aerodynamics : Wind engineering for urban planners and designers*. T. 70. Reston, Virginia, USA : American Society of Civil Engineers, p. 1-63. ISBN : 9780784476369. DOI : 10.1061/9780784411797. URL : <http://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784411797>.
- RODLER, A. et T. LEDUC (juin 2019). « Local climate zone approach on local and micro scales : Dividing the urban open space ». In : *Urban Climate* 28, p. 100457. ISSN : 22120955. DOI : 10.1016/j.uclim.2019.100457. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212095518303353>.
- SANTAMOURIS, M. et D.N. ASIMAKOPOULOS (2001). *Energy and Climate in the Urban Built Environment*. BEST (Buildings Energy and Solar Technology) Series. James & James. ISBN : 9781873936900. URL : <https://books.google.fr/books?id=8XyBZEFtiUC>.
- SARRADIN, François (déc. 2004). « Analyse morphologique des espaces ouverts urbains le long de parcours ». Thèse de doctorat (PhD Thesis). laboratoire CERMA, école nationale supérieure d'architecture de Nantes, France : Université de Nantes, ED MTGC.
- SCHÖN, Donald A. (mar. 2017). *The Reflective Practitioner*. Routledge, p. 76. ISBN : 9781315237473. DOI : 10.4324/9781315237473. URL : <https://www.taylorfrancis.com/books/9781315237473>.
- SHISHEGAR, Nastaran (2013). « Street Design and Urban Microclimate : Analyzing the Effects of Street Geometry and Orientation on Airflow and Solar Access in Urban Canyons ». In : *Journal of Clean Energy Techno-*

- logies* January 2013, p. 52-56. ISSN : 1793821X. DOI : 10.7763/jocet.2013.v1.13.
- SITTE, Camillo (1980). *L'art de bâtir les villes*. Editions du Seuil, p. 190. ISBN : 2-02-029327-7.
- SOUZA, Léa C.L., Daniel S. RODRIGUES et José F.G. MENDES (2003). « Sky view factors estimation using a 3D-GIS extension ». In : *8th International IBPSA Conference*. 2001, p. 1227-1234. URL : <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/2206>.
- STATHOPOULOS, Ted (2006). « Pedestrian level winds and outdoor human comfort ». In : *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 94.11, p. 769-780. ISSN : 01676105. DOI : 10.1016/j.jweia.2006.06.011.
- STEEMERS, K., N. BAKER et C. RATTI (1997). « City texture and microclimate ». In : 3, pp. 25-49.
- STEWART, I. D. et T. R. OKE (déc. 2012). « Local Climate Zones for Urban Temperature Studies ». In : *Bulletin of the American Meteorological Society* 93.12, p. 1879-1900. ISSN : 0003-0007. DOI : 10.1175/BAMS-D-11-00019.1. URL : <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>.
- STEYN, D.G. (1980). « The calculation of view factors from fisheye-lens photographs : Research note ». In : *Atmosphere-Ocean* 18.3, p. 254-258. ISSN : 0705-5900. DOI : 10.1080/07055900.1980.9649091.
- TELLER, Jacques (2001). « La régulation morphologique dans le cadre du projet urbain. Spécification d'instruments informatiques destinés à supporter les modes de régulation performantiels ». Thèse de doct. Université de Liège, Belgique, p. 255. URL : <http://hdl.handle.net/2268/18578>.
- TELLER, Jacques et S. AZAR (jan. 2001). « Townscope II—A computer system to support solar access decision-making ». In : *Solar Energy* 70.3, p. 187-200. ISSN : 0038092X. DOI : 10.1016/S0038-092X(00)00097-9. URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X00000979>.
- TOMINAGA, Yoshihide et al. (oct. 2008). « AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings ». In : *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96.10-11, p. 1749-1761. ISSN : 01676105. DOI : 10.1016/j.jweia.2008.02.058. URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167610508000445>.
- TOPARLAR, Y. et al. (2017). *A review on the CFD analysis of urban microclimate*. DOI : 10.1016/j.rser.2017.05.248.
- TRANCIK, Roger. (1986). *Finding Lost Space : Theories of Urban Design*. DOI : 10.3368/lj.7.1.80.

- WANG, Biao (2015). « Les Impacts de la Morphologie Urbaine sur le Vent : Performance énergétique éolienne à l'échelle du quartier ». Thèse de doct. Université de Toulouse, p. 265.
- YANG, Wei et al. (2008). « Influences of equilibrium atmosphere boundary layer and turbulence parameter on wind loads of low-rise buildings ». In : *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96.10-11, p. 2080-2092. ISSN : 01676105. DOI : 10.1016/j.jweia.2008.02.014.
- YOSHIE, R et al. (2007). « Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan ARTICLE IN PRESS ». In : *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 95, p. 1551-1578. DOI : 10.1016/j.jweia.2007.02.023. URL : www.elsevier.com/locate/jweia.
- ZEISEL, J. et J.P. EBERHARD (2006). *Inquiry by Design : Environment/behavior/neuroscience in Architecture, Interiors, Landscape, and Planning*. W.W. Norton. ISBN : 9780393731842. URL : <https://books.google.fr/books?id=voeTQgAACAAJ>.
- ZHANG, Aishe, Cuilan GAO et Ling ZHANG (2005). « Numerical simulation of the wind field around different building arrangements ». In : *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 93.12, p. 891-904. ISSN : 01676105. DOI : 10.1016/j.jweia.2005.09.001.
- ZHANG, Xuelin et al. (2017). « Evaluation of pedestrian wind comfort near 'lift-up' buildings with different aspect ratios and central core modifications ». In : *Building and Environment* 124. ISSN : 03601323. DOI : 10.1016/j.buildenv.2017.08.012.

Résumé

La prise en considération des enjeux climatiques dans une phase préliminaire de la conception urbaine exige des outils d'aide à la conception, faciles à utiliser, rapides à exécuter, en cohérence avec le fonctionnement itératif de la conception. L'objectif de cette thèse est ainsi de produire un outil simple à utiliser en phase de *design* urbain permettant la prédiction de l'écoulement du vent, à une échelle locale et à hauteur de piéton, à partir des caractéristiques morphologiques urbaines.

Pour satisfaire cet objectif nous nous attachons dans un premier temps à produire une lecture de la forme urbaine adaptée aux problématiques de vent dans la ville. Cette lecture se fait via la construction d'un squelette du vide urbain. Ce squelette est ensuite rendu porteur d'informations qui viennent documenter les différentes composantes urbaines et leurs caractéristiques morphologiques. Pour cela, nous avons sélectionné plusieurs dizaines d'indicateurs morphologiques calculés à différentes échelles, susceptibles de prendre en compte des effets du vent en ville.

Au final, nous disposons ainsi d'un outil qui permet à la fois de lire la ville dans une approche physiologique qui divise les composantes urbaines en systèmes d'éléments unitaires de même nature et d'embarquer des informations morphologiques. Cette approche dynamique pour parcourir le vide urbain est aussi une approche d'analyse orientée champs pour capter et mesurer l'espace urbain au niveau d'un ensemble de capteurs virtuels ponctuels issus de l'échantillonnage du squelette. La démonstration de l'efficacité des outils et méthodes proposés est faite pour trois types d'applications.

La première montre que le squelette informé peut être utilisé pour inférer une information à caractère global à partir de capteurs locaux. Nous avons ainsi produit des profils et signatures morphologiques de quartiers qui ouvrent des perspectives intéressantes pour établir des typologies de quartiers relativement à leur forme, non plus à partir d'indicateurs moyens mais à partir de profils de distribution des valeurs des indicateurs.

Dans la seconde application, nous montrons qu'il est possible, grâce à l'outil et aux indicateurs dynamiques créés, distinguer différentes zones du vide urbain (des zones de jonction, des zones de collection, des zones de canalisation) et identifier les impasses et autres anfractuosités de l'espace.

Enfin dans la troisième application, nous montrons que le squelette informé et sa capacité d'analyse statique et dynamique de la forme peuvent être exploitées pour nous renseigner sur la distribution du vent en ville. La tentative de production d'une carte de la variation de nos indicateurs susceptibles de représenter la vitesse du vent, à partir de l'information morphologique, montre qu'appliquer une distinction entre les zones de canalisation ou les

zones de collection apporte un plus dans l'analyse du vent en ville. En effet, les indicateurs les plus à même de représenter les variations de la vitesse de vent ne sont pas forcément les mêmes dans ces zones.

Mots-clés

Analyse statique de la forme, analyse dynamique de la forme, squelette informé, corrélation forme-vent, analyse orientée champs, vide urbain.

Abstract

Considering climate issues in an early phase of urban design requires design tools that are easy to use, quick to execute, and in line with the iterative process of designing. This thesis aims to create a simple tool to be used during the urban design phase to predict wind flows on a local scale and at the pedestrian level, based on urban morphological characteristics. To meet this objective, we first provided a reading of urban forms that was adapted to the question of wind in the city. This reading occurs through the construction of an urban vacuum skeleton. The skeleton then carries information to document the different urban components and their morphological characteristics. To this end, we selected a series of morphological indicators that were calculated on different scales and are likely to take into account the wind effects in the city. Ultimately, we thus have a tool that allows both to read the city through a physiological approach dividing the urban components into systems of unitary elements of the same nature, and to embed the morphological information. The dynamic approach to cross the urban vacuum is also a field-oriented analytical approach to capture and measure the urban space at the level of a set of punctual virtual sensors whose skeleton is sampled. Demonstrating the efficiency of the tools and methods proposed was adapted to three types of applications. The first demonstrates that the informed skeleton can be used to infer global information from local sensors. Therefore, we have produced the profiles and morphological signatures of neighbourhoods that open up interesting prospects to establish typologies of neighbourhoods according to their form, no longer based on average indicators but on profiles of value distribution of the indicators. The second application demonstrates that the tool and the dynamic indicators created can help to distinguish different areas of urban vacuum (junction, collection, channelling) and to identify dead-ends and other anfractuosités of the space. Lastly, the third application shows that the informed skeleton and its capability of static and dynamic analysis of the form can be used to learn about the wind distribution in the city. The attempt to generate a map on the variation of the indicators that can represent the velocity of the wind, based on the morphological information, shows that applying a distinction between channelling areas and collection areas represents an added value to analyse the wind in the city. Indeed, the indicators that are the most likely to represent variations in wind velocity are not necessarily the same in these areas.

Keywords

Static analysis of the urban form, dynamic analysis of the urban form, informed skeleton, form-wind correlation, field oriented analysis, urban void.

Titre : Génération d'un squelette informé et application à l'étude aéraulique de la forme urbaine.

Mots clés: Analyse statique de la forme, analyse dynamique de la forme, vide urbain.

Résumé: La prise en considération des enjeux climatiques dans une phase préliminaire de la conception urbaine exige des outils d'aide à la conception, faciles à utiliser, rapides à exécuter, en harmonie avec le fonctionnement itératif de la conception. L'objectif de cette thèse est ainsi de produire un outil simple à utiliser en phase de design urbain permettant la prédiction de l'écoulement du vent, à une échelle locale et à hauteur de piéton, à partir des caractéristiques morphologiques urbaines. Cette lecture se fait via la construction d'un squelette du vide urbain. Ce squelette est ensuite rendu porteur d'informations qui viennent documenter les différentes composantes urbaines et leurs caractéristiques morphologiques à différentes échelles.

Cette approche dynamique pour parcourir le vide urbain est aussi une approche d'analyse orientée champs pour capter et mesurer l'espace urbain au niveau d'un ensemble de capteurs virtuels ponctuels issus de l'échantillonnage du squelette. La démonstration de l'efficience des outils et méthodes proposés est faite pour trois types d'applications. La première est une production de profils de signatures morphologiques de quartiers. La seconde est une détection des différentes zones du vide urbain (rues, croisement de rues, places...). La troisième montre la capacité du squelette à renseigner sur la distribution du vent en ville

Title : Generation of an enriched skeleton and its application to the aeraulic study of the urban form.

Keywords: Static form analysis, dynamic form analysis, urban void.

Abstract: Considering climate issues in an early phase of urban design requires design tools that are easy to use, quick to execute, and in line with the iterative process of designing. This thesis aims to create a simple tool to be used during the urban design phase to predict wind flows on a local scale and at the pedestrian level, based on urban morphological characteristics. This reading occurs through the construction of an urban vacuum skeleton. The skeleton then carries information to document the different urban components and their morphological characteristics at different levels.

The dynamic approach to cross the urban vacuum is also a field-oriented analytical approach to capture and measure the urban space at the level of a set of punctual virtual sensors whose skeleton is sampled. Demonstrating the efficiency of the tools and methods proposed was adapted to three types of applications. The first is a production of profiles of morphological signatures of neighborhoods. The second is a detection of the different areas of the urban void (streets, crossroads, squares...). The third shows the skeleton's ability to provide information to learn about wind distribution in the city.