

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE
EN GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. Sc A.

PAR
Pierre-Alexandre GUILLEMETTE

L'ANALYSE FRACTALE : UN OUTIL D'ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE

MONTREAL, LE 11 AOÛT 2016



Pierre-Alexandre Guillemette, 2016



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Robert Hausler, directeur de mémoire
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Fausto Errico, président du jury
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Mathias Glaus, membre du jury
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 31 MAI 2016

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier mes collègues de l'université qui ont su m'épauler autant dans le journal étudiant, les comités de développement durable, le club Énergie ÉTS ou le laboratoire STEPPE. J'aimerais remercier mon directeur le Professeur Robert Hausler qui m'a donné une approche de recherche efficace et pertinente, amélioré ma pensée critique et mon éthique de recherche. Un gros merci à Maria Cendan qui m'a donné un bon coup de main, notamment pour toutes mes demandes de financement. Je voudrais également remercier le Professeur Jérôme Chénal et de tous les membres du Laboratoire CEAT pour leur accueil et leur support durant l'ensemble de mon parcours académique suivant mon séjour à l'ÉPFL. Sans oublier les nombreux professeurs et professionnels qui m'ont gracieusement donné de leur temps et énergie pour m'apprendre des choses, en particulier Mathias Glaus, Martin Schuler et Mustapha Frei. Finalement, j'aimerais remercier, Recy-Québec, l'ÉTS et L'AÉÉTS pour les bourses qui m'ont permis de faire d'avantages de conférences pendant ma maîtrise.

De plus, j'aimerais remercier chacune des personnes avec qui j'ai passé des moments dans ma vie, elles ont fait en sorte de m'influencer sur le résultat de mon parcours de vie qui m'a mené à ce mémoire. Toutefois, j'aimerais remercier d'avantages certaines personnes qui ont influencé d'une manière plus profonde le contenu de ce mémoire. Tout d'abord ma famille, pour avoir développé mon esprit critique et cultivé l'ouverture sur l'autre. Et également du support inconditionnel des différents membres de ma famille durant mon parcours. On dit que nos amis sont la famille que l'on choisit, j'aimerais également remercier tous mes amis de m'accompagner. J'aimerais également remercier Catherine Lafontaine pour m'avoir montré comment poursuivre mes études aux cycles supérieurs avec succès, Eugénie Potvin pour le partage des connaissances et références en biologie et en philosophie des systèmes complexes ainsi que Marc-André Gauthier qui m'a montré la voie vers la géométrie fractale. Merci tout le monde.

L'ANALYSE FRACTALE : UN OUTIL D'ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE

Pierre-Alexandre GUILLEMETTE

RÉSUMÉ

La recherche d'une société plus soutenable est un exercice complexe qui demande un changement de paradigme dans toutes les sphères de la société. La compréhension et le développement de nouvelles organisations spatiales des systèmes urbains sont un axe majeur de la transition vers un monde plus soutenable. La complexification des systèmes urbains par une densification et une approche multifonctionnelle est considérée comme un élément important du développement de villes plus soutenables. La nature géométrique complexe, non euclidienne des villes vient toutefois généralement limiter les capacités d'optimisation spatiale de ces systèmes. Il est ainsi difficile de créer des liens entre les divers projets individuels et les coordonner en système pour arriver à réduire l'impact environnemental des activités humaines.

Pour évaluer la complexité des organisations spatiales des trames urbaines, les outils issus de la géométrie fractale ont été appliqués aux arrondissements Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension et Rivière-Des-Prairies à Montréal. Ils ont également été appliqués en Suisse sur 4 communes : Lausanne, Ecublens, Crissier et Jouxens-Mézery. Les résultats permettent de comparer différentes informations sur un ou plusieurs territoires. Une dimension fractale plus élevée indique une occupation du territoire plus grande. Les mesures de la lacunarité viennent compléter les mesures en décrivant l'homogénéité. La valeur de l'écart-type de la lacunarité indique la distribution de l'homogénéité. La combinaison de l'étude des systèmes de transports Lausannois et de la morphologie urbaine correspondante a ainsi permis de voir les relations qui existent entre la forme urbaine et les systèmes sociotechniques. Trois différentes niches sociotechniques urbaines ont pu être identifiées dans l'agglomération Lausannoise. Les communes périphériques avaient une lacunarité et des écarts types plus importants que les quartiers centraux.

L'analyse fractale permet d'effectuer, sur une base quantitative, une évaluation de l'hétérogénéité des composantes urbaines. L'hétérogénéité est un facteur de qualité de vie urbaine, de soutenabilité et de développement des symbioses industrielles. En évaluant la complexité du système, elle pourrait évaluer la possibilité de créer des relations entre les acteurs d'un milieu sur de multiples échelles dans les sphères sociales, écologique et technique. Elle est en mesure de faire évoluer les méthodes de planification urbaine centralisée qui laissent peu de place à des symbioses auto-organisées. Les fractales permettent de mesurer les échelles des fonctions urbaines, Elles jouent le rôle d'indicateurs systémiques sur la forme urbaine. Il s'agit donc d'un outil d'étude, de planification et de gestion des formes et des métabolismes urbains. L'analyse fractale permet de gérer la ville comme un écosystème auto-organisé, en reliant les échelles métaboliques des systèmes complexes, sur une base quantitative.

VIII

Mots clés : géométrie fractale, complexité, systèmes urbains, écologie industrielle, hétérogénéité

THE FRACTAL ANALYSIS: AN INDUSTRIAL ECOLOGY TOOL

Pierre-Alexandre GUILLEMETTE

ABSTRACT

The evolution of the human societies toward a more sustainable paradigm is a complex problematic that requires a paradigm shift through societies. The understanding and the development of new urban systems forms is one of the key element of a transition toward a more sustainable world. The complexification of the urban system is considered as a key element in the development of a more sustainable city. The complex geometric nature of these systems limits our capacity to optimize them. It is then difficult to create the multiple links between the individual projects in order to coordinate them to effectively reduce the global environmental impacts of human activities.

In order to assess the complexity of the spatial organization of the urban forms, the tools developed with fractal geometry has been applied to two Montreal neighborhoods: Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension and Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles. They have been also applied to 4 cities in Switzerland: Lausanne, Ecublens, Crissier and Jouxten-Mézery. The results characterized and differentiate the spatial distribution of different information on different territories with a triangulation method. The fractal dimension gives the required information about the density. The lacunarity gives the information of the homogeneity and the standard deviation of the lacunarity gives the information of the clustering of the measured data. The combination of the studies of the Lausanne transport system and corresponding urban morphology with the fractal analysis has showed the relations between the urban form and the sociotechnical systems. Three different sociotechnical niches have been identified within the Lausanne area.

The fractal analysis can, on a quantitative basis, assess the heterogeneity of the urban components. Heterogeneity is a key element of the quality of urban life, its sustainability and a component of the industrial symbiosis development. The fractal analysis could be used to assess the complexity of the human systems in order to develop relations between the human, technical and ecological dimensions of the urban system component on different scales. The fractal geometry could be used to make evolve the Euclidian urban planning toward a local stakeholder self-organizing managed process. The fractal analysis can allow the different decisions making at different scale to be done, by measuring their global impact on the urban form with systemic indicators. It is a study, planning and decision making tool that could be used for the management of the urban metabolism. The fractal analysis could make the city more sustainable by linking the different metabolic scales of the different holarchic systems that forms the city on a quantitative basis.

Keywords: Fractals geometry, Complexity, urban systems, industrial ecology, heterogeneity

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	5
1.1 Systèmes urbains	5
1.1.1 Processus urbains	5
1.1.2 Approches actuelles	9
1.1.2.1 Problématiques	Erreur ! Signet non défini.
1.1.2.2 Solutions prônées	11
1.1.2.3 Limites et opportunités de la ville durable	14
1.2 Écologie industrielle	21
1.2.1 Définition et perspective historique de l'écologie industrielle	21
1.2.2 Caractérisation des outils de l'écologie industrielle	25
1.2.2.1 Outils classiques de l'écologie industrielle	25
1.2.2.2 Symbioses industrielles	30
1.2.2.3 Nouvelles problématiques de l'écologie industrielle	35
1.3 Systèmes complexes ouverts et auto-organisés holarchiques	38
1.3.1 Axes d'études quantitatifs des systèmes complexes	43
1.3.2 Dimensions d'étude des systèmes complexes	44
1.4 Géométrie fractale	47
1.4.1 Définition de la géométrie fractale	48
1.4.1.1 Origine de la géométrie fractale	48
1.4.1.2 Confusion entourant la nature de la géométrie fractale	49
1.4.1.3 Mesure de la dimension fractale	51
1.4.2 Mesure de la lacunarité	53
1.4.3 Calcul de la lacunarité	55
1.4.4 Champs d'application de la géométrie fractale	58
1.4.4.1 Applications de la dimension fractale	58
1.4.4.2 Applications de la lacunarité	61
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE	63
2.1 Analyse fractale	63
2.2 Cas montréalais	64
2.3 Cas suisse	67
2.3.1 Systèmes de transports et morphologie urbaine	71
2.4 Étude de sensibilité de la dimension fractale	73
2.4.1 Effet de l'angle des bâtiments sur la mesure	74
2.4.2 Effet de la forme des bâtiments sur la mesure	75
2.4.3 Impact des limites des dimensions des boîtes utilisées sur le calcul de la dimension fractale	76

CHAPITRE 3	PRÉSENTATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.....	79
3.1	Étude de cas montréalaise.....	79
3.1.1	Fonctions d'usage résidentielle.....	81
3.1.2	Fonctions d'usage institutionnelle	81
3.1.3	Catégories d'usage avec une composante industrielle.....	82
3.1.1	Catégories d'usage avec une composante commerciale	84
3.2	Étude de cas suisse.....	85
3.2.1	Analyse comparative des agglomérations Lausannoises	86
3.2.1.1	Zones d'affectations résidentielles mixtes, historiques et villages.....	87
3.2.1.2	Zones d'affectation industrielles et commerciales.....	90
3.2.1.3	Zones d'affectations installations publiques, sports et loisirs et verdure et forêt	93
3.2.2	Systèmes de transports et la morphologie urbaine.....	94
3.3	Étude de sensibilité de la dimension fractale.....	104
3.3.1	Effet de l'angle des composantes d'une géométrie sur la mesure de la dimension fractale	107
3.3.2	Effet de la forme des composantes de la géométrie mesurée sur la mesure de la dimension fractale.....	109
3.3.3	Impact des ordres de grandeur considérés sur la mesure de la dimension fractale.	111
CHAPITRE 4	DISCUSSIONS.....	121
4.1	Caractérisation spatiale	122
4.2	Analyse descriptive.....	125
4.3	Design et modélisation.....	127
4.4	Gestion territoriale	134
CONCLUSION	141
ANNEXE I	CARTE DES RÈGLEMENTS D'URBANISME UTILISÉS DE L'ARRONDISSEMENT VILLERAY-SAINT-MICHEL-PARC- EXTENSION	145
ANNEXE II	CARTE DES RÈGLEMENTS D'URBANISME UTILISÉS DE L'ARRONDISSEMENT RIVIÈRE-DES-PRAIRIES-POINTES-AUX- TREMBLES.....	147
ANNEXE III	CARTES DES CATÉGORIES D'USAGES SÉGRÉGUÉES DE L'ARRONDISSEMENT VILLERAY-SAINT-MICHEL-PARC- EXTENSION	149
ANNEXE IV	CARTES DES CATÉGORIES D'USAGES SÉGRÉGUÉES DE L'ARRONDISSEMENT RIVIÈRE-DES-PRAIRIES-POINTES-AUX- TREMBLES.....	155

ANNEXE V	LÉGENDE DÉCRIVANT LES ZONES D’AFFECTATIONS	163
ANNEXE VI	CARTE DES ZONES D’AFFECTATIONS DE LA ZONE SÉLECTIONNÉE À LAUSANNE.....	165
ANNEXE VII	CARTE DES ZONES D’AFFECTATIONS DE LA ZONE SÉLECTIONNÉE À ECUBLENS	167
ANNEXE VIII	CARTE DES ZONES D’AFFECTATIONS DE LA ZONE SÉLECTIONNÉE À JOXTEN-MÉZERY	169
ANNEXE IX	CARTE DES ZONES D’AFFECTATIONS DE LA ZONE SÉLECTIONNÉE À CRISSIER.....	171
ANNEXE X	CARTES DES ZONES D’AFFECTATIONS SÉGRÉGUÉES DE LAUSANNE	173
ANNEXE XI	CARTES DES ZONES D’AFFECTATIONS SÉGRÉGUÉES D’ECUBLENS.....	179
ANNEXE XII	CARTES DES ZONES D’AFFECTATIONS SÉGRÉGUÉES DE JOXTEN-MÉZERY	187
ANNEXE XIII	CARTES DES ZONES D’AFFECTATIONS SÉGRÉGUÉES DE CRISSIER.....	195
ANNEXE XIV	RÉSULTATS DE L’ANALYSE DE SENSIBILITÉ	205
ANNEXE XV	RÉFÉRENCE : CHENAIS ET AL. 2014	207
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	225

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1	Coordonnées géographiques des échantillons69
Tableau 4.1	Lacunarité des fonctions d'usages dans les arrondissements Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension et Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles80
Tableau 4.2	Lacunarité des zones d'affectations résidentielles mixtes, historiques et villages87
Tableau 4.3	Lacunarité des zones d'affectations uniquement industrielles ou commerciales91
Tableau 4.4	Lacunarité des zones d'affectations associées aux services publiques, aux loisirs et aux lieux de verdure et forêt.....93
Tableau 4.5	Dimension des boîtes et ordre de grandeur correspondant.105
Tableau 4.6	Effet de l'angle sur la mesure de la dimension fractale.....107
Tableau 4.7	Valeur de la dimension fractale en fonction de la forme des composantes de la géométrie mesurée.....109
Tableau 4.8	Analyse comparative du calcul de la dimension fractale avec les ordres de grandeurs 1 à 9 et 2 à 9114

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Empreinte écologique en fonction de la densité des villes au Royaume-Uni	16
Figure 1.2 Types d'hétérogénéité spatiale.....	17
Figure 1.3 Formes spatiales en fonction des dynamiques de développement.....	19
Figure 1.4 Mesure de la complexité	24
Figure 1.5 Flux de matière et d'énergie dans la symbiose industrielle de Kalundborg.....	31
Figure 1.6 Structure des systèmes énergétiques holarchiques	39
Figure 1.7 Type de tissus urbains en fonction de la valeur de la dimension fractale	60
Figure 2.1 Cas étudiés dans la ville de Montréal	65
Figure 2.2 Carte réglementaire de l'échantillon initial et découpage du règlement d'usage commercial et résidentiel de l'échantillon dans l'arrondissement Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension	66
Figure 2.3 Cas étudiés dans l'agglomération Lausannoise	68
Figure 2.4 Carte réglementaire de l'échantillon initial et du découpage de la zone d'affectation mixte de forte densité de la ville de Lausanne	70
Figure 2.5 Réseau de transport routier dans l'agglomération Lausannoise	72
Figure 2.6 Réseau de transport public dans l'agglomération Lausannoise	73
Figure 2.7 Images pour l'évaluation de l'impact de l'angle des composantes sur la mesure de la dimension fractale.....	74
Figure 2.8 Images pour l'évaluation de l'impact de la forme composantes sur la mesure de la dimension fractale.....	75
Figure 2.9 Surface additive et surface soustractive pour l'évaluation de l'impact du choix des ordres de grandeur sur la mesure de la dimension fractale.....	77

Figure 3.1	Dimension fractale des catégories d'usages dans les arrondissements Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension et Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles	80
Figure 3.2	Dimension fractale et lacunarité de la catégorie d'usage institutionnelle dans les arrondissements Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension et Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles	81
Figure 3.3	Dimension fractale et lacunarité de la catégorie d'usage industrielle et commerciale dans les arrondissements Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension et Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles	83
Figure 3.4	Dimension fractale et lacunarité de la catégorie d'usage commerciale et résidentielle dans les arrondissements Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension et Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles	84
Figure 3.5	Dimension fractale des zones d'affectations résidentielles mixtes, historiques et villages.....	87
Figure 3.6	Dimension fractale des zones d'affectations uniquement industrielles ou commerciales	90
Figure 3.7	Dimension Fractale des zones d'affectations associées aux services publics, aux loisirs et aux lieux de verdure et forêts.....	93
Figure 3.8	Centralité du réseau de transport routier dans l'agglomération Lausannoise	95
Figure 3.9	Image du volume de transport en voiture dans l'agglomération lausannoise	96
Figure 3.10	Centralité du réseau de transport public dans l'agglomération lausannoise	98
Figure 3.11	Image de la qualité de la desserte et du volume de transport en commun dans l'agglomération lausannoise	99
Figure 3.12	Dimension fractale des fonctions d'usages dans les communes et gradients de centralité et de connectivité associés.....	100
Figure 3.13	Lacunarité des zones d'affectations en fonction du réseau de transport utilisé.....	102
Figure 3.14	Effet de l'angle des composantes d'une géométrie sur la mesure de la dimension fractale	108
Figure 3.15	Effet de la forme des composantes de la géométrie mesurée sur la mesure de la dimension fractale	110

Figure 3.16	Graphe des mesures de dimension fractales en fonction du choix des ordres de grandeur.....	112
Figure 3.17	Effet de la géométrie sur la mesure de la dimension fractale à 23% d'occupation de l'espace	117
Figure 3.18	Effet de la géométrie sur la mesure de la dimension fractale à 77% d'occupation de l'espace	118
Figure 3.19	Valeur de la dimension fractale en fonction du pourcentage de l'espace occupé. Valeurs moyennes utilisant les ordres de grandeur 1 à 9	119
Figure 4.1	Déploiement optimal de récifs artificiels, en fonction de la complexité du récif et des coûts d'installation dans l'étude de cas du port de Xing-Da	128
Figure 4.2	Relation entre structure holarchique, mesure de géométrie fractale et lois de puissances.....	132

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACV	Analyse de cycle de vie
Laboratoire FAST	Laboratoire Fluides, Automatique et Système thermique à l'université Paris Sud
Matlab	Langage et logiciel de programmation mathématique
PDF	Portable Document Format, format numérique de documents
DPI	Dot per Inch, résolution d'une image définie en nombres de pixels par pouce carré
MFA	Material Flow Analysis
Swisstopo	Base de données géographique fédérale suisse
Géoplanet	Outil géographique du Canton de Vaud

INTRODUCTION

L'humanité possède, avec l'aide des énergies fossiles et renouvelables, une capacité d'agir directement sur plusieurs systèmes de l'écosphère (Rockström et al, 2009; Huggett, 1999). Ces impacts sont les résultats des modes de production et de consommation qui ne sont pas soutenables. Ils sont la plus importante cause de la dégradation de l'environnement (Holden, 2004). Le modèle de développement moderne, basé sur une approche linéaire d'exploitation des ressources ne tient plus, car l'humanité n'a plus la possibilité de déplacer les impacts environnementaux sur de nouveaux territoires (Georgescu-Roegen, 1979; Frosch et Gallopoulos, 1989). Ces observations ont amené les sociétés à un changement de paradigme : une culture mondialisée intégrant la soutenabilité est en émergence afin d'assurer une prospérité continue dans le temps (Ehrlich & Ehrlich, 2013). L'humanité renouvelle ainsi ses pratiques culturelles pour augmenter sa capacité à mitiger les impacts de ses activités afin de réduire ou d'éviter les impacts d'un effondrement des systèmes naturels (Fischer-Kowalski et al, 2010; Middletown, 2012).

L'adaptation des zones urbaines à ces nouveaux paradigmes de soutenabilité est l'une des problématiques les plus importantes auquel l'humanité doit faire face. Les villes sont le moteur du dépassement des limites naturelles : elles doivent importer de grandes quantités d'énergie et de matière et en dissiper une aussi grande quantité dans l'écosphère. Il s'agit des structures dissipatives les plus importantes de l'humanité (Rees et Wackernagel, 1996, Hern, 2008). Sur le plan des activités humaines, elles jouent un rôle clé, car elles contiennent plus de la moitié de l'humanité (Nations Unies Habitat, 2008). Pour y arriver, il est nécessaire d'étudier et d'agir sur l'ordre spatial des activités humaines afin d'influencer l'émergence d'activités humaines plus soutenables (Sayed et Turner, 2012, Jabareen, 2006). Le territoire engendre les réalités, donc en modifiant la morphologie, on peut modifier le champ des possibles des habitants de ce territoire. Les solutions exactes ne sont toujours pas connues, mais une plus grande mixité et diversité des activités est un élément clé. Les villes devront donc être d'avantages hétérogènes. Toutefois, pour être un concept systémique utile, l'hétérogénéité urbaine doit être abordée sous son angle opérationnel : pour améliorer

l'aménagement des activités humaines, il faut avoir les outils pour caractériser, différencier et quantifier différents sites (Wiens, 2000). Cette caractérisation spatiale des systèmes urbains permet de connaître et comprendre les systèmes locaux pour trouver des solutions plus soutenables (Thomas et al, 2010). Les outils et méthodes actuelles ne permettent pas toutefois de bien décrire et organiser les cités. Elles manquent de complexité et elles suivent des modèles organisationnels centralisés. L'usage de nouveaux outils d'analyse pour caractériser la composition de différents territoires est donc requis (Sayed et Turner, 2012).

L'une des plus grandes difficultés associées à la caractérisation spatiale des zones urbaines repose sur leur nature géométrique : elles ne suivent pas la géométrie euclidienne (Frankhauser, 1998). Elles ne suivent pas des schémas géométriques qui suivent des dynamiques linéaires. Elles sont plutôt les résultats d'une multitude d'interactions locales sur plusieurs échelles. Les dispositions spatiales qui résultent de ces dynamiques forment une multitude de géométries complexes et hétérogènes. Elles sont donc très difficiles à décrire sur une base quantitative. La géométrie fractale répond à cette problématique, car elle permet de décrire les géométries qui ne sont pas euclidiennes (Mandelbrot, 1983). La dimension fractale et la lacunarité sont les indicateurs quantitatifs, issus de la géométrie fractale, qui ont été utilisés dans cette étude. Ils permettent de décrire l'hétérogénéité spatiale d'un ensemble géométrique en décrivant respectivement la densité et l'homogénéité des ensembles géométriques utilisés (Mandelbrot, 1983). Elle permet de quantifier l'hétérogénéité des différentes structures organisationnelles (Halley et Al, 2004). Pour connaître les usages possibles de la géométrie fractale dans l'analyse des systèmes urbains, il est nécessaire de comprendre comment la dimension fractale peut discriminer différents contextes urbains et comment elle peut mettre en évidence certaines dynamiques territoriales. Il sera alors possible d'évaluer la capacité de la géométrie fractale à mesurer et décrire différentes formes urbaines, notamment celles qui réduisent l'impact environnemental des activités humaines.

Pour qu'une méthode soit applicable, elle doit mettre en évidence, sur une base comparative, les informations pertinentes que peut présenter une analyse fractale dans les analyses spatiales. Les études de cas peuvent mettre en évidence la capacité de la géométrie fractale à

décrire certaines dynamiques et caractéristiques spatiales qui forment le tissu urbain. Si ces analyses permettent de discriminer différents territoires et de présenter certaines dynamiques territoriales sur un territoire, il est alors possible de déterminer comment les mesures calculées avec les méthodes issues de la géométrie fractale sont en mesure de fournir une contribution dans l'analyse et la planification des systèmes urbains. Deux études de cas ont été effectuées avec deux méthodes différentes d'allocation et de description du territoire. La première étude de cas compare, à l'aide des cartes de zonage réglementaire, l'aménagement fonctionnel du territoire des arrondissements montréalais Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension et Rivière-des-Prairies-Pointes-Aux-Tremble. La seconde étude de cas consiste en une analyse comparative de quatre agglomérations. Les zones d'affectations des communes de Lausanne, Ecublens, Jouxten-Mézery et Crissier ont été mesurées. Les zones d'affectation décrivent les usages fonctionnels et les caractéristiques structurelles d'une zone urbaine ou périurbaine. Une analyse du réseau de systèmes de transport de l'agglomération lausannoise a été ensuite comparée aux résultats issus de l'analyse fractale.

En plus des études de cas, une analyse de sensibilité évaluera trois paramètres qui influencent la précision de la mesure de la dimension fractale. Les analyses plus mathématiques telles que les analyses de sensibilité permettent d'évaluer la fiabilité des méthodes utilisées. Cette analyse a permis d'évaluer l'impact de l'angle et de la forme des bâtiments ainsi que l'impact du choix des paramètres de calcul sur les mesures fractales. Ces résultats ont ensuite été analysés pour comprendre comment ils pourraient être appliqués en écologie industrielle et en urbanisme.

Ces résultats ont été comparés, sur un plan théorique et opérationnel aux méthodes de planification urbaine, d'écologie industrielle et de notre compréhension des systèmes complexes. Ils permettent de comprendre la capacité de la géométrie fractale à décrire, gérer et modéliser les systèmes urbains. La géométrie fractale permet de comprendre, modéliser et au designer l'axe spatial de structures organisationnelles complexes. La gestion de ces structures permet d'organiser le système pour de réduire les impacts environnementaux des zones urbaines.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Systèmes urbains

Les systèmes urbains sont animés par des flux de matière et d'énergie qui animent les villes. Leur configuration spatiale dépend de ces multiples processus. La modification des formes urbaines engendre donc de nouveaux processus qui engendrent différents flux de matière et d'énergie. L'organisation des villes sous une approche de processus urbain est essentielle pour pouvoir développer des villes soutenables.

1.1.1 Processus urbains

Les zones urbaines modernes ont autant de définitions que d'approches utilisées pour les étudier. Elles peuvent être considérées comme des centres d'échanges économiques et sociaux, d'accumulation de savoir de richesse ou encore de pouvoir politique (Harvey, 2012). D'un point de vue historique, les villes ont émergé avec l'augmentation de la disponibilité des surplus énergétiques. Les premiers surplus alimentaires ont permis aux humains de se spécialiser et de sortir les sociétés d'un cadre uniquement agricole. Ces spécialistes se sont alors sédentarisés et regroupés pour former les premières agglomérations urbaines (Dessemontet, 2014). Avec l'agriculture et les multiples révolutions agricoles, les humains ont pu complexifier leurs activités et les villes se sont développées. La population des villes demeurait toutefois marginale en fonction de la population totale. Les villes ont toujours été dépendantes de la production alimentaire du territoire qui la supportait. Les rendements ne pouvaient supporter une plus grande population (Allen, 2003). En occident, la révolution agricole qui débuta au XVII^e siècle fit passer l'humanité d'un système d'exploitation agricole de subsistances à des exploitations commerciales. L'augmentation des rendements agricoles a alors engendré une vague d'urbanisation (Moore, 2010). Avec l'apparition des énergies fossiles et des révolutions agricoles, l'urbanisation des populations s'est accélérée et

étendue à l'ensemble du globe (Davis, 1955). La ville est donc, d'un point de vue historique, matériel et énergétique, une entité qui repose sur les surplus de son environnement.

Les dynamiques économiques, sociales et environnementales ont de leur côté joué sur la localisation géographique des villes. Que ce soit pour des considérations militaires ou encore économiques, la configuration et la localisation des villes dépendent des chaînes d'approvisionnements (Bristow et Kennedy, 2013). Dans ce cas, les villes peuvent être considérées comme des entités émergentes qui existent proche des points critiques d'auto-organisation (Baynes, 2009). Elles sont un centre d'échange intellectuel et matériel (Krugman, 1993; Huang, 1998). Les premiers modèles, ceux de Von Thünen (1826) et Christaller (1933) représentent bien ce modèle de ville qui dépend des dynamiques du territoire qui la supporte. L'avantage compétitif de la ville par rapport à différentes formes d'organisation des activités humaines réside dans la proximité des acteurs. Sans barrière physique importante, les coûts de transactions sont faibles. Ces faibles barrières permettent aux différents acteurs d'accentuer leurs échanges pour faire émerger de nouvelles technologies et créer plus de richesses. La spécialisation de la main d'œuvre dans la cité devient alors un avantage concurrentiel (Henderson, 1986). Les villes tentent donc de maximiser les réseaux sociaux tout en réduisant les coûts des infrastructures la soutenant (Bettencourt, 2013). Elles tentent d'augmenter la productivité des activités économiques qui dépendent des réseaux sociaux tout en diminuant l'empreinte physique de ces activités.

La centralité est également un élément important dans les processus d'auto-organisation qui font émerger les villes. La connectivité des cités aux différents modes de communication est un élément crucial à la caractérisation économique des villes. Cette connectivité influence la nature des villes et leur position dans les réseaux de communication. L'accès au réseau de transport vient modifier le rôle et la composition des activités sur un territoire (Rodrigue et al, 2006) Il faut noter toutefois que le rôle et l'importance de ces accès aux différents réseaux de transport est également largement influencé par les processus politiques et sociaux-techniques. Ainsi, le développement colonial ou encore l'accès ou l'acceptation des différentes technologies peut également influencer la centralité de certaines zones urbaines.

Cet aspect est très important pour expliquer la localisation des villes en Amérique du Nord : elles se sont tout d'abord développées en ayant accès aux voies navigables et ensuite par la construction des chemins de fer (Dessemontet, 2014). Par exemple, par leurs fonctions de portes d'entrées sur un territoire, de nombreuses villes portuaires telles que New York, Rotterdam ou Montréal, a donc acquis des rôles importants. Elles sont les points d'interfaces entre différents modes de transports, il s'agit des villes qui connectent le territoire aux routes de transport mondialisées.

Toutefois, les villes contemporaines ne suivent plus uniquement le modèle de villes qui dominant un territoire localisé : les énergies fossiles abondantes, la mondialisation des échanges commerciaux et les technologies de l'information ont modifié sa configuration et son rôle. Les métropoles ne sont plus organisées de la même manière que les villes médiévales ou les cités industrielles où tout évoluait autour du centre (Batty, 2007). La ville d'aujourd'hui est multipolaire et connectée à un territoire mondial (Dessemontet, 2014). Elle n'a plus de point central où est organisée la totalité des interactions sociales de la ville ; elles se sont complexifiées. Grâce aux technologies de l'information, les diverses activités ont su se délocaliser du centre pour migrer vers la périphérie. Ces lieux sont généralement en zone périurbaine, là où les accès aux réseaux de transports tels que les autoroutes sont plus aisés. Les zones urbaines ont continué à se développer en mégapoles et l'étalement urbain a formé d'immenses zones urbaines sur plusieurs centaines de kilomètres. Ces zones urbaines ou citées sont dépendantes du modèle économique mondialisé que l'humanité s'est doté. Ainsi, les immenses zones industrielles de Chine fournissent les produits de consommation aux centres financiers comme Hong Kong, New York ou Londres alors que ces zones dictent les zones d'activités où ces capitaux seront investis pour produire des biens de consommation. La ville repose dorénavant sur un territoire mondialisé et non plus localisé. L'échelle des dynamiques qui régissent les villes est donc internationale. Ces dynamiques internationales ont des impacts, jusqu'à la forme urbaine locale; la localisation des fonctions urbaines est liée à la centralité des réseaux de transport (Porta et Latora, 2008). Ainsi, le commerce international et ses infrastructures de transport ferroviaire, autoroutier et portuaire viennent forger la forme urbaine des différentes agglomérations d'un territoire.

À l'échelle locale, la description et la classification des zones urbaines dépendent également de la forme urbaine qui couvre un territoire. Par exemple, les zones périurbaines telles que les banlieues, les centres-ville et les villages de campagnes ne forment pas les mêmes types de morphologie urbaine. Elles diffèrent par leur composition. La forme urbaine est une composition de concepts élémentaires tels que le design des rues, la configuration des lots ou l'organisation des espaces publics (Jabareen, 2006). La forme urbaine décrit la manière dont la ville est organisée et dicte la manière dont les sous-systèmes qui la composent se comportent. La forme urbaine est à fois la structure qui forme les processus urbains et une structure qui émerge de ce processus (Neuman, 2005). Depuis l'apparition de la planification urbaine, les villes ont été modelées en fonction de divers dynamiques et idéaux qui l'ont façonnée. La forme urbaine idéale dépend des objectifs désirés. C'est la raison pour laquelle les villes d'aujourd'hui semblent déphasées avec les idéaux de soutenabilité qui guident de plus en plus les décisions des planificateurs urbains. Durant la révolution industrielle, on a construit certaines formes urbaines sur la prémisse que les villes dépendaient peu des limites physiques de la planète (Newman, 1991). Elles ne répondent donc plus aux dynamiques contemporaines, elles doivent être repensées pour être en mesure d'inclure le paradigme de soutenabilité qui transforme les institutions humaines.

L'étude des systèmes urbains doit mettre en relief les dynamiques urbaines sur plusieurs échelles. L'étude des systèmes qui les relient les échelles les unes aux autres permettent de comprendre les processus émergents. Les villes sont forgées par de multiples dynamiques régionales, mondiales et locales, qui interagissent entre-elles. La vitalité des villes est donc un regroupement de multiples propriétés émergentes sur plusieurs échelles de grandeur qui interagissent entre elles. Les villes sont donc des systèmes complexes (Allen, 1997). Elles sont formées par des boucles de rétroactions positives et négatives. Ces boucles de rétroactions peuvent être d'ordres environnementaux, sociaux et techniques. Cette complexité est le résultat de multiples lois simples qui guident les activités humaines à l'échelle de la rue (Batty, 2005) L'état d'une ville est donc le résultat de plusieurs dynamiques qui sont loin de l'équilibre (Baynes, 2009). Ces dynamiques sont guidées par l'hétérogénéité des acteurs sur un territoire à différentes échelles. Ces dynamiques qui

forment la ville s'organisent notamment autour de certains attracteurs, qui ont des centralités importantes. Cette hétérogénéité forme des communautés qui sont organisées en entités cohérentes qui opèrent dans des conditions qui sont en changement continu (Sander, 2008). Les théorisations de la ville la considérant comme un système complexe ne font que commencer. Bien qu'elle soit planifiée, la ville demeure un processus ascendant (Batty, 2005). La ville est donc la structure physique qui encadre les interactions entre les personnes, les lieux et l'environnement (Sanders, 2008). La ville, notamment par sa forme, entretient ou modifie les actions des différents acteurs d'un territoire. Pour engendrer les changements nécessaires pour diminuer les impacts environnementaux des activités humaines, il est donc important de comprendre et agir sur les relations entre la forme urbaine et l'impact environnemental des villes. Il s'agit d'influencer les dynamiques des systèmes complexes qui la composent. Pour y arriver, les planificateurs urbains devront interférer de manière plus appropriée en considérant les dynamiques locales (Baynes, 2009). Il leur faut identifier les attracteurs qui régissent les différents systèmes actuels pour ensuite les modifier ou en créer de nouveau qui rendront les activités humaines plus soutenables.

1.1.2 Approches actuelles

La ville contemporaine, d'un point de vue de la soutenabilité, pose de multiples problématiques. Les critiques de la ville les plus importantes sont généralement associées au développement d'une communauté vivable, à son usage effréné de ressources, à l'émission de pollution qui accompagne les activités urbaines et à son incapacité de préserver les écosystèmes. (Jabareen, 2006). La ségrégation fonctionnelle et l'étalement urbain engendré par le zonage euclidien sont généralement considérés comme la racine du problème de soutenabilité des villes.

L'étalement urbain a été, avant tout, le résultat d'une urbanisation d'une population croissante (Neuman, 2005). Toutefois, il est également le résultat de multiples dynamiques tels que l'apparition de la voiture ou encore l'augmentation continue du coût de l'espace au centre des villes (Glaeser et Kahn, 2004). Ces processus co-évolutifs ont fait émerger de nouveaux

concepts dans le type de zone urbaine et dans l'échelle des zones urbaines qui ont amplifié l'étalement urbain (Neuman, 2005). Au début du XXe siècle, un amalgame d'intérêts a convergé pour créer le zonage euclidien (Lewyn, 2006). Ce modèle de planification est dérivé de la critique de la ville dense, surpeuplée et polluée du XIXe siècle. Les villes industrielles du XIXe siècle étaient devenues des milieux de vie moins en moins habitables au fur et à mesure qu'elles devenaient plus denses (Daneshpour et Shakibamanesh, 2011). Il était donc important de trouver des solutions qui permettaient d'améliorer les conditions de vies des citoyens des villes. Les objectifs étaient d'éloigner les travailleurs des usines polluantes, designer des cités plus esthétiques, éloigner des usines et ségréguer la classe ouvrière (Lewyn, 2006). Les planificateurs urbains tentaient alors de contrôler le chaos de la ville pour rendre la ville plus belle et vivable (Le Corbusier, 1929). À l'aide d'un apport en énergie peu coûteux, les planificateurs urbains ont externalisé les effets négatifs du modèle de consommation et de production industrielle (Ligmann-Zielinska et al, 2008).

Le zonage euclidien est un ensemble de règlements qui détermine la location, la dimension, la forme, la couverture, et l'intensité de l'usage du sol. Cette technique nécessite la présence de zones historiques ou fonctionnelles homogènes dans une zone géographique (Zotic et al, 2015). Il a été développé pour avoir une ville moins compacte et plus ordonnée (Lewyn, 2006). Le zonage euclidien est donc basé sur certains critères spécifiques et sur un territoire circonscrit. Les planificateurs urbains ont donc ségrégué les zones fonctionnelles dans la ville et ont ainsi modelé la forme urbaine sur le territoire. Ils limitent ainsi la cohabitation de certains usages qui sont jugés, en fonction du système sociotechnique, incompatibles. Le zonage est la forme institutionnelle qui a travaillé pour limiter la diversité de la forme urbaine (Wheeler, 2002). L'étalement urbain a donc été caractérisé par un développement d'artères commerciales et de zones de faible densité qui dépendent de manière extensive de l'usage de l'automobile (Jabareen, 2006). Ces usages du territoire fragmentés et de faible densité ont créé des problèmes d'échelles et ils ont engendré des problématiques de productivité marginale dans les villes modernes. Les coûts énergétiques et matériels de la ville moderne sont ainsi devenus inefficients (Daneshpour et Shakibamanesh, 2011). L'impact de l'urbanisation rapide aurait pu être mitigé, car plusieurs études démontrent que

les inefficacités en usage des ressources sont d'avantages associés au type de développement priorisé qu'à la vitesse de développement des villes (Ligmann-Zielinska et al, 2008). C'est le modèle organisationnel proposé qui était erroné, l'étalement urbain à démontrer ses limites. Il est nécessaire d'améliorer l'efficacité de l'organisation spatiale des activités urbaines par le design d'alternatives soutenables.

1.1.2.1 Solutions prônées

L'environnement est un enjeu qui a pris beaucoup d'importance dans le domaine urbain (Fleurke, 2009). Pour répondre à ces problématiques, la planification urbaine accentue maintenant sur la création d'une diversité de formes urbaines plus soutenables qui s'agence avec les zones urbaines existantes (Daneshpour et Shakibamanesh, 2011). Elle tente de conjuguer le paradoxe de la ville : elle se doit d'être compacte pour être soutenable, mais elle doit être moins dense pour être vivable (Neuman, 2005). Le processus d'évaluation de la ville durable a été jusqu'à maintenant basé sur l'efficacité de la consommation des ressources, l'équité sociale, l'accessibilité et la viabilité économique. La ville compacte en Europe et le nouvel urbanisme en Amérique du Nord sont généralement présentés comme les meilleures solutions pour répondre à ces problèmes (Jabareen, 2006).

La commission européenne a introduit en 1990 le concept de la ville compacte. Elle a été désignée comme forme urbaine soutenable idéale pour les villes européennes. L'objectif était de résoudre les problèmes de la ville dans ses propres limites et éviter l'étalement urbain. Il fallait cesser d'externaliser les problèmes de la ville. Sous-jacent à cet objectif principal, une intention majeure était de réduire également les distances entre les lieux de résidence et les activités commerciales et industrielles pour réduire l'utilisation de la voiture (Daneshpour et Shakibamanesh, 2011). Le mouvement du nouvel urbanisme, originaire des États-Unis, favorise une approche piétonne et considère le quartier comme la base d'un bon design urbain (Fleurke, 2009). Elle est la contrepartie nord-américaine de la ville compacte européenne. Pour plusieurs planificateurs et scientifiques, la ville compacte est la typologie qui doit être implémentée pour atteindre un niveau de soutenabilité suffisant (Jabareen, 2006). L'approche

de la ville compacte résonne, car elle est issue de la réappropriation des anciens centres urbains des villes européennes. Ces quartiers, avec leurs multiples usages et types de bâtiments, sont aujourd'hui les plus vibrants et les plus populaires (Wheeler, 2002). Leurs échelles semblent plus locales (Daneshpour et Shakibamanesh, 2011). Leurs densités permettent de générer les interactions nécessaires pour créer des environnements urbains viables, il s'agit d'une caractéristique critique de ces quartiers (Jabareen, 2006). De plus, d'un point de vue d'usage des ressources, la ville compacte tente d'avoir des économies d'échelles dans le développement et les opérations de la ville par la mutualisation des infrastructures (Cavric, 2004). La cité compacte mixte les espaces civiques avec des arrangements de structures agglomérées. Elle tente de créer une communauté. La cité compacte définit un système complexe très organisé pour lesquels chaque composante et supportée et connectée au tout urbain. L'espace urbain est supporté par la géométrie des bâtiments adjacents. Les bâtiments doivent donc être attachés eux-mêmes à ces espaces et non à la route (Daneshpour et Shakibamanesh, 2011). Cela veut donc dire que ces connexions entre les composantes sont localisées dans le bâtiment en lui-même et entre les bâtiments sur un territoire compact.

La mixité des usages est un élément important de la ville durable, elle permet de diminuer les distances parcourues pour favoriser les moyens de transport doux et améliore la sécurité des résidents en permettant d'avoir une occupation de l'espace public (Jabareen, 2006). Le développement de friches urbaines est abordé comme une opportunité de créer une ville multimodale basée sur la proximité des activités et des usages où la voiture devient une option et non une nécessité (Daneshpour et Shakibamanesh, 2011). La diversité est vue comme le générateur primaire de la vitalité urbaine car elle augmente les interactions entre les multiples composants urbains. Une bonne diversité des usages doit donner un support mutuel constant entre les composantes de la ville (Talen, 2006). La notion d'unité dans la diversité est fondamentale. C'est à l'aide de la diversité que les sociétés formées de groupes hétérogènes peuvent aspirer à une unité (Steiner, 2002). Cette diversité est inspirée par une analogie issue de l'écologie biologique (Talen, 2006). Pour faire émerger une ville de qualité, il faut avoir un processus quotidien d'échange entre les divers sous-systèmes de la ville. C'est

la nature réciproque des multiples relations qui composent la ville qui lui permet d'avoir une utilisation maximale toutes les heures d'une journée. (Jacobs, 1961). La ville mixte tente d'intégrer les usages pour réduire les distances entre le développement. Elle s'oriente sur la connectivité pour promouvoir un usage varié de type de mobilité. Elle tente de développer de plus grande densité par une intégration verticale des usages. Elle peut ainsi avoir des usages commerciaux à l'étage du bas et des bureaux ou des résidences aux étages supérieurs (Cavric, 2004). Par contraste, dans la ville moderne, les fonctions d'usages sont connectées à des distances éloignées à l'aide de l'automobile ; dans la ville durable, les fonctions d'usages sont connectées directement entre elles dans un unique bâtiment (Daneshpour et Shakibamanesh, 2011). Cette nouvelle approche crée une multitude de formes urbaines, plus adaptées à leur milieu et aux habitants.

Ces deux approches de la ville durable sont les plus orthodoxes. Il s'agit des approches préconisées dans la pratique pour résoudre entre autres, les problématiques de congestion et d'étalement urbain. Il existe toutefois d'autres approches pour améliorer la soutenabilité des zones urbaines. L'écologie urbaine est particulièrement intéressante, car elle considère les zones urbaines comme de multiples systèmes biotiques qui évoluent dans un contexte physique abiotique (Sukopp, 2002). En étudiant l'écosystème naturel des zones urbaines, cette approche considère l'ensemble de la ville comme un écosystème naturel (Niemela, 1999). L'écologie urbaine ne considère pas la ville comme un lieu physique dominé uniquement par des processus anthropocentriques mais également par des dynamiques écosystémiques. Elle ouvre donc la porte à une réintégration du rôle des dynamiques de systèmes dans l'étude des zones urbaines. L'écologie urbaine se démarque également en considérant l'hétérogénéité des zones urbaines sur un territoire. L'hétérogénéité est l'une des propriétés urbaines les plus importantes d'un aspect écologique. En écologie contemporaine, les mesures d'hétérogénéité abiotique et biotique sont l'un des champs théoriques et appliqués des plus importants. Ils ont découvert le rôle majeur de la différenciation spatiale des processus à plusieurs échelles (Wiens, 2000; Nichols et al, 1998; Benton et al, 2003). L'hétérogénéité des paysages urbains et naturels peuvent être créés par les processus dynamiques qui les composent tel que les processus biophysiques et sociaux (Ahern, 2011).

Par exemple, la différenciation entre les styles et modes de vie, la pression pour une identité sociale à l'intérieur d'un quartier peuvent créer des distinctions entre différentes zones dans une ville (Cadenasso et Picket, 2008). La forme urbaine interagit avec les différents sous-systèmes urbains qui sont également hétérogènes ; ce sont ces interactions qui forgent les paysages urbains (Forman, 2014). La structure des zones urbaines est donc modifiée par différentes boucles de rétroactions qui changent elles-mêmes leurs formes pour s'adapter aux différents contextes économiques, culturels, technologiques et environnementaux. Ces principes, supportés par l'écologie urbaine, suggèrent que la complexité des composantes des systèmes urbains est définie par l'hétérogénéité du bâti, des fonctions urbaines et des types d'environnements (Cadenasso et Picket, 2008). Il s'agit d'un processus évolutif qui est influencé par les multiples relations entre les différents sous-systèmes qui régissent la forme urbaine. Ces paysages urbains et régionaux sont spécifiques aux individus, aux ressources et aux informations qui s'y trouvent (Allen, 1997).

1.1.2.2 Limites et opportunités de la ville durable

Les designers orthodoxes de la ville durable se sont principalement intéressés aux branches classiques de l'urbanisme. Le nouvel urbanisme et la ville compacte se concentrent sur les concepts architecturaux traditionnels et sociaux laissant la physique environnementale en plan (Fleurke, 2009). Ils se sont attardés à la viabilité de la ville, de la même manière que les planificateurs urbains l'ont faite au début du XXe siècle. Leur approche est plutôt réactionnaire à l'expérience citoyenne de la ville contemporaine. La congestion, la mauvaise qualité de l'air, la création d'un environnement vivable, la formation de communauté soutenable sont sensiblement les mêmes problématiques que les planificateurs urbains du début du XXe siècle ont tenté de régler par le zonage, la ségrégation spatiale des activités et une homogénéisation des fonctions d'usages sur un territoire. Les planificateurs urbains ont tenté de nouveau de construire des environnements bâtis plus vivables. L'apport fondamental de ces nouvelles approches urbanistiques est leur pragmatisme pour organiser les différentes échelles et systèmes de la ville (Brain, 2005). Le nouvel urbanisme en particulier, prône une approche à la pièce qui inclue les multiples parties prenantes d'un territoire pour maximiser

la création de valeur dans la zone urbaine considérée. Cependant, les planificateurs urbains explorent peu les autres avenues qui sont essentielles à une réforme de la planification urbaine pour rendre la ville plus soutenable (Berke et Conroy, 2000). Le design urbain n'intègre pas encore les outils systémiques nécessaires à la conception de cités plus soutenables. Les considérations sont généralement techniques, elles peuvent être utilisées indépendamment des réalités environnementales. Il faut que l'aspect environnemental influence la typologie du design urbain d'une manière plus significative (Fleurke, 2009). De plus, les résultats des techniques d'aménagement urbain prônés aujourd'hui donnent peu de résultats. Par exemple, les usages mixtes sont considérés comme un élément important dans le design de la ville durable pour diminuer les distances parcourues et favoriser les moyens de transport doux. Dans la réalité, l'impact mesuré de la mixité des usages reste limité par la complexité des types d'usages et des comportements (Jabareen, 2015). Par exemple, aux Pays-Bas, la différence d'usage énergétique entre les différentes organisations spatiales n'est que de 5% (Bouwman et al, 2000).

La ville compacte n'est pas à la hauteur des attentes, car elle n'est pas une condition suffisante ou nécessaire à la ville durable. Par exemple, l'un des plus importants problèmes de la ville compacte est son accent sur la densité. Elle contraint la recherche à des actions biaisées. La ville compacte quantifie et décrit les zones urbaines à l'aide de valeurs moyennes de densités de population ou de bâti. Ces outils ne peuvent pas caractériser efficacement la forme urbaine pour être en mesure de différencier l'efficacité ou l'efficience d'une organisation urbaine. Elle ne caractérise pas la disposition spatiale des composantes dans l'espace. La densité moyenne n'est pas une représentation suffisante de la forme urbaine (Neuman.2005). Elle ne permet pas de différencier la soutenabilité des activités humaines. En utilisant les indicateurs de densité des villes au Royaume-Uni, il n'y a aucune corrélation entre la compacité d'une ville et son impact environnemental. Cela veut donc dire qu'il n'y a pas de relation entre la densité des villes et l'impact environnemental sur ce territoire. Plusieurs études européennes démontrent d'ailleurs que certains habitants des centres urbains denses ont un impact environnemental supérieur à ceux des formes urbaines moins denses (Holden, 2004; Ottelin et al, 2014). Par exemple, tel que présenté à la figure 1.1, au Royaume-Uni, il n'y a pas de

corrélation entre la densité et l’empreinte environnementale. C’est expliqué par l’externalisation des impacts environnementaux engendrés par la ville qui n’est généralement pas prise en compte dans le design de villes plus denses. Le territoire, les ressources et l’énergie nécessaire pour soutenir les activités de la ville ne sont pas directement pris en compte dans la plupart des études urbaines. Or, la soutenabilité d’un système dépend de la relation entre ce système et ces entrants externes en énergies qui dépendent eux aussi des dynamiques des systèmes plus grands qui les comprennent (Cambell et Garmestani, 2012). Il faut donc prendre en compte les ressources externes de la ville pour caractériser sa soutenabilité. Une diminution des distances parcourue et donc des impacts du transport des habitants d’une ville par une haute densité ne résulte pas en une plus grande soutenabilité si l’ensemble des produits qu’elle doit utiliser pour la soutenir demeure importé de zone toujours plus lointaine. Il est donc important d’internaliser les externalités de la ville. La ville compacte demande toujours plus de territoire et donc d’énergie pour la soutenir. La densité ne permet pas automatique de modifier les limites de productivité marginale du système.

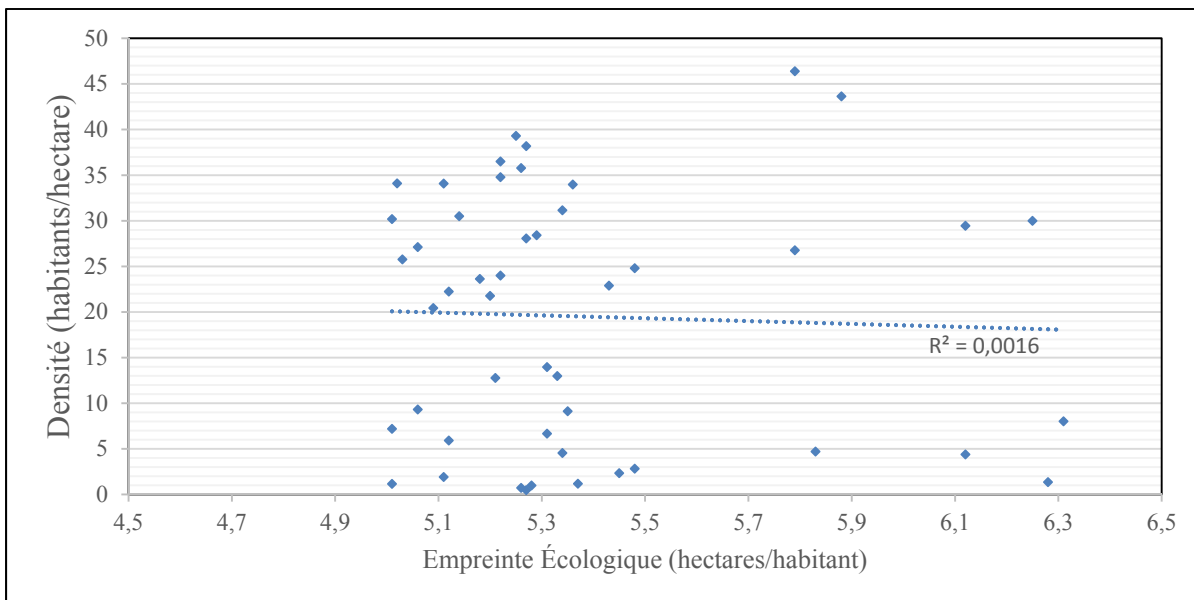


Figure 1.1 Empreinte écologique en fonction de la densité des villes au Royaume-Uni
Données tirées de : Office for National Statistics, England and Wales (2001) et WWF (2007)

L'urbanisme contemporain intègre peu l'hétérogénéité des facteurs physiques, environnementaux et techniques. L'hétérogénéité des villes est pourtant d'une de leur propriété la plus importante, (Cadenasso et Pickett, 2008). Les tissus urbains complexes ont besoin de connectivité et de mixage, le contraire d'une homogénéité (Daneshpour et Shakibamanesh, 2011). La diversité sociale et la diversité des usages sont les deux paramètres d'hétérogénéité les plus étudiés. (Talen, 2006). Cette hétérogénéité peut se mesurer de plusieurs manières sur un territoire ; il est important de ne pas mesurer uniquement la variance de la forme spatiale mais de décrire les schémas spatiaux qui composent le territoire en décrivant les structures et la composition de cette hétérogénéité (Wiens, 2000). Tel que présenté à la figure 1.2, il faut donc, pour comprendre les relations, mesurer la variation de composition d'un territoire ou encore sa variation de localisation. Les études urbaines ont principalement abordé la variation spatiale et la variation des formes, notamment avec le modèle de la ville compacte. La planification stratégique des planificateurs et designers urbains doit se construire sur les causes et moteurs de ces dynamiques urbaines qui sont exprimées dans l'hétérogénéité spatiale des composantes du système (Ahern, 2013). Avec une connaissance des dynamiques qui créent un environnement qui permet de soutenir une diversité dans la ville, les planificateurs urbains pourront agir pour les maintenir (Talen, 2006).

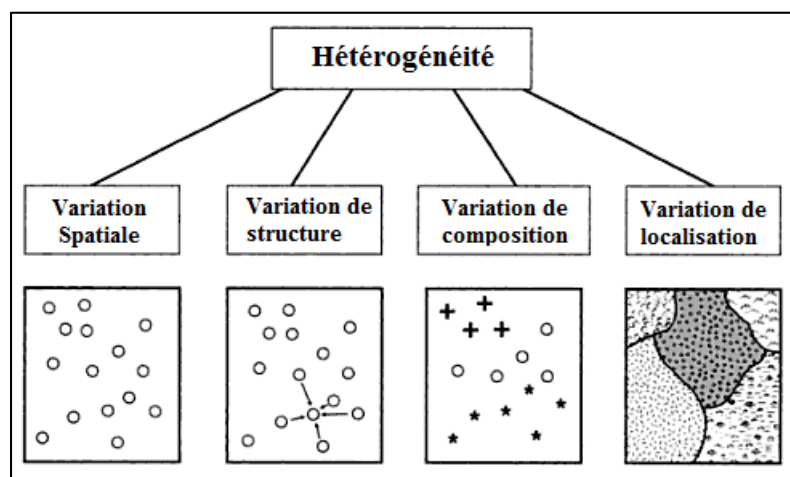


Figure 1.2 Types d'hétérogénéité spatiale
Tirée de Wiens, (2000, p. 12)

Le nouvel urbanisme propose une version améliorée du zonage euclidien. Cependant, cette approche ne suffit pas à créer un processus dynamique et adaptatif pour la gestion de formes urbaines hétérogènes. Il s'agit davantage d'un outil publicitaire que d'un processus adapté à un système évolutif tel que la ville (Neuman, 2005). L'approche reste statique et centralisée (Ahern, 2011; Lewyn, 2006). L'approche stratégique du nouvel urbanisme ne diffère pas fondamentalement des règles fixes du zonage euclidien qui sont inappropriées dans les systèmes complexes (Ahern, 2013). L'atteinte d'une soutenabilité apparente au travers de la planification centralisée d'une forme urbaine ne fait aucun sens car la forme urbaine est à fois la structure qui forme les divers systèmes qui composent la ville et une structure qui émerge de ces processus. C'est la maîtrise des dynamiques entre la forme urbaine et les processus qui définiront la ville durable (Neuman, 2005). La recherche de nouvelles synergies entre l'ensemble des acteurs qui composent la ville remet en cause le dogme traditionnel du zonage, basé sur la séparation des activités (Erkman, 2004). Les techniques de zonage doivent être modifiées et la planification centralisée doit laisser place à un modèle de gestion qui prend en compte les multiples acteurs aux différentes échelles. Une approche qui se base uniquement sur le design de la forme urbaine idéale est vouée à l'échec car les activités humaines suivent des systèmes organisationnels complexes. Cependant, l'abandon des interventions par les autorités publiques pour gérer l'évolution des cités n'est pas non plus une solution valable. La complexité du monde demande également certaines structures collectives ; l'idée que les problèmes pourront être tout simplement réglés par les forces du marché est une illusion (Allen, 1997). Le design de la ville peut permettre la diversité et pour y arriver, il faut développer certaines techniques et connaissances qui ne sont pas encore mises en valeur. (Talen, 2006) Tel que démontré à la figure 1.3, les méthodes de planification d'un territoire ont un impact sur la forme urbaine. Il faut prendre une approche systémique et combiner les outils des systèmes complexes aux méthodes quantitatives et qualitatives. Elle doit s'appuyer sur une connaissance des dynamiques évolutives des systèmes complexes qui influencent les formes urbaines.

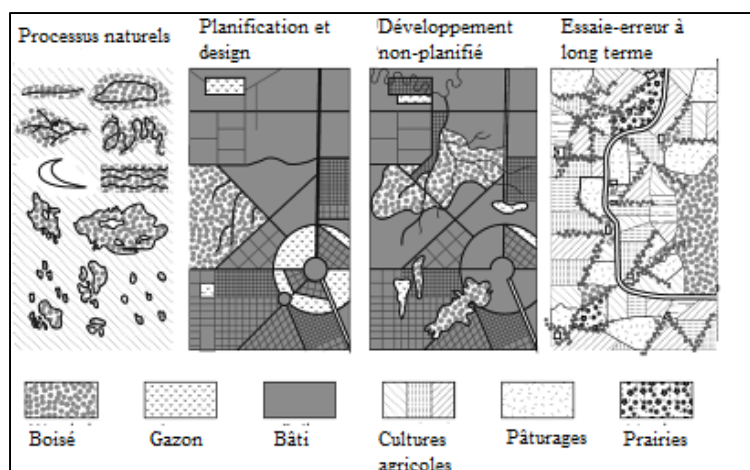


Figure 1.3 Formes spatiales en fonction des dynamiques de développement
Tirée de Forman (2014, p.35)

Ces nouvelles techniques et connaissances se développent à l'aide de l'écologie urbaine et d'un urbanisme qui tente de dépasser les limites de l'urbanisme moderne (Allen 1997; Batty, 2005; Haas, 2008; Portugali, 2011; Forman, 2015). Ils étudient les systèmes urbains à l'aide d'une approche systémique et complexe. Ce n'est pas uniquement la forme physique de la ville et son environnement bâti qui est important, mais la manière dont la société urbaine est organisée et gérée. Les racines de cette approche se trouvent dans la théorie de l'écologie. Les caractéristiques et les relations des systèmes naturels sont étudiés et appliquées aux caractéristiques et aux relations potentielles entre les éléments de design pour coordonner un système soutenable optimal. Les outils utilisés jusqu'à maintenant ont été principalement les modèles cellulaires, les modèles qui utilisent des agents, les fractales statistiques autosimilaires et les outils issus de la théorie des graphes (Encarnação et al, 2012; Porta et Latora, 2008; Portugali, 2011; Sales-Pardo et al, 2007). Les modèles qui utilisent des agents permettent de simuler le choix de multiples acteurs dans un cadre défini alors que les acteurs sont présentés dans des matrices dans les modèles cellulaires (Batty, 2005). La combinaison de matrices cellulaires et de modèles utilisant des agents a permis de modéliser les dynamiques urbaines avec plus d'efficacité. (Huang et al, 2007). La théorie des graphes permet de mesurer les réseaux qui composent la ville et les fractales permettent de comprendre les lois de puissances qui organisent les villes, à l'instar de l'écologie (Portugali, 2011). Généralement, jumelés, ces modèles permettent d'identifier des synergies et de nouveaux systèmes complexes peuvent émerger (Fleurke, 2009).

Les théories de la ville la considérant comme un système complexe ne font que commencer. Elles ont permis jusqu'à maintenant de comprendre que les plans géométriques idéalisés produits sans prendre en compte les dynamiques urbaines ne sont pas suffisants pour répondre aux différents maux des systèmes urbains. Cette nouvelle approche a démontré les limites de la planification urbaine. Cela amène à la création de nouvelles conceptions de la ville qui a mené à la théorisation de la ville par les sciences des systèmes complexes auto-adaptatifs. Ces villes sont moins planifiées. Pour agir sur la forme urbaine, les planificateurs urbains devront interférer de manière plus appropriée en considérant les dynamiques locales (Baynes, 2009). Les dynamiques de consommation et de production commencent ainsi à être étudiées. La compréhension de ces dynamiques et leurs relations avec la forme urbaine auront un impact important sur l'empreinte physique et environnementale des villes (Neuman, 2005). Pour réduire l'impact environnemental des activités humaines, des changements urgents sont nécessaires non seulement dans nos habitudes mais aussi dans l'organisation de la ville (Jabareen, 2006). Ces changements ont amené les différents acteurs de notre société à proposer différentes approches pour redéfinir l'espace urbain de l'échelle du citoyen à l'échelle internationale. Pour y arriver, il faut améliorer notre compréhension systémique des propriétés émergentes issues de l'amalgame des multiples principes individuels qui régissent les dynamiques urbaines (Cadenasso et Pickett, 2008). Des outils plus dynamiques et moins linéaires que les méthodes de zonage euclidiennes sont nécessaires. L'étude des zones urbaines nécessite des outils qui permettent d'étudier, de modéliser et de planifier la distribution des composantes qui forment le processus évolutif de la cité. Ces méthodologies pourraient ainsi contribuer à la compréhension des dynamiques urbaines par des analyses empiriques tout en pouvant modéliser les relations entre les formes urbaines et les impacts environnements. Il serait alors possible d'optimiser les formes urbaines existantes, en se basant sur ces résultats. Il s'agit de créer des boucles de rétroactions qui feront co-évoluer la forme urbaine avec les dynamiques sociales, techniques et environnementales. Pour y arriver, l'étude des systèmes urbains doit prendre une approche systémique des activités qui engendrent les dynamiques sociotechniques qui guident le

développement des systèmes urbains. Il sera alors possible de créer des espaces de vie vivable et soutenable.

1.2 Écologie industrielle

L'Écologie industrielle présente une approche intéressante pour être en mesure de comprendre comment les flux de matière et d'énergie dépendent des configurations spatiales. L'accent sur le capital social et la perspective géographique vient justifier l'approche spatiale de la gestion des flux.

1.2.1 Définition et perspective historique de l'écologie industrielle

L'écologie industrielle tente d'utiliser une approche systémique pour intégrer la problématique environnementale aux activités socio-économiques (Ehrenfeld, 2007). L'objectif est d'intégrer le système industriel aux systèmes naturels (Ehrenfeld, 2009, Isenmann, 2003). L'écologie industrielle défend une approche holistique exprimée par la perméabilité entre les activités humaines et la biosphère (Commoner, 1997). Elle s'inspire largement de l'écologie scientifique, mais également de l'économie. Elle définit les activités du système industriel comme des écosystèmes biologiques (Hess, 2010) pour étudier de manière objective les processus de consommation et de production ; les activités humaines sont considérées comme un amalgame de processus évolutifs qui émergent de l'écosphère (Jensen et al, 2011). L'écologie industrielle considère donc l'ensemble des flux de matière et d'énergie liés aux activités humaines dans son domaine d'étude ; elle considère également les dynamiques technologiques dans l'analyse du système (Erkman, 2004). La conception et l'évolution des technologies sont l'une des composantes qui influencent la dynamique de l'évolution des systèmes industriels. Il s'agit d'une discipline intégratrice qui vise à comprendre le système industriel de la manière que les écologistes comprennent les systèmes biologiques. Pour trouver une solution à la crise environnementale, l'écologie industrielle propose d'utiliser le design des écosystèmes pour redésigner le système industriel (Lowe et Evans, 1995). Elle pourrait être considérée comme la science de la conception et de la

gestion du système de production et de consommation soutenable (Ehrenfeld, 2004). Contrairement à l'écologie biologique, l'écologie industrielle tente d'influencer l'évolution du système qu'elle étudie (Harper et Graedel, 2004).

La naissance du concept derrière l'écologie industrielle provient d'une analogie entre le système industriel et les systèmes naturels (Frosch et Gallopoulos, 1989; Erkman, 1997). Cette analogie a amené son lot d'ambiguïtés dans le vocabulaire naissant de l'écologie industrielle. Les termes importés du lexique de l'écologie pour expliquer certains principes écologiques ont permis de questionner la nature de la comparaison entre le système industriel et les écosystèmes naturels (Ehrenfeld, 2004). Les systèmes naturels sont-ils des modèles où l'analogie doit être expliquée par des métaphores ? L'usage de la métaphore repose sur une approche essentiellement anthropocentrique. Elle différencie les systèmes naturels des systèmes humains. Cette approche est chargée d'une idéologie et ne repose pas sur une approche objective (Jensen et al, 2011). La métaphore a donc été déterminée comme une approche qui ne pouvait pas être retenue. L'argumentaire décrivant les systèmes naturels comme un modèle pour les activités humaines repose sur les origines du système industriel. Les activités humaines sont issues de la biologie, le système industriel ne serait donc qu'une extension exosomatique de l'évolution humaine (Georgescu-Roegen, 1979). Cependant, même si la nature est abordée comme un modèle, il est important d'aborder la nature humaine des sciences naturelles. C'est la compréhension humaine de la nature qui est révélée par la recherche scientifique et non son fonctionnement intégral (Isenmann, 2003). Une large partie d'interprétation humaine est alors introduite et cette compréhension du monde est alors également anthropocentrique. Pour réduire ce biais, l'écologie, abordée comme un modèle, doit être entrevue comme une approche théorique d'étude de systèmes. Ce sont les concepts et les outils issus de l'écologie qui doivent être utilisés comme modèles pour comprendre quels sont les liens entre le système industriel et les systèmes naturels. Les systèmes naturels n'agissent donc ni sous la forme d'une métaphore ni sous la forme d'un modèle exact. Les résultats en biologie ou en écologie doivent servir d'intuition pour explorer le système industriel. C'est uniquement la caractérisation, l'analyse et l'interprétation des études sur les

systèmes industriels qui donneront les principes de l'écologie industrielle ; ils seront uniques, en fonction des secteurs et des territoires (Jensen et al, 2011).

Cette ambiguïté est un aspect important qui a su faire évoluer l'écologie industrielle au cours des 25 dernières années, car elle permet de cerner les limites des deux approches. La discipline s'est davantage approprié les notions de complexité issue de l'écologie et des mathématiques pour faire face à ces limites. L'étude des systèmes naturels agit alors comme un modèle théorique, car ils caractérisent le même type de systèmes. Le système industriel et les écosystèmes sont des systèmes dynamiques auto-organisés ouverts composés de boucles de rétroaction positive et négative régies par des interactions entre et dans les différents ordres de grandeur (Dijkema et Basson, 2009, Ehrenfeld, 2003). La complexité de ces systèmes réside dans les structures organisationnelles et les réseaux qui composent les systèmes naturels et humains. Elles interagissent de manière perpétuelle avec leurs environnements entre et dans plusieurs échelles de grandeurs (Parrot, 2010). La notion d'auto-organisation qui est associée à ces deux systèmes repose sur leur capacité à bifurquer sous leurs propres dynamiques suffisamment pour tendre vers des états plus ordonnés ou complexes (Hook, 2011). Pour qualifier le système industriel de complexe, la discipline a dû intégrer les réseaux sociaux complexes aux systèmes techniques mécanistes (Ehrenfeld, 2009). À l'inverse des études économiques classiques qui placent l'humain comme un insulaire rationnel, l'écologie industrielle a placé l'individu dans un réseau de relations (Erkman, 2004). La compréhension des dynamiques qui régissent les interactions entre les acteurs du système socio-économique et leurs environnements devrait permettre de limiter l'impact environnemental du système socio-économique (Jensen et al, 2011; Dijkema et Basson, 2009)

L'intégration de la philosophie des systèmes complexes à l'écologie industrielle a également modifié la définition de soutenabilité. Au lieu d'être un objectif tangible, la soutenabilité est maintenant décrite comme une propriété émergente de ces systèmes. Cette propriété correspond à la capacité d'un système à créer, tester et maintenir une capacité adaptative dans le temps face à un environnement dynamique (Ehrenfeld, 2004). Elle serait fonction des

caractéristiques organisationnelles des structures. Tel que présenté dans la figure 1.4, les systèmes les plus complexes ne sont ni aléatoires, ni entièrement planifiés. Les structures aléatoires sont facilement explicables par des statistiques, alors que les structures ordonnées s'expliquent par des principes mécaniques. Ce sont les structures qui se situent entre les deux qui sont les plus complexes.

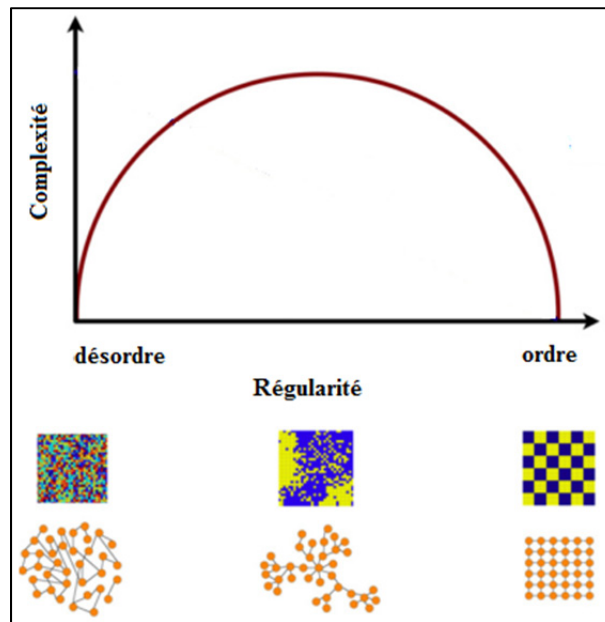


Figure 1.4 Mesure de la complexité
Tirée de Parrot (2010, p. 1070)

Cette complexité a un impact sur les interactions internes et externes d'un système. Elle influence ainsi sa soutenabilité dans un environnement dynamique. Les systèmes complexes auto-organisés optimisent les structures des procédés pour atteindre la plus grande complexité possible à cet instant. Cette optimisation est en partie effectuée par le développement de structures dissipatives toujours plus complexes (Parrot, 2010). Les systèmes augmentent ainsi l'efficacité énergétique du système. L'optimisation de la complexité des structures organisationnelles et des réseaux du système industriel a un impact sur la soutenabilité du système socio-économique (Ehrenfeld, 2009). L'intégration des concepts de complexité a permis de mieux décrire les limites de l'étude du système industriel par l'écologie industrielle. Pour augmenter la complexité des systèmes sociotechniques,

l'écologie industrielle doit se concentrer sur les relations entre les flux physiques, les activités humaines et les systèmes naturels pour comprendre les boucles de rétroaction entre le système socio-économiques, le système technique et les systèmes naturels.

1.2.2 Caractérisation des outils de l'écologie industrielle

L'écologie industrielle s'est dotée de nombreux outils quantitatifs et qualitatifs pour décrire les multiples systèmes de consommation et de production qui régissent les activités humaines. Les outils classiques sont principalement associés au métabolisme industriel ; ils évaluent les flux énergétiques et matériels et tentent de quantifier leurs impacts sur l'environnement. Les descriptions qualitatives des réseaux industriels ont été également utilisées pour décrire les processus évolutifs des symbioses industrielles. L'apparition des approches basées sur les systèmes complexes ont ensuite donné lieu à l'apparition des méthodes issues de la théorie des graphes et l'utilisation des agents dans la modélisation.

1.2.2.1 Outils classiques de l'écologie industrielle

Les outils d'écologie industrielle classique les plus connus sont issus de l'analyse métabolique du système industriel car le système industriel fût tout d'abord décrit comme un système composé de technologies, de flux matériel et d'énergie (Boons et Baas, 1997). Ces outils se différencient des analyses économiques classiques qui valorisent les flux économiques et écologiques par une valeur monétaire. L'écologie industrielle les quantifie sur une valeur physique d'utilisation. Elle place au cœur de sa réflexion des éléments difficilement pris en compte par la pensée économique contemporaine : la réalité matérielle des échanges, les interactions avec la Biosphère, le long terme ainsi que la nature relationnelle des activités économiques et sociales (Erkman, 2004). Les analyses effectuées avec les outils classiques de l'écologie industrielle se font donc généralement sur une base fonctionnelle et sur l'ensemble du cycle de vie. L'empreinte environnementale, l'analyse de flux et des stocks matériels (MFA), l'analyse de cycle de vie (ACV), les analyses *input/output* ou encore les analyses d'énergie sont des exemples d'outils que l'écologie industrielle s'est appropriés pour caractériser le métabolisme industriel (Loiseau et al, 2012).

Il s'agit d'indicateurs qui relient les activités industrielles à un usage de ressources environnementales quantifiables. Leurs différences reposent principalement sur l'approche utilisée pour effectuer les mesures et les types d'indicateur utilisés (Baynes et Wiedmann, 2012). Ces analyses sont d'ordre opérationnel et stratégique ; ils permettent de différencier différentes technologies ou processus (Erkman, 2004). Ils fournissent une multitude d'informations sur les impacts physiques et environnementaux des activités humaines. Ils sont aujourd'hui essentiels pour répondre aux différentes problématiques environnementales que l'humanité doit résoudre.

L'empreinte environnementale se calcule sur une base spatiale ; elle se base sur la notion de capacité de support. Il s'agit d'un outil simple, mais concret et intuitif qui permet de comprendre les limites environnementales (van den Bergh et Verbruggen, 1999). Elle est définie comme la surface qu'une population d'une espèce donnée a besoin pour être supportée indéfiniment dans un habitat sans endommager de manière permanente les écosystèmes sur lequel elle dépend (Rees et Wackernagel, 1996). L'empreinte écologique est donc l'espace théorique utilisée par l'homme pour produire les ressources biologiques qu'il consomme et celle qui sont nécessaire à assimiler les déchets qu'ils génèrent (Wackernagel et al, 1999). Cependant, l'empreinte écologique ne mesure pas l'impact de la pollution diffuse, n'intègre pas la biodiversité, la dégradation des terres et le rôle des technologies, notamment dans l'absorption du CO₂ (Fiala, 2008; Loiseau et al, 2012) Il s'agit d'une valeur indicative tangible du niveau de soutenabilité des activités du système sous forme agrégée (Robert et al, 2002). Elle est donc utile pour indiquer l'impact environnemental approximatif de systèmes très complexes, mais peu pertinents pour mesurer précisément l'impact de procédés bien connus. Ainsi, pour les villes, la quantité d'arrière-pays des villes qui doit être utilisée pour mesurer les villes est un indicateur de leur soutenabilité relative (Petric, 2004; Wackernagel et al, 2006). Historiquement, les villes ont toujours été dépendantes de leur arrière-pays, si cette mesure est plus importante que les territoires qui les supportes, les villes surexploitent leur environnement (Hubacek et Giljum, 2003). Cette valeur reste toutefois théorique et ne correspond pas aux réalités matérielles locales car le système d'approvisionnement des villes est mondialisé (Fiala, 2008)

L'analyse de cycle de vie est utilisée pour quantifier l'impact environnemental et la consommation de ressource pendant l'ensemble du cycle de vie d'un produit ou d'un service (Rebitzer et al, 2004). Elle est généralement utilisée pour comparer des produits avec des fonctions équivalentes ou trouver les points critiques environnementaux dans les processus (Robert et al, 2002). L'analyse de cycle de vie est encadrée par la certification ISO 14044 (2006). Elle définit la méthodologie à utiliser pour effectuer les ACV. L'analyse de cycle de vie débute par l'établissement des limites de l'étude fonctionnelle accomplie. Ensuite, l'inventaire des inputs et outputs du système est effectué avant de les convertir en impact environnemental à l'aide de différentes méthodologies (Loiseau et al, 2012). Ces méthodes utilisent des modèles complexes pour évaluer le potentiel d'impact environnemental de produits et de services sur l'ensemble du cycle de vie. Il tente d'inclure tous les impacts des échanges entre l'environnement et l'entité fonctionnelle mesurée (Ridoutt et Pfister, 2013). Elles sont généralement définies par l'impact sur les changements climatiques, la santé humaine, l'usage des ressources et la qualité des écosystèmes (Chester et al, 2012). L'analyse de cycle de vie, par sa nature fonctionnelle, a de la difficulté à décrire les usages territoires multifonctionnels (Loiseau et al, 2012). Il est donc difficile d'établir les limites du système fonctionnel dans le cas de territoire ou de villes, car ils occupent plusieurs fonctions qui ne sont pas nécessairement directement reliées. Il est donc très difficile de faire des mesures comparatives de différents systèmes multifonctionnels. Elle convient toutefois parfaitement à évaluer l'impact de deux procédés concurrents ou encore du choix des infrastructures, car dans ces cas, le cadre fonctionnel reste le même entre les différentes solutions étudiées.

L'émergie est un concept porté par Howard T. Odum, l'un des grands chercheurs de la systémique en écologie (Brown et Ulgiati, 2004). L'émergie est l'énergie totale qui est nécessaire, directement et indirectement pour former une ressource, un produit ou un service sous une seule unité : les émojoules solaires (Zhang et al, 2009). L'habilité de l'émergie d'évaluer toutes les formes d'énergie, de matériel et de services humains sur une base commune en les convertissant sous une forme d'énergie solaire lui permet de mesurer l'impact environnemental présent et passé des processus ayant cours dans la biosphère (Brown

et Ulgiati, 2004). La seconde force de l'émergie est sa capacité à calculer la valeur économique en émojoules solaires pour internaliser les flux de ressources naturels aux principes économiques. Il est également possible d'y calculer les coûts énergétiques du travail, de la culture et de l'information. Le coût des processus en émergie est intégré par la transformité, qui reflète la hiérarchie de la biosphère en terme thermodynamique (Chen et Chen, 2006). La transformité est définie comme l'intrant en émergie par unité d'énergie disponible (Exergie) à la sortie (Brown et Ulgiati, 2004). La difficulté de déterminer précisément les transformités est l'une des faiblesses des calculs d'émergie (Hau et Bakshi, 2004; Chen et Chen, 2006). Les mesures absolues d'émergie ne sont pas généralement très pertinentes dans les analyses, des indicateurs relatifs comme l'émergie/dollar ou encore l'émergie/personne sont la plupart du temps plus révélateurs, car les résultats dépendent de l'échelle et de la composition du système (Zhu et al, 2012). L'émergie et la transformité sont des techniques qui peuvent être appliquées aux concepts de complexité (Ulgiati et Brown, 2009). Pour calculer l'émergie, il faut tout d'abord représenter les limites du système et les interactions entre toutes les composantes économiques et environnementales du système considérées importantes (Su et al, 2009). Ensuite, il faut transformer ce diagramme en un plus général et agrégé qui explicite les relations fonctionnelles entre les différents processus et composantes du système. Il est alors nécessaire de quantifier les flux entre les composantes pour ensuite les transformer sur une base commune en émojoules solaires pour calculer l'émergie globale (Zhu et al, 2012). Les ressources renouvelables qui peuvent être intégrées sont le vent, la pluie ou encore les flux des rivières ; du côté des ressources non renouvelables, on peut y inclure les sols, le pétrole ou encore les ressources minières (Su et al, 2009)

Les méthodes d'analyse de flux matériels (MFA) et d'énergie utilisent la première loi de la thermodynamique ; elles sont généralement utilisées dans les analyses métaboliques (Baynes et Wiedmann, 2012). Les méthodologies de MFA sont des évaluations systématiques des stocks et flux matériels dans un espace et un temps défini d'un système (Fröhling et al, 2013). Les analyses de flux permettent de faire des bilans massiques de systèmes. Les systèmes étudiés sont généralement entre la technosphère et l'écosphère ainsi qu'entre les systèmes

économiques (Loiseau et al, 2012). Elles permettent notamment d'étudier la dématérialisation de l'économie et de repérer les effets rebonds (Robert et al, 2002). La MFA ne distingue pas les ressources en classes individuelles donc, chaque tonne possède le même impact (Seppälä et al, 2005). La qualité des ressources n'est pas incluse et les résultats ne révèlent donc pas les nuances sur les impacts réels du système. Toutefois, il s'agit de la nature de la MFA, l'objectif est d'avoir un modèle simple et fiable. C'est ce qui explique l'importance de l'équilibrage des flux dans l'approche (Fröhling et al, 2013). L'usage principal des méthodes d'analyse de flux est donc pour mesurer l'impact des politiques sur la direction et la provenance des flux. Elle permet d'évaluer les quantités moyennes d'énergie et de matières utilisées par les habitants d'une zone géographique définie (Robert et al, 2002).

Les techniques d'analyse input/output sont utilisées dans les études qui étudient les processus de consommation (Baynes et Wiedmann, 2012). Les premières tables input output datent des années 1930 (Heijungs et Suh, 2002) Il s'agit de l'approche la plus simple pour calculer les flux direct et indirect de secteurs économiques (Lave et al, 1995). Les techniques quantifient les flux sur des bases physiques ou monétaires (Weisz et Duchin, 2006). Les analyses input/output permettent également de donner les informations sur les flux critiques qui permettent d'établir des symbioses industrielles entre différents acteurs sur un territoire (Mirata, 2004). Dans sa forme la plus simple, les analyses input/output sont des équations linéaires qui décrivent les flux matériels dans un système (Miller et Blair, 2009). Les tables qui en résultent permettent de faire un inventaire des différents flux de matière consommée par chacune des parties prenantes qui composent un territoire. Des opportunités d'échange matériel entre différents acteurs d'un territoire peuvent donc être identifiées. Dans le cadre des analyses pour les villes, les résultats sont généralement agrégés lorsque l'on mesure des entités spatiales; ils manquent donc de précision car ils se basent sur des méthodes d'évaluation statistique et économique pour évaluer la consommation des ménages (Baynes et Wiedmann, 2012). Les tables input output sont donc utilisées dans l'estimation de la dimension des flux de systèmes entiers et dans des études locales qui caractérisent les processus individuels. Ils sont utilisés sur une multitude d'échelles et ils ont des applications théoriques et pratiques.

1.2.2.2 Symbioses industrielles

La symbiose industrielle est le modèle opérationnel des principes d'écologie industrielle (Valero et al, 2010). Elle a été incorporée aux politiques locales, régionales, nationales et internationales sur plus de six continents. Elle est perçue comme un outil stratégique pour améliorer l'efficacité des systèmes de production (Lombardi et al, 2012). La symbiose industrielle porte son attention principalement sur les échanges coopératifs de flux de ressources (Chertow et Ehrenfeld, 2012). Elles sont une partie intégrante de la ville durable; ce sont les symbioses qui devraient donner à la ville l'énergie et une partie du matériel nécessaire à l'existence de la forme urbaine. C'est dans les zones urbaines que le concept d'écologie industrielle a le plus de potentiel car elles abritent une part importante de la population, qui causent le plus de pollution et qui ont le plus grand potentiel de recyclage (Harper et Graedel, 2004). Elles permettent de réduire l'impact environnemental des processus de consommation et de production (Eckelman et Chertow, 2009). Les flux de matière circulent alors dans un réseau de flux de matière qui internalisent les sous-produits des processus de production et de consommation. La productivité augmente car il y a moins de matière première ou d'énergie primaire utilisée pour effectuer le même service ou produit. Le cas d'étude le plus cité est celui de Kalundborg au Danemark (Erkman, 1997; Harper et Graedel, 2004; Jacobsen, 2006). Un réseau d'entreprises et la municipalité, s'échangent énergie et matière, notamment de la vapeur, des cendres de la centrale thermique ou par exemple des déchets organiques. L'élément déclencheur de cette forme de parc industriel est la raréfaction des ressources d'eau potable (Adamides et Mouozakitis, 2009). Comme la figure 1.5 le démontre, les acteurs ont su coopérer ensemble pour faire émerger un réseau de recyclage et de réutilisation qui a généré des revenus et des économies pour les compagnies impliquées; cela a été associé à une baisse la pollution de l'air, de l'eau et du sol dans la région (Lowe et Evans, 1995). Cependant, la maîtrise des processus et des catalyseurs qui mènent à l'émergence de symbiose restent peu connus (Lombardi et al, 2012). Les symbioses industrielles sont à la fois un sujet d'étude et un outil de l'écologie industrielle. Au Québec, les projets de symbioses les plus importants se situent dans le parc industriel de Montréal-Est

(AIEM, 2015). Les acteurs de l'industrie chimique de l'est de Montréal se sont livrés à de multiples échanges de sous-produits. Il y a également une initiative importante dans Lanaudière où une base de données des sous-produits disponibles dans la région a été créée pour donner l'information nécessaire aux acteurs de la région (Mckay, 2013).

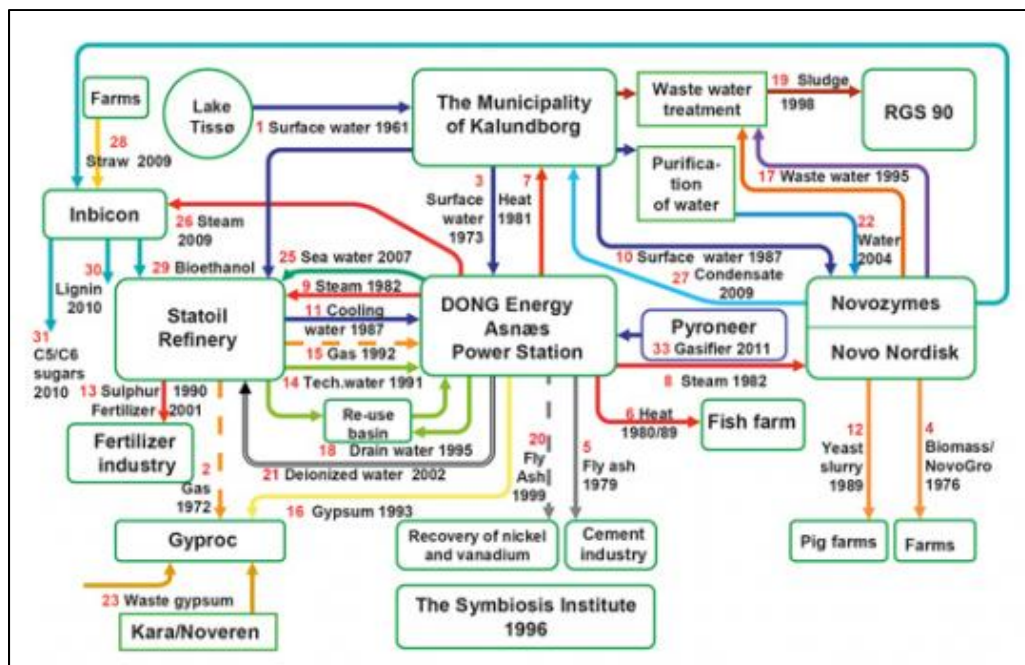


Figure 1.5 Flux de matière et d'énergie dans la symbiose industrielle de Kalundborg
Tirée du Symbiosis Institute (1996)

Telles que décrites par Chertow et Ehrenfeld (2012), les symbioses industrielles émergent généralement en suivant les mêmes processus. Elles forment tout d'abord des relations isolées dans un système : ce sont les précurseurs. Ils sont les éléments clés du développement initial des symbioses industrielles et ils permettent de générer des structures émergentes ; elles sont généralement opérées par des acteurs qui maîtrisent des structures organisationnelles qui divergent des structures plus orthodoxes (Rotmans et Loorbach, 2009). Vient ensuite une reconnaissance de ces actions par les acteurs du milieu de ces échanges. Les parties prenantes reconnaissent alors les bénéfices économiques, environnementaux ou sociaux des échanges symbiotiques sur un territoire. Elles modifient alors le champ des possibles des organisations et des individus. Quand ces possibilités sont internalisées, les

acteurs enchâssent et institutionnalisent cette façon de faire dans les réseaux qu'ils occupent. Cela permet de créer des normes et des pratiques qui valident cette nouvelle conscience publique et sociale (Chertow et Ehrenfeld, 2012). Il s'agit d'une étape cruciale, car la qualité des échanges entre les entreprises est dépendante des intégrations technologiques entre les entreprises d'un groupe symbiotique (Adamides et Mouzakitis, 2009). L'établissement des normes techniques et sociales permettent de créer une culture sociotechnique commune qui permet d'augmenter le potentiel d'intégration. L'implantation de symbioses industrielles consiste donc à implanter de nouvelles pratiques culturelles sur un territoire sous la forme d'un processus transitoire et évolutif. Leur développement est en fonction des avantages locaux et du contexte qui peuvent être exploités par les symbioses (Baas et Boon, 2004). Le contexte qui fait émerger les symbioses dépend de processus complexes et auto-organisés. Les deux facteurs les plus importants qui influencent ces processus sont le capital social et les caractéristiques géographiques du système étudié (Chertow et Ehrenfeld, 2012).

Le capital social est relatif à la capacité des acteurs à travailler ensemble. Le concept de capital social inclut les normes, les réseaux et la qualité des relations entre les acteurs (Putnam, 1995). La quantité de capital social est fonction de la qualité des réseaux d'informations du système (Lesser, 2000). Il caractérise les propriétés qui émergent de l'ensemble des relations individuelles d'un réseau social. Sa valeur -dépend des caractéristiques individuelles et des dynamiques sociales qui agissent sur les populations ; elle est également relative au contexte (Coleman, 1988). La quantité d'information seule n'est pas suffisante pour engendrer plusieurs synergies (Lombardi et al, 2012). Les acteurs doivent être dans une communauté connectée pour que l'information ait une valeur réelle. Des facilitateurs sont donc généralement utilisés pour influencer les réseaux afin d'augmenter le capital social en rapport à l'écologie industrielle. Ces facilitateurs améliorent la qualité des relations entre les parties prenantes. Ils mettent l'énergie nécessaire afin créer des connexions entre les acteurs pertinents du réseau industriel (CTTEI, 2013).

Les caractéristiques géographiques des systèmes industriels ne causent pas des réseaux d'échanges mais elles les rendent possibles. La distance, le type d'acteurs sur un territoire, la

valeur et la disponibilité des ressources, l'information, les structures régulatrices et la proximité sont des éléments qui influencent la capacité des acteurs à mettre en place des symbioses industrielles (Chertow et Ehrenfeld, 2012). La proximité géographique est considérée comme l'un des principaux vecteurs de succès, car il réduit le coût des infrastructures physiques (Chertow, 2004). Un territoire local peut également améliorer les chances de succès, car les acteurs proviennent des mêmes milieux. Toutefois, il n'y a aucune étude qui confirme un lien entre la distance la valeur des biens échangés (Lombardi et al, 2012). La qualité, la quantité et la disponibilité des ressources présentes sur un territoire sont également un facteur qui influence les opportunités (Adamides et Mouzakitis, 2009). Par exemple, au Brésil, Três Coroas est une région où les entreprises produisent principalement des souliers; elles ont de la difficulté à créer des relations symbiotiques, car les entreprises ont toutes les mêmes matières résiduelles (Ferrer et al, 2012). L'hétérogénéité des acteurs sur le territoire du système est un élément important dans l'établissement de symbioses industrielles (Lombardi et al, 2012; Chertow et Erhenfeld, 2012; Fisher-Kowalski et Steinberg, 2010). Si les parties prenantes présentes sur un territoire ont des besoins complémentaires, cela crée plus d'opportunité d'affaires que si elles ont tous les mêmes besoins et les mêmes. Ces besoins complémentaires pourraient être appelés des niches technologiques. Ces niches sont caractérisées par des conditions biophysiques, techniques, politiques ou sociales (Adamides et Mouzakitis, 2009; Erkman, 2004). Ces niches sont des contextes géographiques particuliers aux différentes zones géographiques. Jensen et al. (2012) a probablement effectué l'analyse la plus poussée de ces niches industrielles en effectuant une étude sur les systèmes industriels du Royaume-Uni. En utilisant l'indice de qualité de l'habitat (*Habitat Suitability Index*), un outil d'évaluation multicritères, ils ont tenté d'identifier les zones industrielles qui représentent le plus grand potentiel pour les symbioses industrielles. Il s'agit d'une analyse comparative en fonction des acteurs industriels, des ressources disponibles, leur connectivité au réseau de transport et à la diversité locale sur un territoire. Elles permettent d'avoir des indicateurs qui évaluent à l'échelle territoriale la valeur d'un milieu industriel par rapport à un optimal défini précédemment. Cette étude permet donc de faire une première analyse primaire, en fonction de critères qui définissent le type de symbiose recherchée. Bien que les critères utilisés

influencent directement la viabilité des installations industrielles, elles ne représentent pas à elle seule le potentiel réel des zones utilisées par les humains pour les symbioses industrielles. L'indice de qualité de l'habitat ne prend en compte ni les dynamiques locales ni les acteurs situés à l'extérieur des activités industrielles. Elle demeure donc très partielle.

Les symbioses industrielles proposent des modèles de solutions collaboratives qui découplent l'usage de ressources et de matériel. Jusqu'à aujourd'hui, l'étude des systèmes industriels a permis d'étudier et de mieux comprendre les dynamiques sociotechniques qui régissent les habitudes de consommation et de production. La conception et l'étude des symbioses industrielles demeurent un champ émergent, la science des symbioses industrielles demeure en construction (Lombardi et al, 2012). Le design et la compréhension des dynamiques des institutions humaines et naturelles reste partielle. Les études sont généralement tenues aux limites du parc industriel, elles sont contraintes par les limites de la planification urbaine euclidienne qui favorise l'homogénéité et ségrègue les activités industrielles hors des lieux de vie. Cette technique limite l'émergence de nouveaux processus dissipatifs. De plus, cette approche demeure réductionniste et non systémique : la plupart des études sur les symbioses industrielles n'incluent pas les ménages et les ressources de faible entropie. Elles sont rarement intégrées au processus de recirculation d'énergie et de matière industriel. Les ménages sont pourtant essentiels au processus de consommation et de production : ils sont à la fois les consommateurs et les agents de production de ce système industriel. C'est la consommation des ménages qui guide les processus de production. La fonction d'usage finale des processus industriels est d'assouvir les besoins et les désirs des citoyens d'un espace géographique défini. L'étude des symbioses industrielle requiert donc une ouverture non seulement sur les lieux de production, mais également de leurs liens avec les milieux de consommation. Il faut considérer l'ensemble des acteurs qui forme les processus et les structures des systèmes de consommations et de production.

1.2.2.3 Nouvelles problématiques de l'écologie industrielle

L'écologie industrielle a su surmonter plusieurs obstacles initiaux qui limitaient la portée de la discipline grâce au développement des outils classiques d'écologie industrielle. Ils ont permis de comprendre par des cas d'étude les dynamiques fondamentales de l'écologie industrielle. Les outils classiques d'écologie industrielle décrivent les bilans de flux et les méthodes d'évaluation des impacts des activités humaines sur les autres sous-systèmes de la planète permettent maintenant d'estimer et comprendre l'impact des choix et des décisions dans le design des processus et procédés industriels. Ces outils de mesures décrivent l'impact des interactions locales sur les systèmes qui supportent les activités humaines. Ils permettent d'optimiser les processus en fonction des résultats quantitatifs. Ils sont des outils d'efficacité économique. Ils permettent aux acteurs d'effectuer des décisions rationnelles. Ils sont donc également utiles pour modéliser les choix des agents dans les modèles. Ils internalisent les impacts environnementaux dans les processus décisionnels. L'approche permet de caractériser les solutions envisagées pour prendre de meilleures décisions à leur échelle en internalisant les impacts des différentes échelles de grandeurs du système industriel. Elle peut mesurer l'impact de ces choix et ainsi évaluer la qualité du design des systèmes de production et de consommation. Toutefois, les outils classiques d'écologie industrielle ont toujours de la difficulté à concevoir des systèmes efficaces. Ces outils sont utilisés généralement non pas pour optimiser les systèmes mais plutôt pour optimiser des finalités telles que des produits. Bien que l'optimisation des choix et du processus de consommation sur une base fonctionnelle demeure un élément central à l'écologie industrielle, ces analyses ne suffisent pas pour comprendre et influencer radicalement les dynamiques ces sous-systèmes qui forment les processus. Les outils classiques d'écologie industrielle doivent donc être davantage utilisés pour quantifier les systèmes et non les produits. L'objectif n'est pas de trouver uniquement un maximum ou un minimum pour chacun des acteurs, mais également un état optimal dans un contexte donné.

La compréhension des problématiques de soutenabilité et le design d'un système de consommation et de production plus soutenables ne peuvent être étudiés que par une

approche réductionniste. Pour pouvoir comprendre les dynamiques de conception d'un système humain plus soutenable, il est nécessaire d'étudier le fonctionnement des systèmes de production et de consommation dans son ensemble en incluant les consommateurs et non seulement les producteurs. Elle doit également dépasser le dualisme entre la structure et les agents (produits, personnes, firmes) pour réellement avoir une réelle approche systémique (Andrew, 2000). Les structures et les agents sont interdépendants. Ils sont les résultats de boucles de rétroaction positive et négative entre les structures et les agents. Pour y arriver, l'étude des symbioses industrielles devra donc élargir l'échelle de leurs études pour intégrer l'intégralité des structures de production et de consommation (Dijkema et Basson, 2009). Elle doit s'approprier ou développer de nouvelles stratégies d'études et de design des systèmes urbains sur le plan physique, économique et social (Erkman, 2004). L'écologie industrielle doit donc changer les dynamiques qui régissent les différents sous-systèmes des systèmes socio-économiques pour réussir à les influencer et limiter l'effet dissipatif du système socio-économique (Jensen et al, 2012). L'espace et les activités urbaines doivent être restructurés pour minimiser les distances de déplacements : il faut rapprocher les centres d'approvisionnement des centres de désapprovisionnement et optimiser la recirculation des ressources sur une base locale (Erkman, 2004). Certains nouveaux projets de chauffage tirent parti de ce découplage des parties prenantes des systèmes industriels. Les différences en qualité et en quantité d'énergie permettent de créer des systèmes de chauffage de quartiers décentralisés avec uniquement un apport énergétique d'appoint. Ces systèmes peuvent fonctionner car ils s'appuient sur des systèmes hétérogènes qui balancent les flux énergétiques. Ces systèmes de chauffage décentralisés donnent un aperçu des opportunités que peuvent ouvrir des métabolismes hétérogènes : elles demandent moins d'énergie primaire pour le même output car les parties prenantes sont complémentaires. L'écologie industrielle doit donc comprendre la manière dont le système sociotechnique anime les territoires et les villes pour se développer au-delà des limites des quartiers industriels. Il s'agit d'un enjeu majeur, car les villes posent des problématiques environnementales tenaces par leur complexité et l'importance de leurs impacts environnementaux.

L'écologie industrielle et les études urbaines sont complémentaires : l'écologie industrielle étudie les sous-systèmes qui maintiennent la ville en vie. Les zones urbaines et périurbaines sont des systèmes qui ont tous les attributs des systèmes sociotechniques complexes (Dijkema et Bosson, 2009). Les études urbaines s'intéressent au design spatial des systèmes économiques, sociaux, politiques et techniques ; l'écologie industrielle tente de réduire l'impact environnemental des activités de ce système sociotechnique. Ces disciplines possèdent des objectifs communs : les deux disciplines cherchent à rendre les activités humaines plus soutenables et vivables. Avec l'écologie urbaine, les disciplines tentent également d'imbriquer l'étude des activités humaines aux systèmes naturels. Les disciplines sont donc vouées à coévoluer : l'aménagement de l'espace influence la manière dont les systèmes sociotechniques vont évoluer et les systèmes sociotechniques engendrer l'organisation spatiale que l'on envisage. L'espace est l'empreinte physique des activités humaines ; elle influence donc directement la manière dont les systèmes de consommation et de production se comportent. La forme urbaine agit directement sur les processus d'auto-organisation des flux matériels, énergétiques et informatiques. Ces processus influencent également la qualité de vie urbaine et sa soutenabilité. Les nouvelles approches urbanistiques tentent également de répondre à certaines caractéristiques nécessaires à l'opérationnalisation des symbioses industrielles. Ils ont intégré certains éléments des sciences complexes pour créer des milieux de vie plus vivables et avec davantage de capital social. Le nouvel urbanisme tente d'augmenter le capital social de la cité en créant des zones urbaines plus connectées aux espaces publics. Les planificateurs urbains tentent de créer des environnements qui favorisent l'émergence d'un capital social en favorisant les interactions dans les places publiques. L'objectif est de créer un sentiment de communauté à partir des lieux partagés. Les places publiques sont considérées comme des attracteurs où les populations peuvent créer une qualité de vie urbaine. La planification et le maintien de l'hétérogénéité et de la densité sont également un élément que l'urbanisme durable apporte à la planification de systèmes industriels symbiotiques. La diversité des agents est également un élément important pour dynamiser les systèmes sociaux et ainsi les rendre plus adaptatifs. Malgré ces avancées, les études urbaines ont également de la difficulté dans le design et la gestion des systèmes urbains durables. Elles n'ont pas d'outils qui permettent d'entretenir un

processus évolutif soutenable dans la gestion des formes urbaines et périurbain. Pour y arriver, il est nécessaire de combiner les études urbaines aux outils d'écologie industrielle classique, aux sciences sociales et aux outils des systèmes complexes pour tendre vers des systèmes urbains plus soutenables (Gerard et Basson, 2009).

1.3 Systèmes complexes ouverts et auto-organisés holarchiques

Afin d'améliorer la qualité du design et de la gestion des systèmes sociotechniques qui forment la ville et les systèmes industriels, il est important de mieux définir la manière dont les structures évolutives s'organisent. L'écologie des systèmes et l'ingénierie écologique permettent de comprendre et organiser les dynamiques complexes des réseaux énergétiques, matériels et cybernétiques (Tilley, 2003). À l'instar de l'écologie industrielle et des études urbaines, ces disciplines décrivent et organisent des systèmes complexes, thermodynamiquement ouverts et auto-organisés sous la forme de systèmes holarchiques. Ces processus d'auto-organisation sont le résultat de la loi de la maximisation de la puissance (Brown et al, 2004). Les systèmes complexes auto-organisés ouverts, tels que les écosystèmes naturels et les zones urbaines tentent de maximiser leur apport en énergie sur un territoire (Huang et al, 2007). L'homme par des apports en énergie toujours plus importants a ainsi accéléré la circulation de la matière tant en quantité qu'en vitesse (Lotka, 1922b).

Ces systèmes évolutifs qui suivent un apport en énergie constant se dirigent vers un état d'équilibre dynamique qui évolue autour d'attracteurs (Lotka, 1922a; Kays, 1999). Les processus d'auto-organisation créent des transformations qui lient les échelles ensemble symbiotiquement, maximisant le développement du système à toutes les échelles (Odum, 2002). Les études en écologie des systèmes ont permis de démontrer que les écosystèmes sont également organisés sous forme de structures holarchiques. Le concept d'holarchie, une version généralisée des hiérarchies traditionnelles avec des relations de pouvoir bidirectionnelles entre les échelles. Cet apport à la compréhension des systèmes complexes est central, car il s'agit d'une propriété structurelle des systèmes complexes auto-organisés ouverts comme l'univers, les écosystèmes et les anthroposystèmes (Huang, 1998; Odum,

2007 ; Brown et al, 2004). Ces structures et processus énergétiques sont les résultats des dynamiques locales qui forment les structures et procédés géophysiques, biotiques et anthropologiques dissipatifs (Kays, 1999). À cause de la seconde loi de la thermodynamique, toute transformation énergétique utilise des calories d'une sorte pour générer moins d'énergie d'une autre sorte, ces transformations énergétiques de différentes qualités créent des hiérarchies énergétiques (Brown et al, 2004). La figure 1.6 représente ces structures énergétiques.

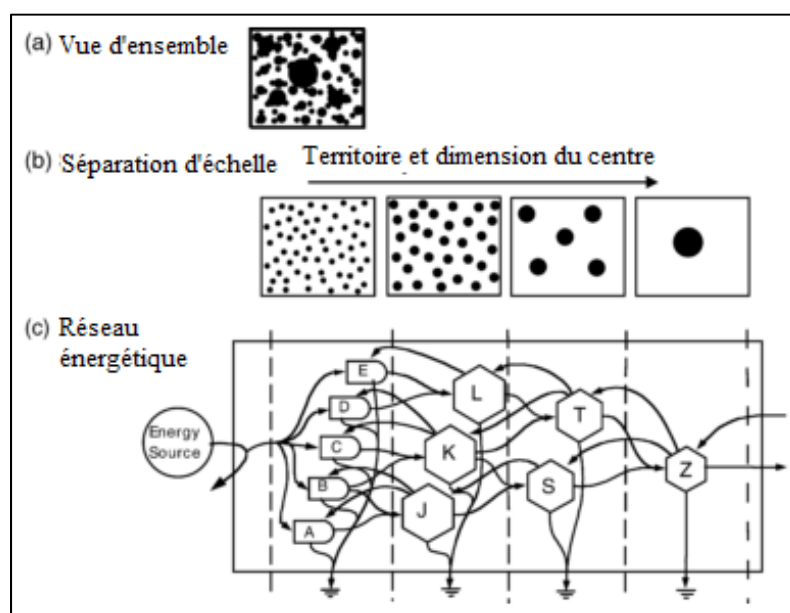


Figure 1.6 Structure des systèmes énergétiques holarchiques
Tirée de Brown et Ulgiati (2004, p. 206)

Les zones urbaines sont de parfaits exemples de ces structures dissipatives holarchiques : elles doivent accumuler et importer de grandes quantités d'énergie et de matière pour ensuite en dissiper une aussi grande quantité dans son environnement (Rees et Wackernagel, 1996). Elles sont les points ayant la plus grande centralité des réseaux holarchiques qui forment les systèmes d'échanges. La ville vit des surplus alimentaires, donc énergétiques, de son environnement. La reconnaissance de l'importance d'un réseau de places publiques et piétonnes par le nouvel urbanisme est également une reconnaissance d'un réseau holarchique que la forme urbaine engendre. Historiquement, l'éclairage des villes, vu de l'espace, suit une

telle architecture : le centre-ville des villes est plus illuminé que les banlieues (Brown et al, 2004) La ville et la forme urbaine sont donc une expression de la forme de ces structures dissipatives complexes que forment les processus et procédés de production et consommation industrielles (Dijkerma et Bosson, 2009). Tout comme dans les écosystèmes, l'énergie est concentrée au fur et à mesure que l'énergie transformée totale diminue. La compréhension de ces structures est un enjeu majeur à l'amélioration de la soutenabilité du système sociotechnique qui anime les processus de production et de consommation. (Giampietro et Mayumi, 1997). En identifiant les catalyseurs qui rendent possibles les changements, certaines niches technologiques, sociales ou environnementales peuvent être alors identifiées et développées pour créer des structures dissipatives sociotechniques plus efficaces. Pour y arriver, il est important de mieux comprendre le rôle des holons dans les holarchies (Kays, 1999).

Les holons ont deux définitions, car ils sont à la fois une composante des systèmes à l'échelle inférieure et une composante des systèmes plus grands (Giampietro et Mayumi, 1997). Il s'agit des composantes qui forment les attracteurs à leur échelle et qui lient le système aux échelles supérieures et inférieures dans les systèmes holarchiques. Ces systèmes holarchiques combinent les holons pour former des ensembles fonctionnels plus grands que la somme des parties individuelles. Ces organisations font émerger des propriétés propres au système ; elles ne peuvent être expliquées par des analyses réductionnistes (Odum et Barrett, 2005). Les holons et les liens qui les unissent lient les échelles des systèmes et modifient la capacité des systèmes à maintenir une cohésion dynamique. Cette caractéristique est généralement appelée propensité. Elle est, contrairement aux sens newtoniens des forces qui maintiennent un système, contextuelle et émerge des liens causals qui forment des catalyseurs dans le processus d'auto-organisation (Ulanowicz, 1996). En plus de la disponibilité des ressources et de l'information, la propension des systèmes complexes à s'auto-organiser dépendant du contexte dans lequel ils sont enchâssés (Kays, 2002). Ce contexte est le résultat de processus multiéchelles qui sont conditionnés par de multiples attracteurs qui maintiennent le système en état de quasi-équilibre (Rotmans et Loorbach, 2009). Les attracteurs ne sont pas externes aux agents humains, les aspirations et dynamiques culturelles sont des attracteurs qui

permettent l'émergence de ces nouvelles échelles d'organisation (Kays, 1999). Les conditions locales et les niches qui sont si importantes en écologie industrielle et en urbanisme pour déterminer les solutions à apporter ne sont en réalité que le résultat de l'organisation de ces holons qui font émerger la société dans laquelle nous vivons. Les niches sont les endroits où les agents, qui forment les holons, peuvent prospérer. Lorsque le système est poussé au-delà des distances critiques de l'équilibre, les systèmes ouverts répondent avec l'émergence de nouvelles reconfigurations d'actions organisées qui utilisent l'énergie qui modifie l'équilibre pour construire, organiser et maintenir ces nouvelles structures de holons (Kays, 1999). De nouvelles niches sont ainsi établies, elles forment de nouveaux attracteurs qui modifient le rôle des différents holons dans le système. Ces processus dissipatifs émergents, lorsqu'il y a suffisamment d'énergie disponible pour les supporter; et lorsqu'ils deviennent établis, ils forment les structures sociales, technologiques et encore physiques dans lesquelles nous vivons (Kays, 2002). Ces structures, formées de relations adaptatives non linéaires donnent de nouveaux contextes qui eux-mêmes permettent l'émergence, la coévolution de nouvelles structures autoadaptatives (Rotmans et Loorbach, 2009). Ces attracteurs, formés de holons, définissent la fenêtre de vitalité pour qu'il y ait une forme d'auto-organisation des acteurs alors autour de multiples sources d'énergie, de matériaux et d'information enchâssée dans les structures physiques de notre environnement. C'est ce qui donne lieu à des processus cohérents qui s'autoperpétuent dans le temps (Kays, 2002).

Cependant, il ne faudrait pas croire que ces processus dynamiques sont uniquement explicables par des processus thermodynamiques (Lotka, 1922). Il s'agit d'un résultat multifactoriel de n dimensions. La niche doit donc être définie par un espace de n dimension. Toute représentation à une seule dimension thermodynamique n'est donc pas une bonne représentation des dynamiques d'un système (Mansson et McGlade, 1993). Les études sous une approche thermodynamique demeurent toutefois une contribution importante à la compréhension de la nature des systèmes humains et naturels. Ces études doivent être associées aux autres dimensions pour pouvoir comprendre les systèmes complexes auto-organisés et ouverts holarchiques comme les villes, le système industriel ou les écosystèmes. La compréhension du rôle des holons dans les dynamiques de système requiert une étude par

de multiples perspectives et échelles (Kays, 2002). Pour chacune de ces perspectives, les scientifiques doivent reconnaître alors, leurs biais issus de leurs perspectives et des dimensions utilisées pour décrire ces systèmes complexes (Giampietro et Kayumi, 1997). Le rôle scientifique d'aide à la décision dans un paradigme de systèmes complexes auto-organisés ouverts et holarchiques est d'apprécier certaines caractéristiques narratives, qualitatives et quantitatives de ces systèmes. Ils doivent permettre de décrire le contexte humain, la nature hiérarchique du système, les attracteurs qui sont accessibles au système, une description idéalement quantitative du comportement du système en fonction de divers attracteurs et une connaissance des boucles de rétroactions catalytiques et leurs gradients qui organisent les systèmes autour des attracteurs (Kays, 1999). Une approche complexe et adaptative doit inclure la possibilité de créer des changements structurels en fonction des forces externes qui pourraient mener à cette transition. La gestion des systèmes complexes signifie donc qu'il faut avant tout influencer les processus de changement d'un état à un autre (Rotmans et Loorbach, 2009). Les changements dans ces systèmes sont non-linéaires : ils sont imprédictibles. Il est donc pratiquement impossible de modéliser leur évolution de manière précise ; la modélisation permet uniquement d'élaborer des scénarios narratifs (Kays, 1999). L'étude et le développement de ces systèmes doivent être incrémentaux et passés par une multitude de divers projets pilotes (Chertow et Ehrenfeld, 2012). Il faut effectuer des changements incrémentaux qui se dirigent vers de nouveaux attracteurs en des petites étapes. Pour y arriver, il est important de donner les ressources nécessaires aux différentes niches qui peuvent créer ces nouveaux attracteurs. Il s'agit d'un processus d'apprentissage et de transitions. La supervision de ces changements doit porter sur la dimension physique des acteurs d'un système, elle doit être qualitative et quantitative (Rotmans et Loorbach, 2009). La gestion de systèmes humains nécessite une gestion adaptative qui requiert un processus prenant acte des différences entre la planification et les résultats comme un apprentissage (Keys, 1999).

1.3.1 Axes d'études quantitatifs des systèmes complexes

Devant la nécessité de complexifier les interactions humaines sur toutes les échelles de grandeurs pour devenir plus soutenable, il est nécessaire de développer des outils pour mesurer et d'optimiser les différents sous-systèmes qui soutiennent les activités humaines. Ces outils doivent permettre aux designers et aux gestionnaires doivent comprendre comment le système industriel naît et croît à différentes échelles (Ehrenfeld, 2009). Pour y arriver, ils doivent comprendre les enjeux de redondance, contingence et de planification continue qui évoluent au fil des attracteurs qui influencent le développement du savoir. Une mesure quantitative de ces différences permettrait d'optimiser ces valeurs pour obtenir des systèmes plus efficaces (Parrot, 2010). Les outils des sciences complexes permettent de quantifier certaines propriétés pour élucider les effets quantitatifs des différentes dynamiques qui régissent l'évolution du système industriel (Dijkema et Basson, 2009). Les systèmes complexes peuvent être quantifiés sur trois axes et trois dimensions. Les axes spatial, temporel ou organisationnel peuvent être étudiés sur plusieurs échelles de grandeur. Les analyses issues des sciences complexes sont particulièrement bien adaptées aux situations où une multitude d'acteurs interagissent pour créer des résultats à l'échelle macro qui sont difficiles, pratiquement impossible à décrire (Baynes, 2009). Elles sont donc très bien adaptées à la caractérisation des systèmes de production et de consommation humaine.

L'axe spatial permet d'évaluer l'impact des processus évolutifs sur un système car l'usage de l'espace est l'empreinte physique des processus naturels et humains (Sayed et Turner, 2012). Les humains ont utilisé la planification urbaine pour modifier les pratiques culturelles. La nature des études urbaines repose sur ce paradigme. En écologie industrielle, bien que mal définie, l'importance des caractéristiques géographiques est un élément central. Les études urbaines se basent généralement sur l'analyse spatiale des formes urbaines. Cet axe est donc déjà considéré comme primordial, mais les techniques d'analyse, de modélisation et de gestion des systèmes sur un axe spatial demeurent statistiques ou mécaniques. L'axe spatial est généralement décrit par des statistiques globales ou par des outils de planification

centralisés qui laissent peu de place au développement des niches. Elles décrivent les systèmes par des méthodes qui limitent la complexité.

L'axe temporel permet de comprendre l'évolution dans le temps des processus dynamiques qui forment les systèmes complexes. Cet axe permet par exemple de comprendre comment la planification des villes a modifié leur morphologie. L'étude temporelle permet donc de faire le lien entre les structures et les fonctions sur une base dynamique. Elles permettent de comprendre les boucles de rétroaction qui mènent à certaines configurations de systèmes. L'étude de l'évolution des processus industriels par exemple permet de comprendre comment les dynamiques environnementales ont pu mener la ville et les industries de Kalundborg à coopérer pour établir une symbiose industrielle (Jacobsen, 2006). Elle permet également de comprendre les raisons qui ont poussé les planificateurs urbains à prioriser la faible densité au XXe siècle et par la suite la haute densité en ce début de XXIe siècle. L'axe temporel permet de comprendre le rôle des holons dans les dynamiques et les conditions environnementales qui guident, par des boucles de rétroaction le développement des villes.

L'axe organisationnel permet de comprendre la nature des relations entre les holons qui forment ces processus. L'étude des structures énergétiques holarchiques présente un exemple d'évaluation de structures organisationnelles. Elle permet d'étudier et d'expliquer les types de structures comme la forme urbaine ou encore la configuration d'écosystèmes naturels (Odum et Peterson, 1996; Lee et al, 2009) La compréhension de ces structures permet de mieux organiser les systèmes de consommation et de production sur un territoire. Elle permet de comprendre les distances clés pour optimiser les différents modes de transport. Comprendre les structures permet de comprendre les liens entre les holons, leurs fonctions et l'organisation des systèmes.

1.3.2 Dimensions d'étude des systèmes complexes

Ces axes engendrent des approches théoriques et opérationnelles pour mesurer et gérer des systèmes complexes. Ils permettent d'aborder, quantitativement, mais également

qualitativement différents aspects qui guident l'évolution des systèmes complexes. Les outils d'étude, de modélisation et de gestion de systèmes complexes doivent donc passer par l'un ou plusieurs de ces axes pour être cohérents. Les axes spatial, temporel et organisationnel peuvent être étudiés sous trois dimensions qui permettent de donner plusieurs perspectives du même système. La contingence historique, la connectivité et l'hétérogénéité sont les dimensions qui permettent de comprendre les structures qui forment les systèmes complexes (Cadenasso et al, 2006; Hsui et Wang, 2013).

La contingence historique explique comment le futur d'un système est dépendant de son passé (Ehrenfeld, 2009). Elle permet de comprendre les dynamiques qui ont mené le système à l'état actuel. Ces dynamiques sont généralement pertinentes pour comprendre et formuler des scénarios évolutifs plus réalistes. L'impact le plus déterminant du rôle de la contingence historique est l'influence des conditions initiales sur les systèmes. L'évolution non linéaire des systèmes complexes permet d'amplifier certaines différences infinitésimales entre deux systèmes (Hook, 2011). Elles sont donc totalement dépendantes des conditions initiales exactes. C'est ce qui donne à la modélisation la capacité de créer des scénarios et non de recréer la réalité.

La connectivité est associée à l'étude de réseaux généralement. Elle est utilisée pour décrire la manière dont les réseaux sociaux fonctionnent ou encore la manière dont les systèmes de transports se comportent. La connectivité est généralement étudiée en écologie industrielle et dans les études urbaines par des méthodes issues la théorie des graphes. Elles ont permis de trouver les points névralgiques des structures organisationnelles, notamment avec le concept de centralité. Les mesures de centralité par exemple permettent de comprendre les holons qui sont les plus importants dans les structures sociales, énergétiques ou encore dans les systèmes transport. La centralité permet d'expliquer l'importance de certaines zones, notamment pour la disposition des activités commerciales sur un territoire et donc du rôle de certains coins de rues, quartiers ou villes. Il s'agit d'une dimension largement étudiée pour caractériser les systèmes biologiques, augmenter le capital social, améliorer la logistique de transport ou comprendre les liens entre les caractéristiques géographiques et économiques.

L'hétérogénéité est un élément fondamental des systèmes complexes, ses caractéristiques guident les comportements et les relations des composantes et des sous-systèmes d'un système complexe (Rotmans et Loorbach, 2009). L'hétérogénéité se définit comme la complexité ou la variabilité quantitative de propriétés du système dans l'espace ou le temps. Elle dépend de l'échelle et de la résolution des structures analysées (Li et Reynolds, 1995). Dans les études en écologie industrielle, bien qu'elle soit considérée importante, cette caractéristique des systèmes industriels est peu étudiée : les caractéristiques hétérogènes nécessaires aux symbioses demeurent mal connues (Lombardi et al, 2012). Dans l'étude des formes urbaines, elle est considérée comme importante, car elle engendre la possibilité de coopération et de symbiose. Elle permet la redondance fonctionnelle sur un territoire. Une plus grande hétérogénéité des acteurs peut également augmenter la productivité sous forme de production primaire sur un territoire (Jensen et al, 2012). L'augmentation de l'hétérogénéité, plus précisément de la diversité des holons et de leurs relations et donc de la complexité, est une source d'émergence de la soutenabilité (Parrot, 2010). La productivité accrue est le produit d'une augmentation de la complémentarité spatiale et temporelle des acteurs composant les structures holarchiques des systèmes complexes ouverts (Cardinale et al. 2007). Dans les processus évolutifs naturels, l'hétérogénéité de ces structures dans l'espace et le temps agit comme un processus catalytique qui engendre davantage de biomasse en améliorant les possibilités d'optimisation au travers de niches écologiques. Ces avantages existent également dans le monde industriel tel que le démontrent les études sur les symbioses industrielles et les systèmes urbains. Il semblerait que ces structures correspondent aux ensembles systémiques les plus complexes qui font émerger la soutenabilité des ensembles biotiques. Ces structures ne se limitent pas aux flux énergétiques, mais également aux flux d'information et de matière (Odum, 2003). Elles pourraient ainsi expliquer la nature autosimilaire des métabolismes croissants en fonction de la dimension des villes (Batty et Longley, 1994) Ces structures ne sont ni entièrement aléatoires, ni entièrement organisées (Parrot, 2010). Les modèles de gestion de l'hétérogénéité sur un territoire sont donc dépassés ; ils requièrent une compréhension des phénomènes d'émergence qui doivent être utilisés pour comprendre et diriger l'ordre spatial apparent (Batty, 2007).

Les méthodes de planification et de gestion centralisée des systèmes urbains comme le zonage euclidien sont donc obsolètes. La soutenabilité et la viabilité des systèmes urbains et périurbains devraient donc reposer sur l'articulation de ces structures holarchiques hétérogènes. Il serait alors possible d'influencer les différents sous-systèmes en modifiant les propriétés des attracteurs locaux qui guident les processus. La distribution de ces holons modifie également les niches industrielles et donc les possibilités de développer des symbioses entre les acteurs. Il est donc important de développer des outils de caractérisation non seulement les réseaux, mais également l'hétérogénéité des composantes, les holons, des systèmes complexes qui définissent nos modes de production et de consommation. La plus grande difficulté de caractérisation de cette hétérogénéité réside dans sa nature géométrique : leurs empreintes ne suivent pas la géométrie euclidienne et sont donc très difficiles à décrire sur une base quantitative (Frankhauser, 1998). La maîtrise d'un outil non euclidien qui permet d'étudier et d'agir sur l'ordre spatial des activités humaines permet d'influencer l'émergence des propriétés des systèmes. L'usage de nouveaux outils d'analyse pour caractériser la composition hétérogène des systèmes est donc requis (Sayed et Turner, 2012). Elle permettra de comprendre les niches pour ensuite identifier les solutions qui sont applicables aux systèmes locaux (Thomas et al, 2010).

1.4 Géométrie fractale

L'étude des systèmes urbains dans une perspective d'écologie industrielle semble donc une voie d'avenir pour réduire l'impact des activités humaines sur les systèmes naturels qui nous supportent. Les outils classiques d'écologie industrielle permettent de comprendre et de réduire l'impact des différentes formes urbaines en estimant l'ensemble des impacts sur les structures organisationnelles qui supportent nos activités. Il manque toutefois à l'écologie industrielle des outils d'étude, de design et de gestion de nouvelles formes urbaines plus soutenable qui permettent l'émergence de symbioses dans les processus sociotechniques de consommation et de production qui donnent vie aux espaces urbains. Les outils issus de la théorie des graphes permettent de comprendre les réseaux sociaux et les structures énergétiques qui composent les systèmes naturels et humains permettent d'étudier la

connectivité et la contingence historique. Il manque toutefois un outil efficace pour mesurer et déterminer l'hétérogénéité de ces structures. Les fractales pourraient être un des outils nécessaires à la gestion de la diversité dans les espaces urbains, car elles permettent de mesurer l'hétérogénéité des structures et des fonctions ainsi que les changements dans les paysages sur différentes échelles (Li, 2000). La géométrie fractale pourrait donc être un outil complémentaire aux outils classiques d'écologie industrielle et des outils issus de la théorie des graphes pour faire la gestion des systèmes urbains et industriels. En décrivant les structures et les fonctions des configurations hétérogènes de holons qui forment les systèmes urbains, il serait possible de comprendre comment la composition de la forme urbaine influence les processus de consommation et de production des systèmes sociotechniques et ainsi réduire leur empreinte environnementale.

1.4.1 Définition de la géométrie fractale

La capacité de la géométrie fractale à décrire de manière quantitative des processus naturels lui a permis d'être appliqué aux art et technologies virtuelles. Toutefois, sa diffusion et son application sont venues réécrire les définitions apportées par Benoit Mandelbrot, qui elle était beaucoup plus générales. L'application aux systèmes urbains doit donc s'approprier sa définition initiale pour être applicable.

1.4.1.1 Origine de la géométrie fractale

La géométrie fractale permet de caractériser les géométries irrégulières et fragmentées telles que les formes naturelles. (Mandelbrot, 1983). Le concept des fractales apparaît en 1967, quand Benoit Mandelbrot répond à un problème posé précédemment par J.F Richardson : comment mesurer la longueur de la côte maritime d'un pays si elle dépend directement de l'unité de mesure (G) utilisée? Son équation démontrait que la mesure de la longueur ($L(G)$) est fonction de l'unité de mesure (G) ainsi que deux constantes : une constante positive (F) et une seconde supérieure à 1 (D) (Richardson, 1961).

$$\log (L(G)) = (1-D) \log (G) + \log (F) \quad (1.1)$$

Mandelbrot note alors que lorsque les valeurs de G restent les mêmes et que la valeur de la constante D dans l'équation présentée par Richardson varie, plusieurs courbes irrégulières distinctes sont dessinées. La constante D dans l'équation évoque la perception humaine de l'irrégularité. Par exemple, pour une surface lisse, la valeur serait de 1.00 alors que pour la côte d'Angleterre qui est très irrégulière, elle est de 1.25. Les fractales sont des formes géométriques dont les dimensions se situent entre deux dimensions topologiques : elles sont irrégulières. Dans le cas du problème de Richardson, ce n'est pas l'unité de grandeur qui fait varier la mesure finale mais plutôt l'échelle de mesure de son irrégularité (Mandelbrot, 1967). La valeur de D dans l'équation de Richardson indique alors qu'il est possible d'utiliser une valeur aux numériques approximant les mesures avec les échelles de mesures inférieures à l'unité de mesure utilisée dans l'équation (Pentland, 1984). La dimension fractale permettrait donc de limiter le biais associé à l'unité de mesure utilisée pour mesurer le périmètre de la côte d'un pays.

1.4.1.2 Confusion entourant la nature de la géométrie fractale

Un aspect important de l'étude des structures fractales est le choix de la définition de la dimension fractale qui est le mieux appliqué à l'étude de cas (Yadav et Al, 2010). Pour Mandelbrot, la géométrie fractale repose sur la mesure de la dimension Hausdorff-Besicovitch. La définition d'un ensemble géométrique fractal est qu'il possède toujours une dimension de Hausdorff-Besicovitch supérieure à sa dimension topologique. La dimension topologique est toujours un nombre entier : 0 pour un point, 1 pour une ligne, 2 pour des surfaces et 3 pour un solide. La dimension de Hausdorff-Besicovitch est différente, car elle est une mesure fractionnaire (Mandelbrot, 1983). Ainsi, la dimension d'une ligne fractale est donc supérieure à 1. La mesure de cette dimension se base sur une méthode de mesure de points dans l'espace en couvrant une surface avec des ensembles de différentes dimensions et limites connues. La valeur est généralement égale à la dimension fractale. L'application de la dimension Hausdorff-Besicovitch est difficile à utiliser de manière rigoureuse (Mandelbrot,

1967). Cette difficulté repose sur le concept même de la dimension de Hausdorff-Besicovitch. Elle est redondante avec sa mesure : comme la valeur de l'unité de longueur utilisée pour mesurer un ensemble géométrique peut varier entre zéro et l'infini, sa dimension peut aussi être entre zéro et l'infini (Barcellos, 1984). Elle peut n'être d'aucune utilité pour des expériences pratiques et est trop compliquée pour les expérimentations théoriques, à l'exception des fractales autosimilaires (Mandelbrot, 1985)

Il est important de préciser la définition de fractale utilisée, car il y a une dissonance entre celles apportées par Mandelbrot et celle plus générale qui est généralement véhiculée (Halley et al, 2004) D'un point de vue moins formel, les fractales sont généralement qualifiées de formes géométriques qui sont statistiquement autosimilaires, dont la dimension mesurée, n'est pas entière (Barcellos, 1984). Cette définition est pourtant en contradictions avec les propos de Mandelbrot. En présentant sa définition des fractales, il a pris soin de préciser de ne pas les qualifier trop précisément (Mandelbrot, 1983). Les fractales ne sont pas nécessairement identiques à toutes les échelles de grandeur C'est un amalgame entre le concept de fractales et celui de fractales autosimilaires (Mandelbrot, 1985). La sélection de cette sorte de fractale pour désigner l'ensemble des fractales repose sur un biais méthodologique : les fractales qui sont statistiquement autosimilaires sont les meilleures. À l'image de la géométrie euclidienne qui prend comme condition initiale que toutes les lignes sont droites, l'étude des fractales se base sur une autosimilarité statistique sur plusieurs échelles de grandeur pour mesurer sa dimension. Les diverses méthodes de mesures de la dimension fractales arrivent toutes au même résultat pour des fractales ayant des propriétés statistiquement autosimilaires, mais elles divergent dans le cas contraire. Cette divergence entre les résultats est attribuable aux différences entre les échelles de grandeur mesurées. . (Mandelbrot, 1983) Ainsi, la fractale idéale pour la méthodologie proposée par Mandelbrot possède des propriétés d'autosimilarité ou d'autoaffinité (Mandelbrot, 1985). La définition de fractale utilisée dans ce cas est une forme irrégulière qui a une dimension fractale supérieure à sa dimension topologique (Foroutanpour -et Al, 1999). L'autosimilarité n'est pas une condition nécessaire à l'analyse de la géométrie fractale. Cette valeur de D qui caractérise l'irrégularité d'un ensemble géométrique est estimable par la dimension fractale. Cette

mesure évoque la perception de la rugosité d'une forme géométrique (Mandelbrot, 1985 ; Pentland, 1984). Elle peut-être aussi analysée comme une valeur qui caractérise la complexité d'un ensemble géométrique (Yadav et al, 2010; Foroutan-pour et al, 1999). La dimension fractale dans ce cas est donc un indicateur de densité d'occupation d'une forme irrégulière et par extension une mesure partielle de la complexité des ensembles mesurés. La dimension fractale permet donc de caractériser, par une analyse quantitative, des formes irrégulières qui ne peuvent pas l'être par la géométrie Euclidienne (Mandelbrot, 1967; Jin et Ong, 1995; Foroutan-Pour et Al, 1999). Elle permet ainsi de mesurer l'importance de certaines propriétés hétérogènes dans l'espace.

1.4.1.3 Mesure de la dimension fractale

Afin d'éviter les limites de la dimension de Hausdorff-Besicovitch, plusieurs techniques ont donc émergé pour mesurer la dimension fractale de formes irrégulières (Mandelbrot, 1983; Jin et al, 1995). La dimension de Minkoswky-Bouligand, communément appelé le *box counting method* est la plus utilisée car elle est la plus versatile. Il s'agit de la méthode la plus simple et son calcul peut être automatisé. (Li et Al, 2009). Il s'agit aussi d'une méthode qui peut être utilisée pour toutes les sortes de fractales (Foroutan-pour et Al., 1999). Elle est généralement associée à une mesure de la densité (Smith et al, 1996).

La méthode consiste à couvrir une surface de boîtes mutuellement exclusives pour ensuite compter la quantité de boîtes qui contiennent des points de l'ensemble fractal (Yadov et al, 2010). Deux valeurs sont alors prises et enregistrées : la dimension des boîtes, ϵ , avec lesquelles on couvre le territoire et la quantité de boîtes qui sont couvertes par l'ensemble géométrique, $N(\epsilon)$ (Foroutan-pour et al, 1999). La dimension des boîtes change sur plusieurs échelles de grandeur. Ensuite, la dimension fractale pour chaque échelle de grandeur est calculée en utilisant l'équation 1.2. La moyenne des différentes échelles de grandeur est

ensuite calculée pour estimer la dimension fractale sur une échelle globale. Toutefois, pour la calculer, il faut prendre en compte certains paramètres.

$$Df = \log (N(\epsilon)) / \log (1/ \epsilon)) \quad (1.2)$$

La mesure de la dimension fractale par la méthode du comptage de boîtes est remplie de problèmes pratiques (Gonzato et Al, 2000). Dans l'analyse de données réelles, même avec la même méthode, si les échelles de grandeur choisies pour mesurer la dimension fractale sont différentes, le résultat sera différent (Jin et Ong, 1995). Il faut donc pour faire des analyses comparatives, utiliser toujours les mêmes échelles de grandeurs. Sinon, les résultats n'exprimeront pas les mêmes mesures. La manière dont l'image est circonscrite dans l'espace a aussi un effet important sur la mesure de la dimension fractale. Pour prendre une bonne mesure, il faut que les limites de l'espace mesurées coïncident avec la largeur de la forme. Il est donc important que la forme géométrique touche aux limites de l'espace mesuré, sinon, la dimension fractale est sous-estimée par la mesure du vide qui entoure l'ensemble géométrique. Le biais occasionné par une mauvaise calibration est généralement limité à quelques pour cent (Gonzalo et al, 2000). Le choix des dimensions des boîtes qui seront utilisées pour calculer la dimension fractale est un autre paramètre qui fera varier la qualité et la précision de la mesure. Leurs grosseurs doivent être incluses entre deux contraintes limites: de la saturation au point ponctuel. Autrement, la densité de l'occupation du territoire fera varier la valeur de la dimension fractale et la mesure perd en précision. La limite supérieure de la dimension des boîtes utilisées dépend du point de saturation. Si les boîtes sont toutes saturées, la valeur de la dimension fractale sera modifiée, car elle sera de 2 pour toutes les autres mesures subséquentes (Halley et al, 2004). Généralement, il s'agit d'une surface d'environ 25 % de la surface totale, mais cela peut varier dans le cas d'ensembles géométriques qui sont plus dispersés (Foroutan-pour et al, 1999). Pour la frontière inférieure, c'est à l'évaluateur de mesurer la plus petite dimension : elle doit se résumer à une ponctualité contextuelle si l'on mesure des objets. Ainsi, dans un système comme un écosystème forestier, un arbre est une ponctualité dans une échelle d'un kilomètre. L'usage d'une échelle de boîtes d'un mètre de côté agit alors plutôt comme une mesure de

remplissage, il faut ajuster la dimension des boîtes en fonction des objets mesurés (Kunin et al, 2000). Cependant, si l'on cherche à mesurer la distribution de la biomasse par exemple, la limite inférieure est beaucoup plus fine, car on cherche la couverture du territoire et non l'individu. (Halley et al, 2004). Le choix de la dimension des boîtes pour chacun des extrêmes est donc un facteur important qui va varier en fonction du type de mesure désiré.

L'orientation des formes géométriques peut aussi mener à un biais dans certains cas. Comme la distribution des boîtes est sous la forme d'une grille, lorsque l'on mesure des courbes, la valeur peut varier en fonction de l'angle de mesure. La variation de la valeur obtenue par rapport à l'angle de la forme est due au format numérique de la mesure. L'approximation de la forme géométrique en angle par des pixels, donne une courbe en forme d'escalier créé par les doubles pixels, un peu comme un escalier et non une droite. Dans le cas de la mesure de lignes brisées ou de géométrie fine, il peut donc s'agir d'une cause d'incertitude importante. Ce biais est alors généralement d'environ 11 % supérieur à la valeur réelle (Gonzato et al, 2000). Finalement, différentes configurations spatiales peuvent avoir la même dimension fractale (Dong, 2000, Mandelbrot, 1983). Il s'agit de la limite principale de la dimension fractale : une même valeur peut avoir différentes dispositions spatiales, mais un seul indice d'occupation de l'espace (Plotnick et al, 1993; Hanen et al 2009). La dimension fractale ne peut discriminer les ensembles géométriques dans ces cas.

1.4.2 Mesure de la lacunarité

La mesure de la lacunarité est issue des limites de la dimension fractale à décrire la distribution d'ensembles géométriques complexes (Hoechstetter et al, 2011). Il s'agit d'un autre concept amené par Benoit Mandelbrot, car la dimension fractale ne suffisait pas pour décrire les galaxies (Mandelbrot, 1983). Le concept de lacunarité a été introduit pour différencier les différentes textures qui ont la même dimension fractale, mais qui sont visuellement différentes dans les phénomènes physiques et en écologie (Dong, 2009; Feagin, 2003). L'usage de la lacunarité pour caractériser efficacement un ensemble géométrique fractal est donc complémentaire à la dimension fractale. La dimension fractale ne peut pas

décrire l'apparence visuelle; elle ne décrit pas les caractéristiques de remplissages des données qui remplissent l'espace (Halley et Al, 2004). Toutefois, chacune des méthodes de mesure peut être utilisée de manière indépendante.

Plus précisément, la mesure de la lacunarité permet de décrire l'homogénéité d'une structure et d'évaluer le degré d'agglomération dans différentes régions d'un ensemble géométrique considéré sur une base quantitative (Chmiela et Al, 2006). Plus la lacunarité est grande, plus elle décrit une agglomération relative importante ou encore une plus grande distance moyenne dans la distribution d'un ensemble géométrique considéré (Plotnick et al, 1993). Ainsi, si l'espace est occupé en grappes concentrées par une géométrie elle devrait avoir une plus grande lacunarité alors qu'une plus diffuse aura une plus faible lacunarité (Kirkpatrick et Wishampel, 2005). L'écart type des valeurs obtenues pour chacune des différentes échelles de grandeur utilisées pour mesurer permet d'obtenir de l'information supplémentaire pour différencier deux ensembles géométriques ayant la même lacunarité. Une plus grande valeur de l'écart type indique une concentration alors qu'une plus petite valeur indique plus de diffusion. (McIntyre Wiens, 2000) Plus l'écart type est petit, plus l'espace est occupé de manière régulière (Kirkpatrick et Wishampel, 2005). L'écart type permet donc de départager deux ensembles géométriques différents ayant une même valeur moyenne de lacunarité.

En plus de l'écart type, un graphe des valeurs obtenues par le calcul de la lacunarité en fonction de la grandeur de la boîte contient des informations significatives sur la structure spatiale d'une image sur plusieurs ordres de grandeur (Dougherty, 2001). Elle permet de décrire l'évolution de l'homogénéité de l'ensemble géométrique sur plusieurs ordres de grandeur. Ainsi, pour les fractales pures, la valeur de la lacunarité devrait être constante sur toutes les échelles de grandeurs (Allain et Cloître, 1991). Le coefficient de variation devrait être constant avec l'échelle, car la forme n'est qu'un agrandissement de la forme aux plus petites échelles. Ainsi, leur moyenne et leur écart type devraient changer dans la même proportion par rapport à l'échelle et le ratio lui devrait demeurer constant (Smith et al, 1996). La mesure de la lacunarité peut être aussi appliquée à des ensembles géométriques fractals qui ne sont pas nécessairement statistiquement autosimilaires (Dong, 2000). Dans le cas des

fractales qui ne sont pas autosimilaires. La lacunarité est complètement indépendante de la dimension fractale : les valeurs de la lacunarité pour chacune des échelles de grandeur permettent de décrire l'évolution de l'homogénéité sur plusieurs échelles de grandeurs (Mandelbrot, 1983). Elles permettent ainsi de décrire la structure spatiale de l'occupation du territoire par un ensemble géométrique. Ainsi, une courbe des mesures de la lacunarité pourrait décrire une agglomération importante aux échelles de grandeurs inférieures et une homogénéité aux échelles supérieures pour une forme géométrique considérée. Elle aurait donc une valeur mesurée plus grande aux petites échelles, car il y aurait une plus grande hétérogénéité ou un arrangement plus complexe alors qu'il y aurait une valeur plus faible, indiquant une plus grande homogénéité, sur les échelles supérieures (Myint et Lam, 2005).

1.4.3 Calcul de la lacunarité

La lacunarité est définie par une relation entre le premier et le second moment d'une distribution probabiliste (Feagin, 2003). Il s'agit de la mesure de la déviation d'un objet géométrique par rapport à l'invariance de la translation sur cette forme (Malhi et Roman-Cuesta, 2008). L'invariance de translation peut s'expliquer facilement avec des suites binaires. Considérons une séquence où on alterne des 1 et des 0: 0101010101. Cette séquence si elle est copiée et déplacée de deux cases est identique à la première. C'est ce qu'on appelle l'invariance de translation. Ainsi, pour une matrice qui possède des agglomérations de données, la séquence serait plutôt de 1010010101 et aurait donc des espaces avec différents espaces, incluant celle avec deux zéros. Plus cet espace entre les données est grand, plus les mesures de lacunarité sont élevées (Roy et al, 2010). Mathématiquement, la lacunarité est exprimée par le ratio de la moyenne sur la variance de l'ensemble géométrique considéré (Elkie et Rempel, 2001). Elle donne l'information complémentaire à la dimension fractale en mesurant l'espace non occupé, le vide, d'un ensemble et décrit ainsi la manière dont l'espace est rempli par un ensemble géométrique (Tolle et al, 2008). La lacunarité est donc une mesure adimensionnelle de la dispersion des composantes d'un ensemble géométrique (Roy et al, 2010).

L'une des méthodes les plus utilisées est la *gliding box method*, elle permet de décrire les géométries d'ensembles déterministes et aléatoires (Myint et Lam, 2005). La *gliding box method* est généralement appliquée sur des images binaires (Hanen et al, 2009). La lacunarité est calculée à l'aide d'une boîte initiale de dimension (r), tournant autour d'un point central. La masse (S) occupée dans la boîte par les pixels est alors calculée ($n(S, r)$) (Feagin, 2003; Plotnick et al, 1993). La distribution des masses des boîtes est alors convertie dans une distribution probabiliste $Q(S, r)$ qui évalue le rapport entre le nombre de boîtes occupées $n(S, r)$ et le nombre total de boîtes $N(r)$ (Tolle et al, 2008). Ensuite, la boîte est systématiquement glissée d'un incrément dans l'image, un pixel à la fois, et la masse est calculée pour chacune des boîtes qui chevauchent l'ancienne (Myint, et Lam, 2000). Les états des premières ($Z^{(1)}$) et secondes ($Z^{(2)}$) distributions sont alors déterminés (Plotnick et al, 1993; Plotnick et al, 1996). C'est à ce moment que l'invariance (L) est calculée. Le processus est répété par la suite sur l'ensemble de la géométrie qui est mesurée en glissant la boîte autour du point central avec un rayon R .

$$Q(S, r) = n(S, r) / N(r) \quad (1.3)$$

$$Z^{(1)} = \sum p Q(S, r) \quad (1.4)$$

$$Z^{(2)} = \sum p^2 Q(S, r) \quad (1.5)$$

$$L = Z^{(2)} / (Z^{(1)})^2 \quad (1.6)$$

Lorsque la lacunarité est calculée pour une échelle de grandeur, la dimension de la boîte est ensuite agrandie par un facteur de 2 et la lacunarité à l'échelle de grandeur donnée est recalculée. (Feagin, 2003) L'expérience est répétée avec plusieurs dimensions de boîtes qui augmentent. Pour chaque échelle de grandeur donnée, on obtient une mesure de lacunarité qui lui correspond (L). D'un point de vue statistique, la mesure de la lacunarité pourrait être simplifiée en reconnaissant que la lacunarité est le ratio de la variance sur la moyenne au carré plus un (Plotnick, 1993, Greenhill, 2003)

$$L = \text{variance (S)} / \text{moyenne (S)}^2 + 1 \quad (1.7)$$

Les valeurs obtenues (L) varient en fonction de la dimension des boîtes (r) de mesure et une moyenne est par la suite calculée. Cette valeur doit être considérée comme une mesure descriptive des courbes de lacunarité. Elle peut être vue comme un paramètre d'approximation qui regroupe l'information des courbes en une seule valeur. (Hoechstetter et al, 2011) Les valeurs estimées représentent un état d'homogénéité. Dans le cas d'une faible lacunarité, en partant du point central et en naviguant dans l'espace, un observateur devrait voir une homogénéité spatiale de l'ensemble géométrique apparaître rapidement. Pour une valeur de lacunarité plus grande, l'apparence d'homogénéité de l'ensemble géométrique apparaîtra plus lentement lorsque l'on partira du même point (Mandelbrot, 1983).

La *gliding box method* comporte certaines limites qu'il faut considérer lorsque l'examen d'un ensemble géométrique est effectué. En analyse d'image, une perte de précision survient lors de la transformation d'une image en matrice binaire. Le résultat dépend du traitement de l'image que l'on fait. Le choix de la nuance de gris qui sera apparentée à un zéro ou un 1 dans la transformation de l'image sous format binaire est un élément déterminant lorsqu'une image en couleur est transformée en image binaire. Ce choix peut donner des résultats variables en fonction du choix de certains paramètres régissant la transformation de l'image en 0 ou en 1 (Feagin, 2003). Il est donc important de garder les paramètres régissant cette transformation constante pour pouvoir effectuer des analyses comparatives.

La lacunarité est aussi dépendante des échelles de mesure sur lesquelles elle est mesurée (Dong, 2009). Il s'agit d'un élément important à considérer, car les propriétés d'une image mesurée dépendent de l'échelle de l'observation (Greenhill et al, 2003). Par exemple, pour le cas d'une forme géométrique aléatoire fractale, si la forme géométrique aléatoire mesurée est plus petite que la dimension de la boîte, la variance de la distribution dans les boîtes va s'approcher de zéro et la lacunarité va être proche de 1. À l'inverse, si la boîte est plus petite que la grandeur de la forme géométrique aléatoire, la lacunarité semblera hétérogène et l'estimation sera plus grande (Plotnick et al, 1993). La variance de translation est très

dépendante de l'échelle : des objets hétérogènes à une petite échelle peuvent devenir homogènes à une plus grande et vice et versa (Mahi et Roman Cuesta, 2008). Pour les analyses comparatives, les échelles de grandeurs utilisées doivent être les mêmes sinon la comparaison n'est pas valide, car ils donneraient des résultats différents. Il est aussi préférable de choisir des dimensions de boîtes qui prennent en compte la dimension des objets mesurés. Le nombre de boîtes devient très petit lorsque les grosseurs des boîtes deviennent grandes relativement à la dimension de la figure. Les algorithmes standards de mesure de la lacunarité qui ont des géométries distribuées de manière hétérogène ou encore agrégée ont des résultats moins probants, car ils suréchantillonnent les données centrales (Feagin et al, 2007). Il s'agit de la principale faiblesse de la glinding box method. Il s'agit du *edge effect*, il faut donc prendre en compte cet effet lorsque l'on analyse les résultats si aucun algorithme de correction n'est utilisé.

1.4.4 Champs d'application de la géométrie fractale

Malgré ces paramètres fractals sur qui peuvent faire varier les résultats, les propriétés de la dimension fractale lui ont permis de devenir un outil utilisé pour décrire efficacement les systèmes organisationnels (Halley et Al, 2004). L'application de l'analyse des cartes en deux dimensions est ainsi devenue un outil d'analyse quantitative important (Gonzato et Al, 2000). De son côté, la lacunarité a été utilisée dans plusieurs milieux pour la modélisation sur plusieurs ordres de grandeur d'ensembles géométriques spatiaux présents dans les sciences de la terre, les sciences environnementales, l'écologie et la planification urbaine (Dong, 2009; Wu et Sui, 2001).

1.4.4.1 Applications de la dimension fractale

En biologie, les processus écologiques des systèmes naturels sont influencés par disposition spatiale de ses composantes (Odum et Barrett, 2005). Il y a donc eu un intérêt pour l'application de la géométrie fractale pour caractériser la complexité de phénomènes géographiques sur plusieurs échelles (Myint et Lam, 2005). Elle est efficace pour décrire des biomes, des écosystèmes naturels ou encore les cellules du corps humain (Burrough, 1981; Kendel et Walker, 1993; Hern, 2008). Elle permet de décrire les phénomènes naturels qui

sont généralement fragmentés (Li, 2000). La dimension fractale a été utilisée en bio-ingénierie des écosystèmes marins pour optimiser le design de récifs artificiels. (Lan et al, 2004). La complexité d'un habitat a un effet positif sur la biodiversité et la biomasse (Charbonnel et al, 2002). Le niveau de complexité des supports abiotiques a donc été optimisé en augmentant la dimension fractale. Le coût d'installation a été minimisé en réduisant la distance parcourue pour relier les points. La biodiversité et la biomasse ont été maximisées alors que les coûts d'installation ont été minimisés. L'usage de la dimension fractale permet de construire à moindre coût des récifs artificiels plus performants (Lan et Hsui, 2006).

La dimension fractale a aussi été utilisée pour décrire les zones urbaines. Les villes sont des systèmes qui émergent des interactions locales. Les éléments à l'échelle de la rue forment des ordres spatiaux fragmentés et parcellaires sur différents ordres de grandeur (Batty, 2007; Sayed et Turner, 2012). La dimension fractale est un outil qui permet de caractériser les géométries qui résultent de ces processus; elle est en mesure de décrire par des mesures quantitatives le tissu urbain (Arriza-Villaverde et al, 2013; Frankhauser, 1998 ;Shen, 2002 ; Badariotti, 2010). Ces études donnent de l'information sur l'aspect général du tissu urbain. Ces expérimentations ont permis de caractériser l'occupation du territoire de différentes agglomérations urbaines (Frankhauser, 1990).

Dans la revue *Nature* (Encarnação et al., 2012), la dimension fractale a été mesurée en fonction d'une valeur statistique $S(D)$ qui exprime le nombre de configurations possibles pour une valeur de dimension fractale et en fonction du taux de changement de cette valeur $S'(D)$. Il s'agit de la première analyse quantitative pour une catégorisation automatique de différents ensembles urbains. Tel que présenté dans la figure 1.7, elle permet de classer quantitativement les tissus urbains en cinq classes.

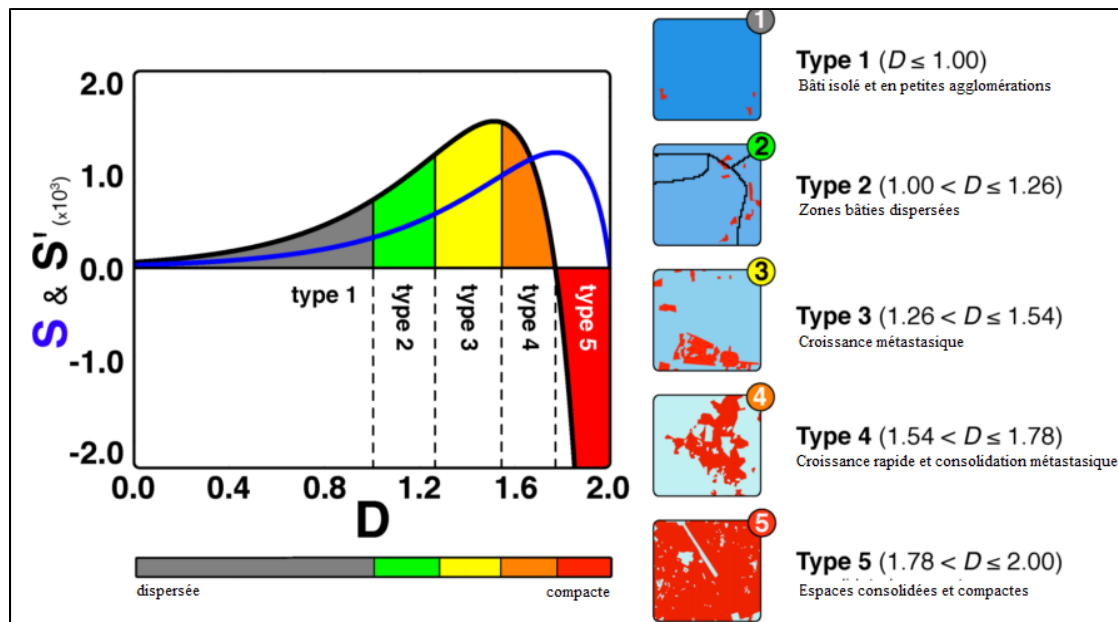


Figure 1.7 Type de tissus urbains en fonction de la valeur de la dimension fractale
Traduit de : Encarna  o et al. (2012, p. 3)

La classe de type 1 possède une dimension fractale inférieure à 1 est considérée comme fragmentaire. La classe de type 2, avec une valeur de dimension fractale entre 1 et 1,26, est une organisation spatiale dispersée. Les agglomérations métastatiques ont une dimension fractale entre 1,26 et 1,54; ils sont considérés comme de type 3. La composition urbaine de type 4 est une consolidation de la phase métastatique avec une dimension fractale entre 1,54 et 1,78. La dernière classe, le type 5, avec une dimension fractale entre 1,78 et 2,0, est une agglomération compacte. Ces mesures permettent de développer des méthodes quantitatives qui permettent de décrire et prévoir l'évolution du système urbain. Elles ont permis de détecter les subtilités qui permettent de différencier différents territoires tels que l'importance du contexte national et historique sur les dynamiques du développement urbain. En mesurant différents quartiers, il est possible de comprendre les différences structurelles. La dimension fractale permet de mesurer et de comprendre les dimensions d'hétérogénéité et historique des systèmes urbains. (Thomas et al, 2010). Les analyses comparatives décrivent et discriminent ainsi la morphologie des différents tissus urbains (Badariotti, 2010).

1.4.4.2 Applications de la lacunarité

Dans l'analyse des systèmes urbains, la lacunarité peut être utilisée pour plusieurs fins. L'une d'entre elles est la reconnaissance d'image pour classifier les usages du territoire. La capacité de la lacunarité à décrire les textures lui permet d'être utilisée pour différencier les multiples usages du territoire sur des images satellites (Myint et Lam, 2005). En mesurant des cartes du bâti, la mesure de la lacunarité permet également de départager les systèmes urbains composés de structures centralisées, multipolaires ou encore sans organisation (Wu et al, 2013). Un second usage de la lacunarité permet de décrire plusieurs informations comprises dans les structures urbaines d'un territoire. Par exemple, à partir d'image spatiale, il est possible, à l'aide des mesures de lacunarité de connaître la distribution raciale dans une ville. Les calculs de ces mesures ont été calqués sur les mesures d'analyse des paysages en écologie (Wu et Sui, 2001).

L'écologie du paysage est l'un des domaines d'application des mesures de lacunarité (Plotnick et al, 1993). Les écosystèmes naturels sont distribués sous formes parcellaires, ils sont caractérisés par une hétérogénéité spatiale et temporelle (Saunders et al, 2005). Chacune de ces parcelles relève de règles simples qui sont fonction des conditions abiotiques et biotiques locales. Agrégées, elles forment des structures émergentes où la valeur globale du système est supérieure à la somme des parties (Wu et al, 2006). Pour comprendre les dynamiques qui produisent ces structures, la lacunarité est un outil mathématique qui permet de décrire, avec des résultats constants, l'hétérogénéité des paysages. Les études sur les écosystèmes et les modèles numériques utilisant la lacunarité ont permis de discriminer des structures territoriales similaires mais avec des différences d'homogénéité (Hoechstetter et al, 2010). La comparaison des usages du territoire avec les structures spatiales permet de comprendre les dynamiques territoriales. La lacunarité est utilisée pour décrire les usages du territoire sur une base quantitative. Les mesures de lacunarité permettent d'associer la distribution de coléoptères sur un territoire à la disponibilité des ressources en comparant les différentes mesures de lacunarité (McIntyre et Wiens, 2000). La caractérisation des canopes de forêts par des mesures de lacunarité permet de mesurer l'hétérogénéité des structures et la

dimension moyenne des cimes (Malhi et Román-Cuesta, 2008). La lacunarité peut être utilisée pour comprendre, sur un axe spatial, les relations de causalités et l'évolution historique du système. Les mesures de la lacunarité ont permis d'évaluer l'effet des activités humaines sur un écosystème forestier (Elkie et Rempel, 2001). En ingénierie des écosystèmes, la lacunarité a été utilisée pour optimiser la biomasse et la biodiversité des récifs artificiels. La lacunarité a été associée à la dimension fractale pour concevoir l'habitat le plus complexe possible à partir de modèles mathématiques. Plusieurs scénarios de distributions de blocs de récifs artificiels ont été construits pour augmenter la complexité du récif. Ensuite, plusieurs scénarios avec la même dimension fractale ont été comparés par des mesures de lacunarité. (Hsui et Wang, 2013). Des configurations groupées ont ainsi été générées pour maximiser la biomasse et la biodiversité (Lan et al, 2006b). Les mesures de lacunarité, associées à la dimension fractale, permettent de maximiser le potentiel des projets d'aménagement de récifs artificiels en maximisant la complexité des composantes (Hsui et Wang, 2013).

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

2.1 Analyse fractale

Une analyse spatiale quantitative des fonctions d'usages a été effectuée à l'aide de la dimension fractale et de la lacunarité sur différents échantillons de territoire montréalais et lausannois. Deux programmes Matlab d'analyses d'images ont été utilisés. La dimension fractale a été mesurée à l'aide d'un algorithme Matlab mesurant la dimension de Minkowski-Bouligand. La lacunarité a été mesurée avec la *gliding box method*. Ces deux types de mesures ont été utilisées précédemment pour mesurer l'ensemble du tissu urbain à l'échelle des villes ou des quartiers (Arriza-Villaverde et al, 2013 ; Wu et al, 2013).

Afin de tester différents scénarios de mesure du territoire, deux analyses comparatives utilisant deux différents types de zonages urbains ont été effectuées. La première est une analyse comparative de deux quartiers montréalais alors que la seconde repose sur une analyse comparative de quatre agglomérations de la région de Lausanne en Suisse. Les deux juridictions possèdent des méthodes de zonages distinctes. L'approche québécoise repose sur les fonctions d'usages alors que la réglementation suisse se base sur des zones d'affectations. Les images qui ont été mesurées ont été construites à partir des différentes cartes réglementaires de chacune des agglomérations considérées. Elles ont été découpées en utilisant les règlements de zonages pour chacune des juridictions. En plus des mesures du territoire, une analyse de sensibilité a été effectuée pour évaluer la qualité des mesures du programme qui calcule la dimension fractale. Pour effectuer une analyse critique des résultats, des ensembles géométriques ont été construits pour mesurer l'influence de certains paramètres.

La dimension fractale a été mesurée à l'aide d'un algorithme util la dimension de Minkowski-Bouligand, plus communément appelé *box counting method*. Il permet de mesurer la dimension fractale dans plusieurs dimensions. Ce programme intègre tout d'abord

les images, dans ce cas, les cartes de zonages des villes considérés, en les transformant en matrices binaires dans Matlab. Comme les cartes ont été converties manuellement ou étaient préalablement en noir et blanc, il n'y a que très peu de perte de précision lors de la transformation des cartes réglementaires en matrices. Chacune des images, dû aux paramètres des deux programmes doivent être ensuite inversées. Le blanc doit devenir noir et le noir devenir blanc. Le programme Matlab calcule ensuite la dimension fractale de la matrice binaire; elle est calculée sur 11 ordres de grandeur. Une moyenne des valeurs individuelles des 5 ordres de grandeur médians est ensuite utilisée pour approximer la valeur finale de la dimension fractale. Les dimensions fractales dans ces analyses seront donc estimées à partir des mesures calculées se situant entre les 4^e et 8^e ordres de grandeur dans chacun des cas considérés. Le programme d'analyse d'images Matlab utilisé a été développé en 2008 par le laboratoire FAST à l'université Paris Sud.

La mesure de la lacunarité a été calculée avec la *Gliding box method*. Adapté dans Matlab, l'algorithme utilisé doit tout d'abord numériser les images sous format de matrice binaire. Une fois l'image importée, il y a un calcul, sur 9 ordres de grandeur, de la lacunarité. Ces valeurs sont le résultat final du programme Matlab. La moyenne des valeurs et l'écart type ont ensuite été calculés manuellement pour déterminer la lacunarité globale de chacune des images. Ces mesures ont été effectuées en utilisant une méthodologie présentée par Tolle et Al. dans la revue Physica D (Tolle et Al, 2008).

2.2 Cas montréalais

La première analyse de cas porte sur la mesure du tissu urbain montréalais. Deux arrondissements représentant deux aménagements du territoire distincts ont été analysés : Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension et Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles. Tel que présenté à la figure 2.1, les mesures ont été effectuées sur des quartiers et non sur l'agglomération au complet. La partie ouest de chaque arrondissement a été mesurée. L'échantillonnage provient des cartes réglementaires sous format PDF des arrondissements

respectifs, elles ont une échelle de 1 :500 et ont une résolution de 1935X1935 pixels à 100 DPI.

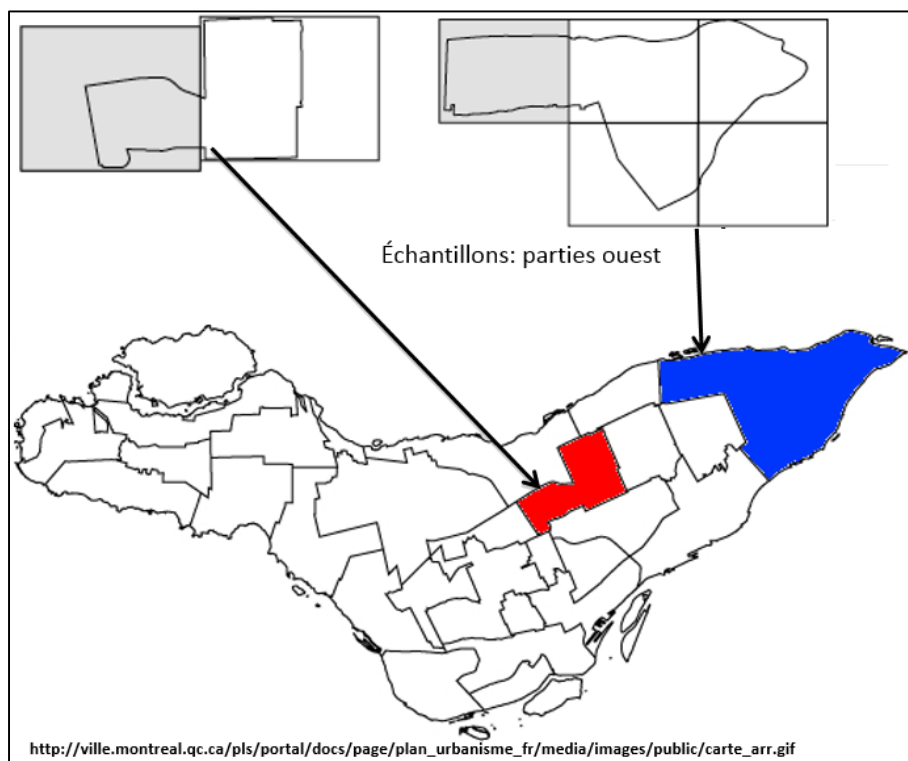


Figure 2.1 Cas étudiés dans la ville de Montréal
Tirée du site web de la ville de Montréal (2014)

Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension est un des qui possède une densité de 8 624 habitants par kilomètre carré (Montréal en Statistiques, 2013a). La taille moyenne des ménages est de 2,2 personnes et les activités économiques sont axées sur les secteurs des services et de la créativité (Montréal en Statistiques, 2013b). L'arrondissement dispose aussi de plusieurs accès à deux lignes de métro qui parcourent son territoire et d'un grand parc urbain. Le second arrondissement est de son côté représentatif des banlieues. Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles possède une densité plus faible de 2 517 habitants par kilomètre carré; les ménages sont aussi plus grands avec une taille moyenne de 2,5 personnes (Montréal en Statistiques, 2013c; Montréal en Statistiques, 2013d). Les activités économiques sont orientées vers les activités industrielles : les activités manufacturières sont la première activité économique du secteur (Montréal en Statistiques, 2013b). Tout comme le

premier quartier, l'échantillon considéré dans l'analyse se situe dans l'ouest de l'arrondissement.

Les usages prescrits des normes réglementaires de zonage de la ville de Montréal ont été utilisés. La réglementation montréalaise se base sur l'usage fonctionnel du bâti. Il est divisé en zones fonctionnelles commerciales, résidentielles, institutionnelles et industrielles. Le zonage commercial est attribué aux services et aux activités de détail ou des grossistes qui ont un niveau de nuisances faibles à élevées. Le zonage réglementaire résidentiel comprend tous les types d'habitations, de la maison unifamiliale à la tour à logement. Le zonage industriel peut inclure toutes les activités des secteurs industriels ou extractifs, sur toutes les échelles de nuisances. Finalement, le zonage institutionnel est assez général, il inclut les usages religieux, les parcs et les infrastructures de services publics. (Ville de Montréal, 2015) Dans tous les cas, la réglementation de zonage peut être mixte et ainsi combiner l'habitation, le commercial, l'industriel et l'institutionnel sur un même site. Les cartes réglementaires, présentées à la figure 2.2 ont été utilisées pour étudier les règlements de zonages des arrondissements respectifs.



Figure 2.2 Carte réglementaire de l'échantillon initial et découpage du règlement d'usage commercial et résidentiel de l'échantillon dans l'arrondissement Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension
Tirée du règlement d'urbanisme de l'arrondissement, Annexe A

Un échantillon de chaque quartier pour chacun des types de zonages réglementaires a été extrait des cartes réglementaires qui étaient sous format PDF. Elles ont été disséquées en différentes images, une pour chacun des types de zonage. Ces cartes ont ensuite été mesurées par les deux programmes d'analyses d'images sur Matlab. Les résultats obtenus pour chacune des allocations urbaines ont ensuite été utilisés pour comparer les deux arrondissements et faire ressortir leurs caractéristiques d'aménagement du territoire distinctes.

2.3 Cas suisse

La seconde analyse de cas porte sur 4 municipalités suisses dans la région de Lausanne. Lausanne Centre, Ecublens, Jouxten-Mézéry et Crissier. Il est possible de distinguer leur position géographique à la figure 2.3. Une zone des activités de chacune de chacune des agglomérations a été choisie de manière aléatoire comme échantillon pour mesurer chacune des localités. Les cartes proviennent de la base de données Swisstopo de la Confédération Suisse et ont une échelle de 1 : 5000 et une résolution de 673X673 pixels sur une image à 100 DPI. Elles ont été extraites sous format PDF à partir du guichet cartographique cantonal géoplanet le 10 mars 2014. Les coordonnées de ces zones sont présentées dans le tableau 2.1.

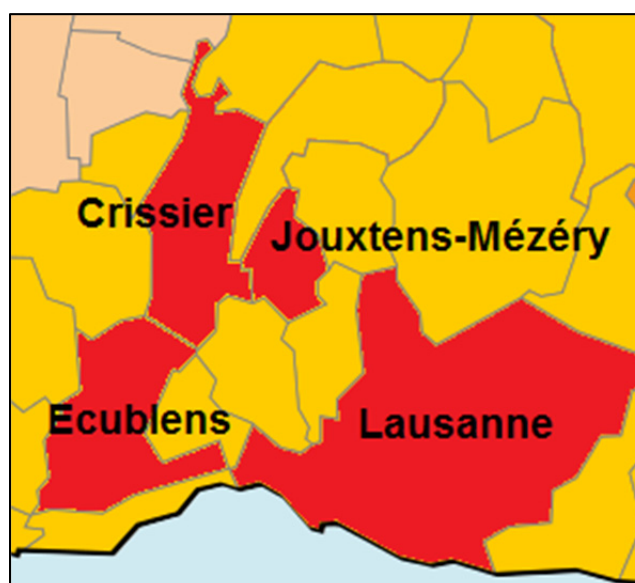


Figure 2.3 Cas étudiés dans l'agglomération Lausannoise
Tirée de Wikimedia Commons (Jdam, 2014)

Tableau 2.1 Coordonnées géographiques des échantillons

Agglomération	Coordonnées	
	X	Y
Lausanne	536968	153361
Ecublens	532400	154017
Jouxten-Mézéry	534729	155674
Crissier	533290	156543

La région lausannoise est l'un des pôles du bassin lémanique avec une population de 133 521 habitants (Statistiques Vaud, 2014). La ville de Lausanne est le centre de l'agglomération, a une densité de 3 231 habitants par kilomètre carré (Statistiques Vaud, 2014; OFS, 2014). Ecublens est légèrement en périphérie, elle est desservie par la ligne de métro M1 et une autoroute. La densité de population est de 2 130 habitants par kilomètre carré (Statistiques Vaud, 2014; OFS, 2014). L'une des marques de cette partie de l'agglomération est la présence du campus de l'EPFL et de l'UNIL sur sa partie sud. Jouxten-Mézery est une agglomération de la périphérie desservie par une ligne de train privée, le LEB. Il s'agit d'une agglomération résidentielle périurbaine ayant une densité de 728 habitants par kilomètre carré (Statistiques Vaud, 2014; OFS, 2014). Crissier est une agglomération avec un accès au transport en commun de faible qualité et un bon accès au réseau autoroutier. Il s'agit d'un pôle commercial important dans la région. La densité d'habitation est de 1347 habitants par kilomètre carré (Statistiques Vaud, 2014; OFS, 2014). Les échantillons proviennent donc d'agglomérations aux caractéristiques socio-économiques distinctes ; les résultats des analyses spatiales devraient présenter des quantifications d'usages différents qui correspondent aux réalités locales.

À partir des cartes d'affectations de l'outil cartographique du canton de Vaud Géoplanet (2014), les zones d'affectation ont été circonscrites les unes des autres. Un exemple de cette ségrégation des zones d'affectation est présenté à la figure 2.4. Chaque zone d'affectation a été discriminée sur des images différentes. Chacune de ces images a été ensuite mesurée avec les deux logiciels Matlab. La dimension fractale et la lacunarité de chacune des zones

d'affectation présentes sur les territoires considérés ont été calculées. Une analyse de la composition que chacun des territoires a ensuite été effectuée.

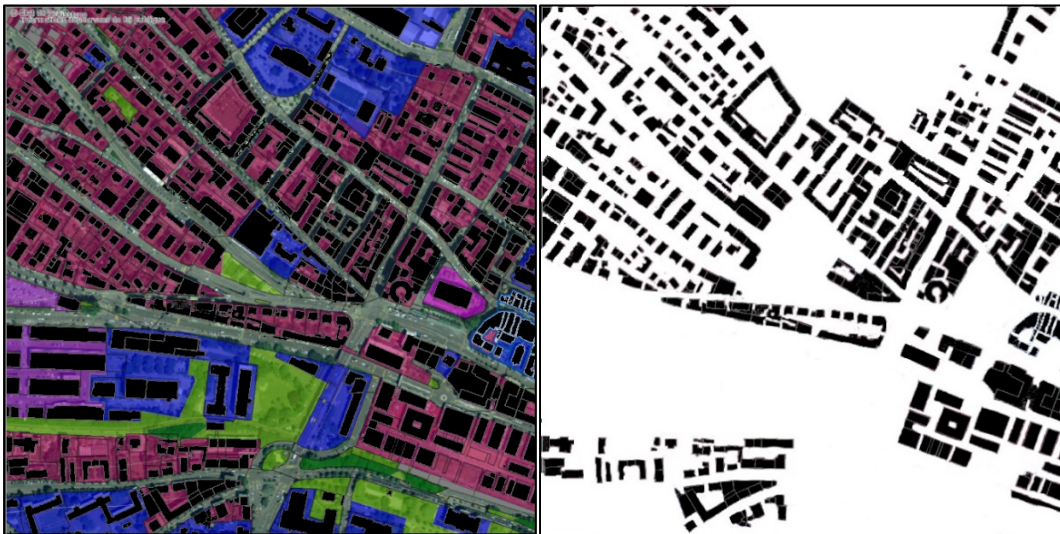


Figure 2.4 Carte réglementaire de l'échantillon initial et du découpage de la zone d'affectation mixte de forte densité de la ville de Lausanne
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet.

La seconde étude de cas porte ainsi sur un cadre réglementaire différent du cas montréalais, car l'aménagement suisse divise le territoire en zones différentes. Ces divisions sont appelées les zones d'affectations. Elles sont attribuées en fonction de certaines conditions déterminées et par le type de constructions qui sont allouées. Les zones d'affectation mixtes, historiques et village permettent les mêmes types d'usages : l'habitation, l'artisanat, les installations publiques, l'enseignement, la culture, la santé le sport au tourisme et au délasserment. Leurs différences sont marquées par le type de construction allouée et les différentes proportions d'allocations fonctionnelles. Le centre historique est le périmètre intra-muros des anciennes villes médiévales de ses faubourgs. Il s'agit d'une zone de préservation historique, un minimum du tiers de la surface occupée doit être dédié à l'habitation (Lausanne, 2006). La zone village est destinée à préserver le caractère de l'ancien village, le gabarit des immeubles existants doit être préservé (Crissier, 2008). Les zones mixtes de forte, moyenne ou faible densité divergent sur le plan des façades et des distances entre les bâtiments. La zone mixte de forte densité permet des façades jusqu'à 13 mètres et limite la distance entre les bâtiments entre 6 et 8 mètres. La zone mixte de moyenne densité réduit la hauteur des façades à une

hauteur maximum de 13 mètres et exige une distance minimum entre les bâtiments de 6 mètres. La zone mixte faible densité exige qu'au moins 80% de la surface brute du plancher soit dédié à l'habitation et que les façades soient limitées à deux étages plus un étage partiel (Lausanne, 2006). La zone de très faible densité est associée aux habitations sous forme de villas et une densité inférieure à 64 habitants et emplois par hectare (Vaud, 2011).

Les zones d'affectations plus spécifiques viennent compléter les zones mixtes. La zone industrielle est destinée aux établissements industriels qui peuvent présenter des inconvénients sensibles pour la population. Toutefois, certaines zones ont des restrictions pour qu'elles puissent évoluer avec les zones d'affectation voisines (Crissier, 2008). La zone d'affectation artisanale est réservée aux constructions qui habitent des activités professionnelles artisanales ou commerciales (Trelex, 2006). La zone tertiaire inclut les activités tertiaires, administratives et de formation. La zone d'affectation commerciale comprend les activités et les surfaces commerciales. La zone d'utilité publique est réservée aux constructions publiques, parapubliques et privées reconnues. La zone d'équipement sportif et de loisirs de plein air est réservée aux espaces à l'air libre et des bâtiments qui leur sont associés. Finalement, la zone forestière est dédiée aux espaces qui sont inconstructibles et sont régies par la législation cantonale et fédérale (Lausanne, 2006). Il y a d'autres zones d'affectations qui existent dans les agglomérations suisses et vaudoises, mais elles n'ont pas été mesurées.

2.3.1 Systèmes de transports et morphologie urbaine

Pour être en mesure de comprendre si la géométrie fractale pouvait être associée à d'autres mesures de systèmes complexes et ainsi décrire les dynamiques de système ; les mesures de dimension fractale et de lacunarité ont été comparées à des mesures de connectivité des systèmes de transport en commun et de transport routier dans l'agglomération lausannoise. Des mesures quantitatives de centralité, tirées d'un travail collaboratif (Chenais et al, 2014), sont utilisées pour mesurer la centralité des lieux d'une ville, en fonction des réseaux de transport automobiles et collectifs. Ces réseaux sont présentés dans les figures 2.5 et 2.6. Ils

ont été ensuite associés à des mesures de volume de passager et d'évaluation de la qualité des services pour évaluer la connectivité des lieux aux réseaux de communications locaux. Ces mesures ont été comparées aux différentes morphologies pour comprendre comment la dimension fractale peut être utilisée avec d'autres outils quantitatifs utilisés pour mesurer les systèmes complexes. Les cartes des réseaux de transport ont été importées d'OpenStreetMap dans ArcGIS pour être transformée en matrice l'aide d'un algorithme développé par Emmanuele Strano du laboratoire LASIG de l'EPFL. À l'aide des bibliothèques de calculs développés par David Gleich, (2009), la betweenness a été calculée pour chaque nœud du réseau de transports en commun lausannois et du réseau routier local.

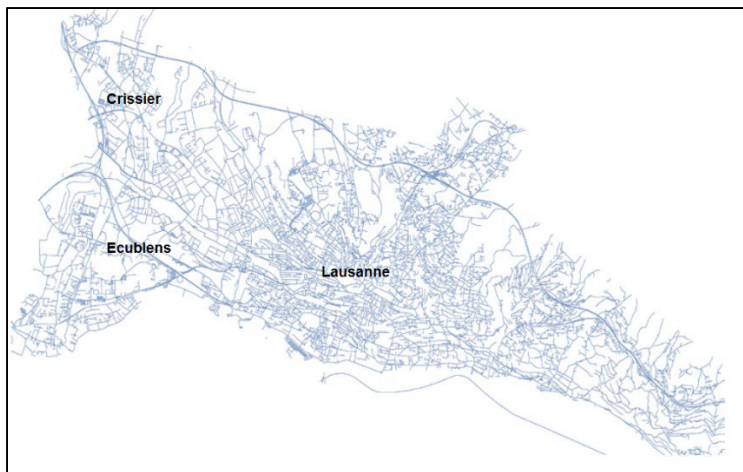


Figure 2.5: Réseau de transport routier dans l'agglomération Lausannoise
Tirée de Chenais et al (2014, p.15)

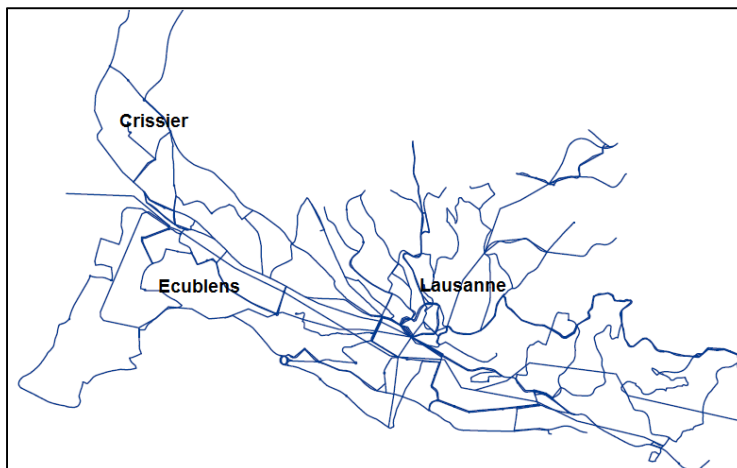


Figure 2.6 : Réseau de transport public dans l'agglomération Lausannoise

Tirée de Chenais et al (2014, p. 17)

Les systèmes de transport sont une multitude de sous-systèmes complexes qui lient les échelles sur un territoire (Derrible, 2012). Pour les mesurer et les analyser, la théorie des graphes est généralement utilisée. Il s'agit de représenter les réseaux par des nœuds et des liens et ainsi représenter la complexité (Bocaletti et al, 2006). Pour comprendre la manière, dont les flux d'information, de matière ou d'énergie dans les réseaux, il faut mesurer la centralité (Borgatti et Everett, 2006). L'une de ces mesures de centralité, la *betweenness*, mesure le nombre de fois qu'un nœud doit être utilisé pour relier toutes les possibilités théoriques d'origines et de destinations (Borgatti, 2005) Elle est bien adaptée aux systèmes de transport, car elle permet d'évaluer le nombre de routes possible, et donc de possibilité pour relier dans un réseau les nœuds des structures complexes. Plus la valeur de centralité est élevée, plus les autres nœuds y ont un accès. Cette valeur est donc un indicateur de l'importance relative de l'endroit par rapport au réseau mesuré. Ces mesures ne peuvent pas prendre en compte les vitesses, la capacité ou encore l'horaire de passage, car toutes ont des poids égaux aux autres (Puzis et al, 2013).

Il faut associer les mesures de centralité à une appréciation générale des autres paramètres qui régissent les systèmes de transport pour avoir une idée réelle du rôle des nœuds dans les réseaux. Dans le cas de l'étude du système lausannois, les mesures ont été corroborées avec les données SwissTopo ARE, qui évaluent le volume ou encore la qualité de la desserte des infrastructures de transport. Ces informations viennent peindre un portrait plus nuancé et détaillé des réseaux, qui seront appelés connectivité. Ces valeurs de connectivité et de centralité ont ensuite été comparées aux différentes mesures effectuées avec la géométrie fractale pour identifier certaines dynamiques qui influencent la morphologie urbaine des communes étudiées.

2.4 Étude de sensibilité de la dimension fractale

Pour évaluer la manière dont le programme Matlab utilisant le *box counting method* réagit face aux possibles causes d'erreur, trois paramètres pouvant fausser les résultats ont été

étudiés. La première mesure l'impact de l'angle d'une forme géométrique sur la mesure, la seconde mesure l'impact de la forme sur la mesure et la troisième mesure l'effet des limites des dimensions des boîtes utilisées dans le calcul de la valeur moyenne de la dimension fractale. Toutes images pour mesurer les ensembles géométriques considérés ont les mêmes propriétés : ils ont une dimension de 2000 X 2000 pixels avec une résolution de 72 *DPI*. Ils ont été créés avec le logiciel GIMP.

2.4.1 Effet de l'angle des bâtiments sur la mesure

Afin de mesurer l'effet de l'orientation du bâti humain sur la mesure de la dimension fractale, deux ensembles géométriques différents ont été mesurés. Tel que présenté à la figure 2.7, les deux ensembles géométriques sont formés de carrés ayant une diagonale de 100 pixels, ils représentent le tissu urbain. Les carrés sont disposés sur une grille ayant un espace de 100 pixels. Une seule caractéristique de l'ensemble géométrique change : l'angle des carrés individuels. Comme la surface occupée reste la même et que la distribution reste pareil, un seul paramètre pourra influencer les résultats. Il sera ainsi possible de mesurer l'effet de l'angle des carrés sur la mesure finale.

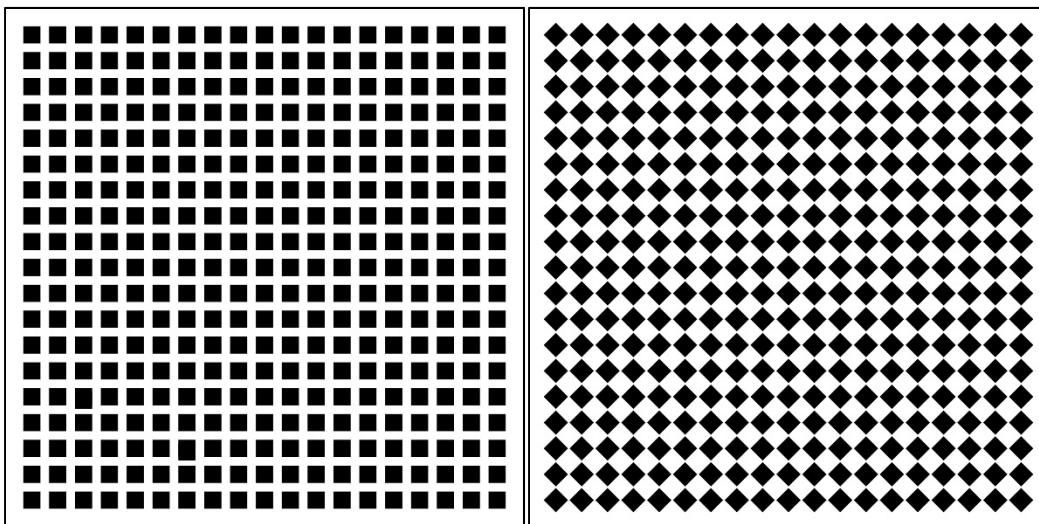


Figure 2.7 Images pour l'évaluation de l'impact de l'angle des composantes sur la mesure de la dimension fractale

2.4.2 Effet de la forme des bâtiments sur la mesure

Pour mesurer l'impact de la forme euclidienne du bâti sur la mesure, deux ensembles géométriques occupant la même surface en nombre de pixels ont été comparés. Les formes géométriques ont été distribuées sur une grille de 200 pixels couvrant la surface de 2000 pixels de côtés, des cercles et des carrés ont été mesurés. Les carrés ont des diagonales de 200 pour une aire de 17424 pixels alors que les cercles ont des diamètres de 154 pixels et une aire totale de 17420 pixels. L'aire est donc une faible source d'erreur, car il y a au total, 324 pixels de différence sur une aire totale de 4 000 000 de pixels. L'erreur est donc considérée comme négligeable, car cela représente une différence de 0.02%. La mesure de la dimension fractale a donc été calculée pour chacune des images et comparée pour mesurer l'impact de la forme sur la mesure de la dimension fractale. La forme géométrie mesurée pour évaluer l'effet de la forme des bâtiments sur la mesure est présentée à la figure 2.8.

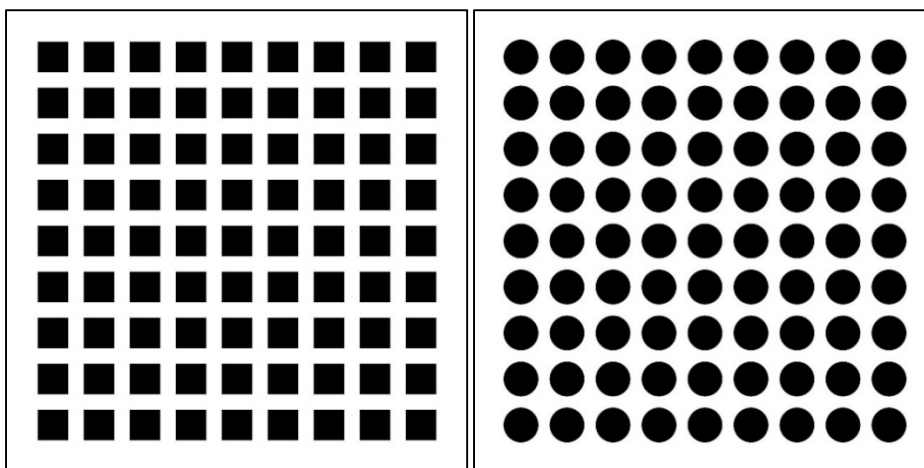


Figure 2.8 Images pour l'évaluation de l'impact de la forme composantes sur la mesure de la dimension fractale

2.4.3 Impact des limites des dimensions des boîtes utilisées sur le calcul de la dimension fractale.

Une analyse comparative de différentes manières de mesurer la densité a été effectuée pour évaluer l'impact du choix des dimensions des boîtes utilisées lors du calcul de la valeur dimension fractale. Le choix des dimensions de boîtes maximums et minimums utilisées influence directement la précision et la répétabilité des expérimentations. Pour être en mesure de comparer différents territoires et avoir des mesures précises, le choix des ordres de grandeur considéré doit être évalué de manière empirique. Une analyse comparative a été effectuée pour connaître les limites à utiliser. La densité a donc été variée et plusieurs mesures ont été prises. Deux techniques ont été utilisées pour créer des formes géométriques avec une densité déterminée. La première a été de construire un ensemble géométrique avec des carrés de 100 pixels de diagonale. L'espacement, en nombre de pixels, entre chacun des carrés a été modifié pour augmenter ou diminuer la densité, plus la distance diminue, plus il y a de carrés sur l'espace. Cette méthode de couverture de l'espace est la méthode additive, c'est ce qui correspond le plus à une ville artificielle dans ces essais. La seconde manière de couvrir l'espace a été faite à l'aide d'une méthode soustractive. Au lieu d'ajouter de l'espace couvert, la surface a été couverte au complet et des carrés ayant une diagonale de 100 ont été soustraits. Tout comme la méthode extractive, l'espace entre les soustractions a été modifié pour augmenter ou réduire l'espace occupé. Plus l'espace entre les soustractions était petit, moins la surface occupée était grande. Il a été ainsi possible de mesurer des ensembles géométriques fractals qui couvraient entre 3 et 99% de l'espace de 4 000 000 de pixels. De ces surfaces, les données ont pu être produites pour évaluer la manière dont le programme calcule l'occupation de l'espace. Les figures géométriques sont composées comme les exemples présentés à la figure 2.9.

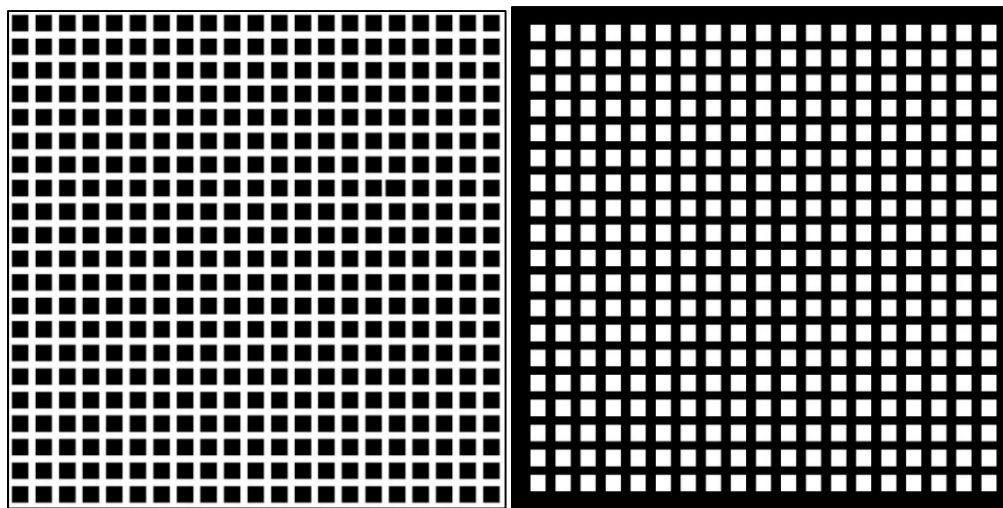


Figure 2.9 Surface additive et surface soustractive pour l'évaluation de l'impact du choix des ordres de grandeur sur la mesure de la dimension fractale

Quatre points critiques ont été identifiés pour faire une analyse comparative des résultats, il s'agit des points où les deux méthodes convergent sur le pourcentage du territoire occupé. Les points à 23 %, 77 %, 83 % et 88 % seront utilisés pour faire des comparaisons des mesures entre les deux méthodes. Il s'agira d'évaluer la robustesse du choix des ordres de grandeur pour faire la moyenne de la mesure. Les échantillons pour les tests couvrent la même surface, mais avec deux configurations spatiales opposées. Les mesures de la dimension fractale devraient être sensiblement les mêmes étant donné qu'ils couvrent approximativement la même surface.

La quantité de boîtes optimums à utiliser sera évaluée à l'aide du coefficient de variation. Ce coefficient permet d'évaluer l'erreur relative de dispersion dans des séries de données. Dans le cas de l'évaluation de la moyenne d'une multitude de valeurs estimées, la mesure qui possède la plus petite erreur relative est associée à la plus précise. En incluant tous les résultats, il sera possible de comparer le calcul de la dimension fractale du programme FAST sur Matlab à une quantité de boîtes optimale pour mesurer la densité d'occupation de l'espace.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

3.1 Étude de cas montréalaise

L'étude de cas montréalaise présente une analyse comparative entre les arrondissements Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension et Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles. La densité et l'homogénéité des différentes catégories d'usages ont été mesurées puis comparées. Ces informations fournissent des données quantitatives sur la disposition spatiale des composantes fonctionnelles des échantillons de structures urbaines étudiées. Les données recueillies correspondent à la description initiale des quartiers, que ce soit par la densité de population ou encore par la distribution des fonctions économiques des quartiers.

Afin de faciliter l'analyse comparative, les résultats sont présentés sous trois formes. Le diagramme à barres, présents à la figure 3.1 présentent la dimension fractale de chacune des fonctions d'usages. Elles permettent de comparer la densité d'occupation des fonctions d'usages sur le territoire des deux arrondissements. Le tableau 3.1 présente la lacunarité et l'écart type de chacune des fonctions d'usage permettent de présenter les indicateurs décrivant l'homogénéité des structures fonctionnelles dans les deux arrondissements. Les histogrammes dans les figures 3.2, 3.3 et 3.4 donnent un sommaire de la dimension fractale et de la lacunarité des fonctions d'usages. Ils permettent de comparer les configurations spatiales des mêmes catégories d'usages sur deux territoires.

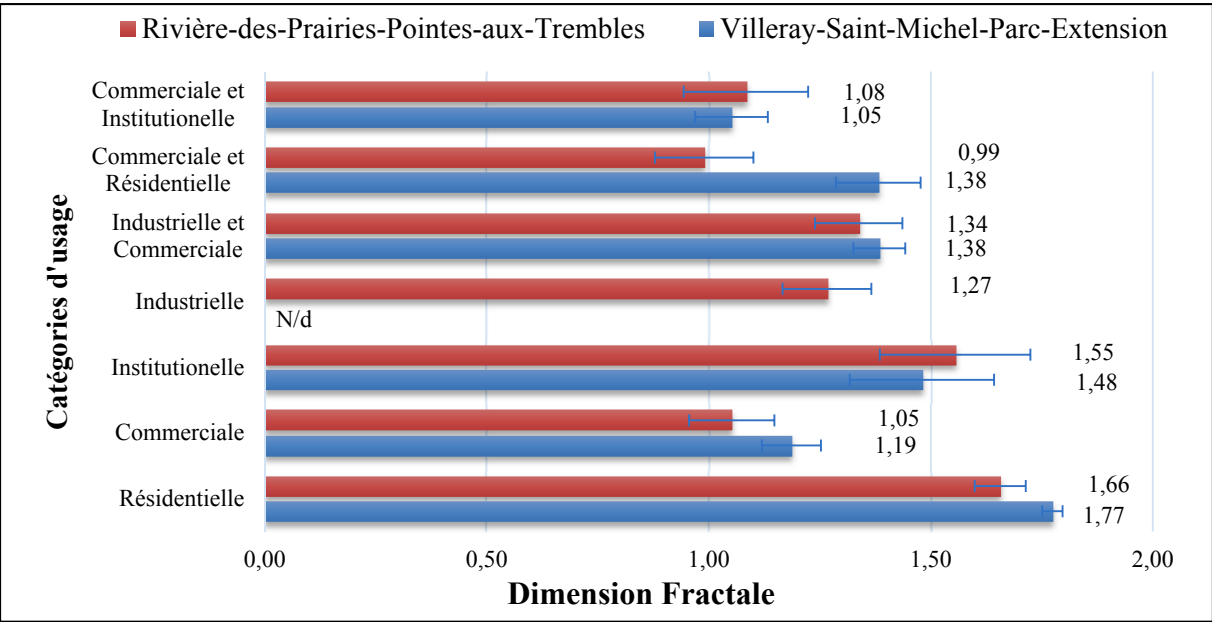


Figure 3.1 Dimension fractale des catégories d'usages dans les arrondissements Villerey-Saint-Michel-Parc-Extension et Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles

Tableau 3.1 Lacunarité des catégories d'usages dans les arrondissements Villerey-Saint-Michel-Parc-Extension et Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles

Fonctions d'usages	Villerey-Parc-Extension		Rivière-des-Prairies	
	Moyenne	Écart Type	Moyenne	Écart Type
Commerciale et Institutionnelle	99,35	140,96	94,57	108,91
Commerciale et Résidentielle	14,00	13,5	124,25	166,83
Industrielle et Commerciale	15,12	11,49	29,03	22,99
Industrielle	n/a	n/a	37,42	30,64
Institutionnelle	6,31	2,87	4,48	2,15
Commerciale	59,95	59,32	101,95	100,21
Résidentielle	3,66	2,92	4,51	3,88

Le quartier Villerey-Parc-extension donne des dimensions fractales qui sont plus élevées dans pratiquement tous les cas. Les écarts les plus importants se situent au niveau des activités commerciales et industrielles. Les valeurs de lacunarité indiquent une plus grande

homogénéité des fonctions d'usages dans l'échantillon du quartier Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension par rapport à Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles.

3.1.1 Fonctions d'usage résidentielle

Les valeurs de la dimension fractale de la catégorie résidentiel de 1,77 pour Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension par rapport à 1,66 pour Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles indiquent que la densité du bâti est plus grande dans l'arrondissement central. Toutefois, la densité du bâti humain ne reflète pas la différence de densité de population qui est beaucoup plus grande. Une seconde cause d'erreur repose sur le nombre de dimensions considérées. Comme l'analyse spatiale mesure la ville en deux dimensions et non en trois dimensions, cela pourrait faire sous-estimer la dimension fractale des habitations qui ont plusieurs étages dans le quartier central. Une analyse en trois dimensions est possible, il faudrait toutefois modéliser la ville et mesurer le volume au lieu de l'espace au sol occupé. Les résultats auraient été probablement encore plus marqués par de grandes différences, non seulement pour la fonction résidentielle, mais pour toutes les fonctions d'usages.

3.1.2 Fonctions d'usage institutionnelle

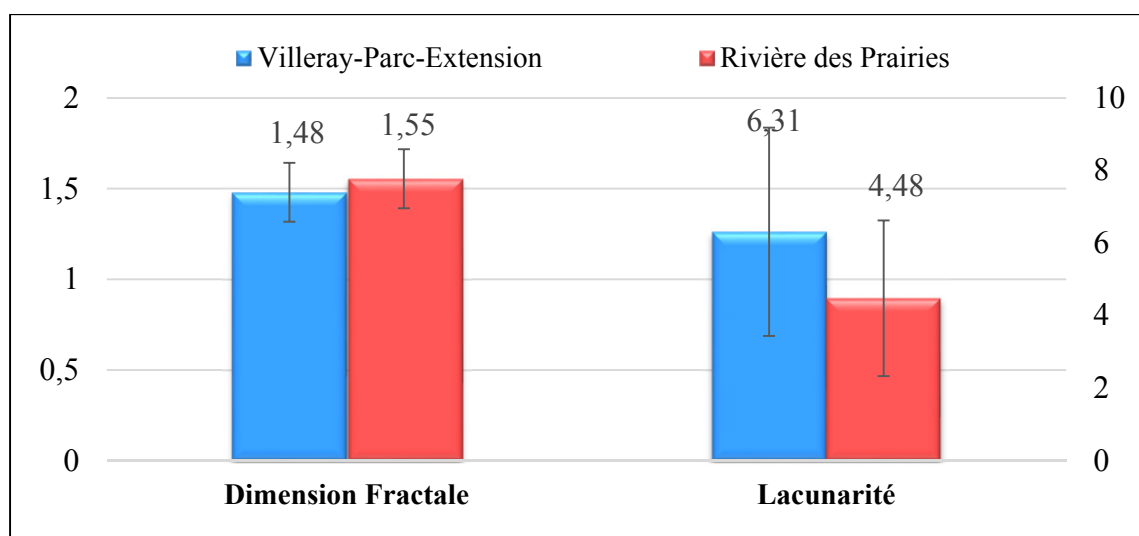


Figure 3.2 Dimension fractale et lacunarité de la catégorie d'usage institutionnelle dans les arrondissements Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension et Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles

L'usage du territoire de la catégorie institutionnelle est légèrement supérieur dans le quartier périphérique malgré sa plus faible densité de population. La mesure des sites institutionnels de Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles indique une valeur de dimension fractale de 1,55 alors qu'elle est de 1,48 pour l'arrondissement Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension. Pourtant, le parc Jarry est considéré dans l'échantillon de l'arrondissement central, cette présence crée une surreprésentation de la fonction par rapport à la moyenne du quartier. L'échantillon de l'arrondissement Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles inclut les espaces verts et les parcs de la bande riveraine qui lui donnent également une valeur de dimension fractale importante. Toutefois, contrairement au parc Jarry, ces espaces sont présents sur l'ensemble du territoire de l'arrondissement Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles, il s'agit donc d'une valeur représentative du territoire. La valeur de la lacunarité dans l'arrondissement Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles est de 4,48. Elle est plus faible dans la banlieue que dans le quartier central où la valeur de la lacunarité est de 6,31. Cet écart indique une plus grande homogénéité des installations publiques dans l'arrondissement de la banlieue. Cette homogénéité veut donc dire que l'accès aux fonctions d'usages institutionnels est généralement plus rapide dans la zone étudiée en périphérie que dans la zone centrale, car l'écart entre les zones institutionnelles est plus constant.

3.1.3 Catégories d'usage avec une composante industrielle

Dans l'échantillon considéré de l'arrondissement Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension, la comparaison de la catégorie d'usage industrielle est assez rapide, les valeurs de la dimension fractale et de la lacunarité sont nulles, car il n'y a aucune allocation uniquement industrielle. Dans l'arrondissement Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles, la valeur de la dimension fractale de 1,27 indique que la catégorie d'usage industrielle est la 4^e zone d'affectation la plus importante.

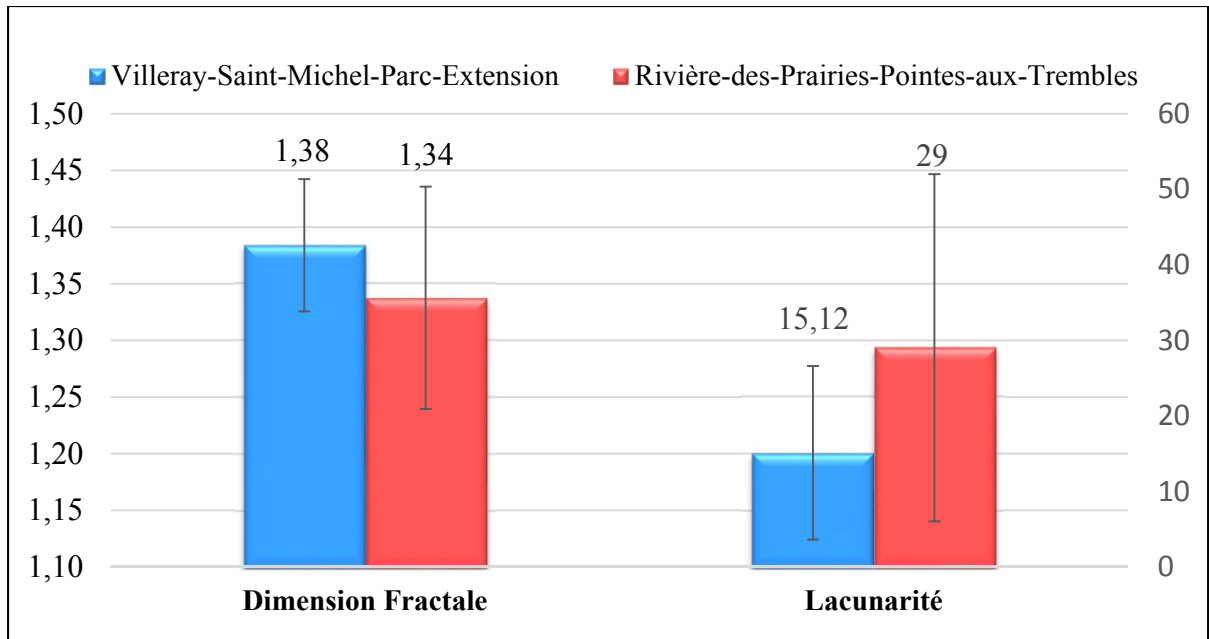


Figure 3.3 : Dimension fractale et lacunarité de la catégorie d'usage industrielle et commerciale dans les arrondissements Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension et Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles

Les valeurs de la dimension fractale, pour les catégories d'usages industrielle et commerciale, indiquent qu'ils occupent sensiblement le même territoire. La valeur de la dimension fractale de l'arrondissement Villeray-Saint-Michel-Rivière-des-Prairies est de 1,38 et celle de Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles est de 1,34. Tous les deux représentent des structures urbaines métastatiques (Encarnação et al, 2012). La lacunarité permet de différencier les territoires en quantifiant la distribution de chacune des fonctions urbaines. Dans ce cas, la valeur moyenne de la lacunarité est de 29 dans le cas de Rivière-des-Prairies-Pointes-au-Tremble, alors que pour Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension, la valeur moyenne est de 15,12. L'écart type est aussi beaucoup plus grand pour l'arrondissement en banlieue. Cela indique que la catégorie d'usage industrielle et commerciale est beaucoup plus agglomérée en banlieue que dans le quartier central. Dans l'arrondissement Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension, la zone industrielle et commerciale est divisée en deux zones distinctes dans le quartier, une à chaque extrémité de l'axe nord-sud ; pour l'arrondissement Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles, la zone est une agglomération compacte au sud. La lacunarité permet ainsi de décrire, par une approche quantitative, la manière dont l'espace

est occupé. Elle permet de départager sur une base quantitative deux ensembles urbains ayant une dimension fractale quasi identique, mais avec des distributions spatiales distinctes.

3.1.1 Catégories d'usage avec une composante commerciale

La catégorie d'usage commerciale dans les deux arrondissements est assez faible. Les valeurs de la dimension fractale de 1,05 pour Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension et 1,00 dans Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles indiquent que la catégorie d'usage uniquement commerciale a une faible présence dans les deux arrondissements. Toutefois, la lacunarité vient distinguer deux aménagements du territoire. La valeur de la lacunarité de 101,95 et un écart-type de 100,21 dans l'arrondissement de Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles indiquent que les fonctions d'usage commerciales sont distribuées différemment sur le territoire. Pour Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension, la valeur de la lacunarité de 59,95 et son écart type 59,32 sont aussi élevés, mais elles sont réduites de moitié. Ces valeurs indiquent que la catégorie d'usage commerciale est distribuée en agglomérations sur le territoire de l'échantillon de Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles.

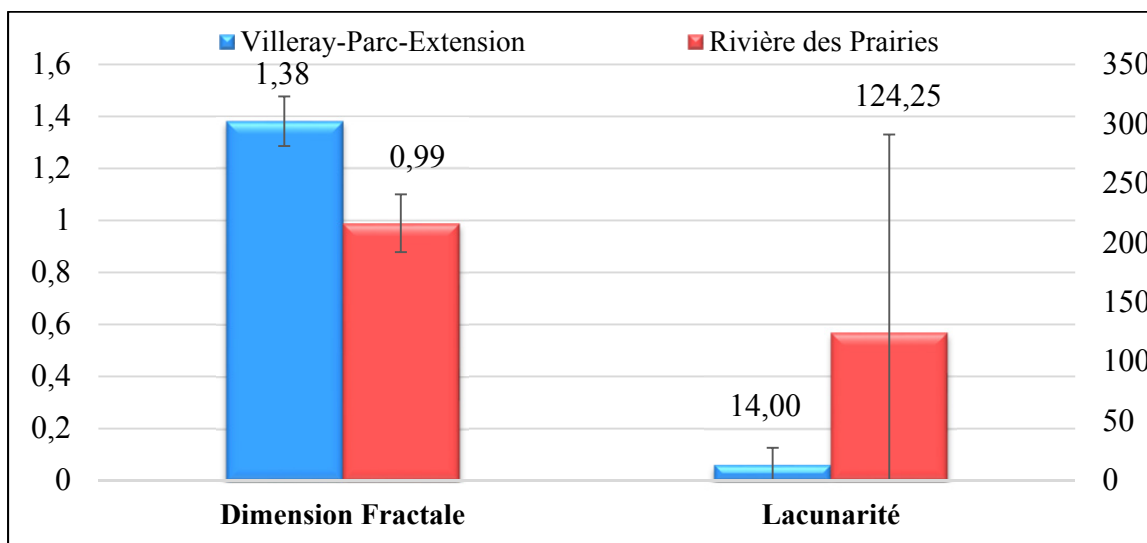


Figure 3.4 Dimension fractale et lacunarité de la catégorie d'usage commerciale et résidentielle dans les arrondissements Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension et Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles

L'importance des fonctions d'usages mixtes dans les quartiers centraux est soulignée par les mesures de la dimension fractale de la catégorie d'usage commercial et résidentiel. La valeur de la dimension fractale de 0,99 obtenue dans la mesure de l'arrondissement Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles indique une faible présence de la catégorie d'usage mixte commerciale et résidentielle. Dans Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension, il s'agit de la troisième valeur de dimension fractale la plus importante à 1,38. En termes d'occupation du territoire, cet usage fonctionnel est beaucoup plus important relativement aux autres fonctions d'usages sur le territoire central. La lacunarité de la catégorie d'usage commerciale et réglementaire dans l'arrondissement central indique, une concentration dans l'espace de cette fonction : l'écart-type est aussi grand que la valeur moyenne de la lacunarité. Cela correspond aux agglomérations de cette catégorie d'usage le long des rues principales du quartier. Pour le quartier pavillonnaire, la lacunarité décrit une agglomération importante de la catégorie d'usage commerciale et résidentielle. Elle est donc moins accessible à l'ensemble des habitants.

3.2 Étude de cas suisse

L'analyse fractale sur le territoire suisse permet d'évaluer comment la méthodologie s'applique sur une méthode descriptive du territoire différente. Le territoire suisse est détaillé de manière plus précise que le zonage urbain montréalais, car les zones d'affectations caractérisent les types d'activités commerciales et industrielles sur un territoire. Les mesures des différentes fonctions d'usages donnent généralement des valeurs de dimension fractale plus faibles et les valeurs de la lacunarité sont généralement plus élevées pour les fonctions d'usage industrielles et commerciales. Certaines fonctions d'usages décrites par les zones d'affectations suisses sont plus précises et localisées que les catégories d'usages montréalaises. Les zones d'affectations industrielles, institutionnelles et commerciales sont divisées en plusieurs catégories. En contrepartie, il y a une perte de précision pour les usages mixtes et résidentiels. Ils sont amalgamés sous une zone d'affectation mixte d'une certaine densité. Les mesures suisses seront également combinées à des mesures sur les réseaux de

transport pour identifier les liens entre les modes de mobilités et les formes urbaines de l'agglomération lausannoise.

3.2.1 Analyse comparative des agglomérations Lausannoises

Pour comparer l'utilisation des zones d'affectation de quatre communes de la région de Lausanne, les résultats sont présentés en trois sections, sous deux formes. Les sections permettent de regrouper et comparer les zones d'affectations semblables présentes dans les différentes communes. La première section comprend les zones d'affectation mixtes, historique et village. La seconde section inclut les zones d'affectations industrielles, artisanales, tertiaires et commerciales. La troisième section présente les services publics et parapublics, les zones de verdure et forêts et les loisirs. Chacune de ces sections présente les valeurs de dimension fractale sous la forme d'un histogramme dans les figures 3.5, 3.6 et 3.7. Les histogrammes des mesures de dimension fractale permettent de quantifier et comparer l'utilisation du territoire de chacune des zones d'affectation. Les mesures de lacunarité sont présentées sous forme de tableaux ; ils permettent d'évaluer la distribution des zones d'affectation sur un territoire. Les mesures de lacunarité sont présentées dans les tableaux 3.2, 3.3 et 3.4.

3.2.1.1 Zones d'affectations résidentielles mixtes, historiques et villages

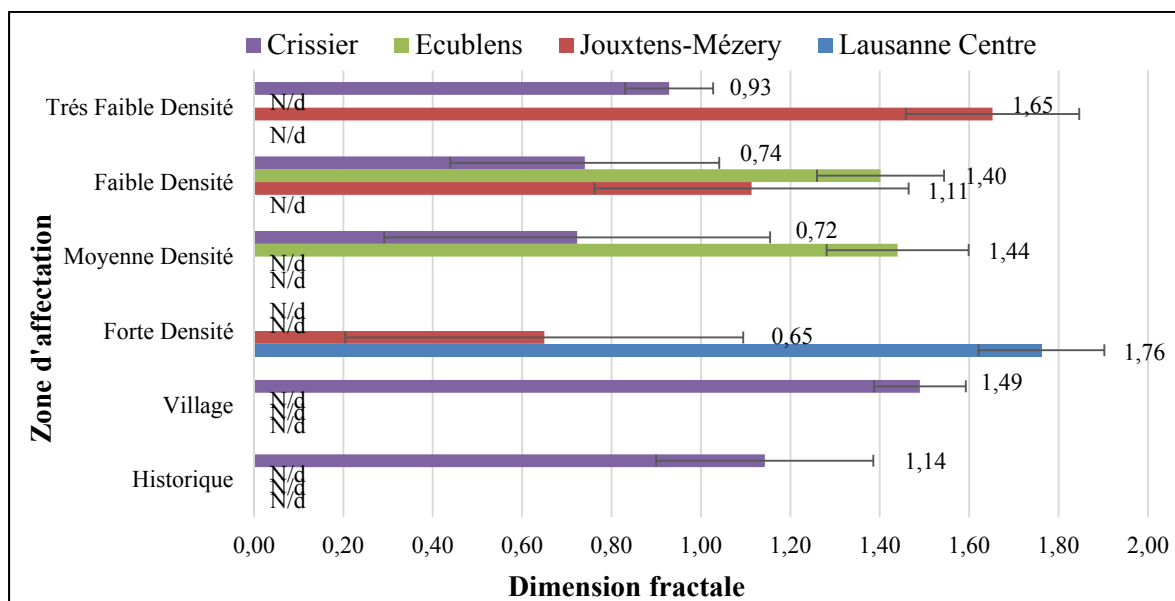


Figure 3.5 Dimension fractale des zones d'affectations résidentielles mixtes, historiques et villages

Tableau 3.2 Lacunarité des zones d'affectations résidentielles mixtes, historiques et villages

Zone d'affectation	Lausanne Centre		Jouxens-Mézery		Ecublens		Crissier	
	Lacunarité	Écart-Type	Lacunarité	Écart-Type	Lacunarité	Écart-Type	Lacunarité	Écart-Type
Historique	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	154,42	149,87
Village	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,01	21,50
Forte Densité	2,59	1,64	527,72	422,38	0,00	0,00	0,00	0,00
Moyenne Densité	0,00	0,00	0,00	0,00	9,52	9,58	317,02	362,30
Faible Densité	0,00	0,00	111,68	91,35	15,50	17,48	795,74	1015,00
Très Faible Densité	0,00	0,00	6,15	7,00	0,00	0,00	844,05	988,84

La dimension fractale des zones d'affectations résidentielles mixtes, historiques et villages est faible. Les valeurs obtenues démontrent qu'il y a une multitude de types de bâti présents à

Crissier et Ecublens. Il n'y a pas de valeur de dimension fractale dominante. Pour Jouxten, et Lausanne, certaines zones d'affectation dominent le territoire.

Le centre de la ville de Lausanne inclut une seule affectation mixte : la haute densité. Sa dimension fractale de 1,79 indique son importance, en termes d'occupation du territoire, car elle est supérieure à toutes les autres valeurs de la dimension fractale des zones d'affectations étudiées. La zone d'affectation résidentielle doit être considérée comme une agglomération compacte à elle seule (Encarnação et al, 2012). La lacunarité est très faible lorsqu'elle est comparée aux autres valeurs et elle possède un petit écart type : cela indique que la zone d'affectation haute densité est très homogène dans la zone étudiée. Ces résultats concordent avec la description initiale de la ville de Lausanne. Comme il s'agit du centre de l'agglomération, la densité est donc très élevée.

À Jouxten-Mézery, la valeur de 1,69 indique que c'est la très faible densité qui domine le territoire. La très faible densité arrive en seconde position avec une valeur de dimension fractale de 1,11. La haute densité, avec une valeur de dimension fractale de 0,65, doit être considérée comme fragmentaire (Encarnação et al, 2012). La lacunarité de 527,72 avec un écart type de 422,38 indique que la forte densité est très agglomérée dans l'espace. La distance moyenne est très élevée et son écart type l'est tout autant. La valeur de la lacunarité de la zone d'affectation faible densité est de 91,35; elle est plus grande que la zone d'affectation très faible densité avec une valeur de 7,00. Ces importantes différences dans les mesures de la lacunarité indiquent que la zone d'affectation de très faible densité est la plus importante sur le territoire. La lacunarité est une mesure d'homogénéité qui estime la distance moyenne entre les pixels. Étant donné que les zones d'affectation mixtes sont en fonction des densités, les valeurs de la mesure de la lacunarité devraient décroître à mesure que la densité augmente pour une même valeur de dimension fractale. Pour une même occupation du territoire, la lacunarité de la zone d'affectation très faible densité devraient toujours être supérieures aux mesures des zones d'affectations ayant une plus grande densité. Suivant ce constat, si la valeur de la lacunarité de la zone d'affectation de faible densité est supérieure à la mesure de la très faible densité, cela indique que la zone d'affectation ayant une plus forte

densité occupe un espace moins important, car les espaces entre chacun des pixels sont plus grands.

À Ecublens, la valeur de la dimension fractale de la zone d'affectation de moyenne densité est ex aequo avec la zone d'affectation de faible densité. Elles ont respectivement des valeurs de dimension fractale de 1,44 et 1,40. Les valeurs de la lacunarité de 9,52 pour la moyenne densité et de 15,50 pour la faible densité sont conséquentes aux observations précédentes. Les valeurs de la dimension fractale des zones de moyenne et de faible densité sont pratiquement les mêmes ; ils occupent le même espace. Les valeurs de lacunarité sont toutefois plus grandes pour la faible densité que pour la moyenne densité. Dans ce cas précis, on peut même relier les résultats aux types des zones d'affectation mesurées. L'encadrement réglementaire de la faible densité demande une plus grande homogénéité sur un territoire que les zones de moyenne densité. La lacunarité peut caractériser et différencier ces territoires sur une base quantitative. Elle distingue deux zones occupant la même surface mais possédant des règlements d'aménagement de densités différentes.

Crissier de son côté possède les caractéristiques spatiales d'une commune périphérique de Lausanne : elle a conservé son centre historique et villageois en plus d'avoir une zone mixte de faible densité. Dans l'échantillon considéré, la zone d'affectation villageoise est la zone la plus importante, car elle a la plus grande valeur de dimension fractale. Cette zone d'affectation est la plus dense, car la valeur de lacunarité de 20,01 est la plus faible. L'écart-type de 21,50 indique que la zone village est agglomérée, car l'écart type est supérieur à la valeur moyenne de la lacunarité. Suivant ces mesures, la zone village est une zone mixte assez dense et agglomérée dans l'espace. Pour la zone historique, elle est encore plus agglomérée que la zone village, sa lacunarité de 154,42 et son écart type de 149,87 sont très élevés. Pour les zones d'affectations mixtes moyennes, faibles et très faibles densités, les valeurs de dimension fractale et de lacunarité dans l'échantillon considéré indiquent différentes zones d'affectations fragmentées sur le territoire. La plus importante est la très faible densité, suivie de la faible et en dernier de la moyenne densité.

3.2.1.2 Zones d'affectation industrielles et commerciales

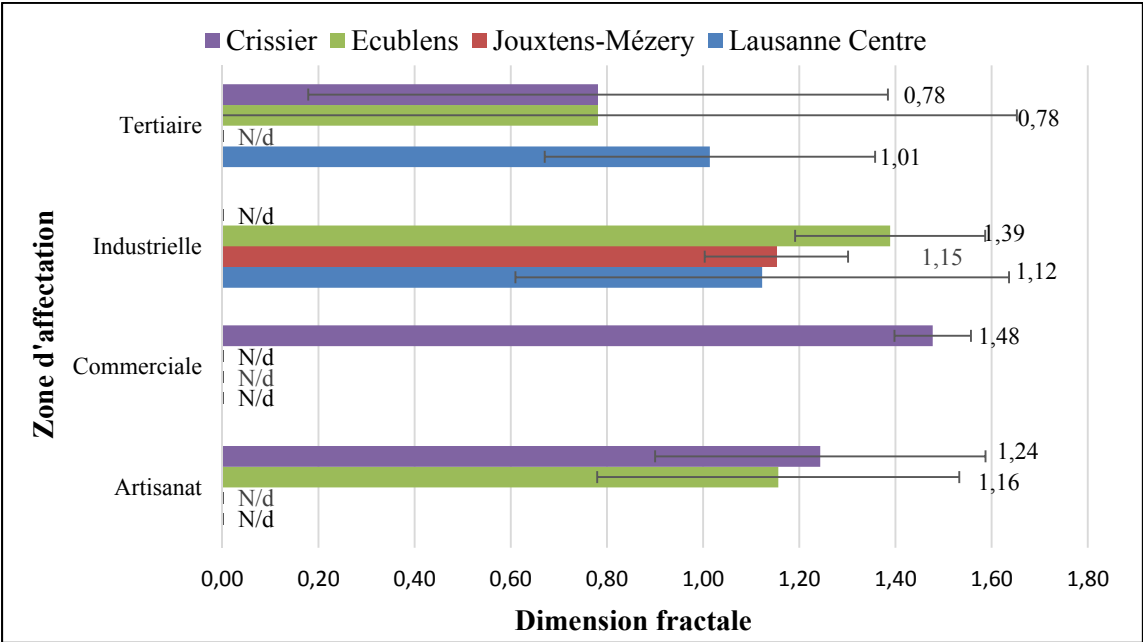


Figure 3.6 Dimension fractale des zones d'affectations uniquement industrielles ou commerciales

Tableau 3.3 Lacunarité des zones d'affectations uniquement industrielles ou commerciales

Zone d'affectation	Lausanne Centre		Jouxten-Mézery		Ecublens		Crissier	
	Lacunarité	Écart-Type	Lacunarité	Écart-Type	Lacunarité	Écart-Type	Lacunarité	Écart-Type
Artisanat	0,00	0,00	0,00	0,00	43,60	31,70	26,11	13,06
Commerciale	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,18	4,39
Industrielle	31,80	21,98	44,83	32,78	18,78	8,99	0,00	0,00
Tertiaire	192,31	180,23	0,00	0,00	361,67	360,14	844,05	988,84

La dimension fractale des différentes zones d'affectations demeure faible, car aucune valeur de dimension fractale ne dépasse 1,40. Il n'y a aucune zone d'affectation qui peut être considérée comme un espace compact et consolidé (Encarnação et al, 2012). Une comparaison des valeurs de la dimension fractale des activités industrielles et commerciales indique que les usages alloués dans les zones en périphérie sont plus diversifiés que celles qui sont situées dans la zone centrale.

Les mesures du centre-ville de Lausanne révèlent que les activités économiques sont concentrées dans la zone d'affectation mixte, car il n'y a qu'une faible présence d'activités industrielles et aucune activité commerciale. L'importance de la zone d'affectation industrielle au centre de l'agglomération lausannoise ne correspond pas aux schémas habituels de développement urbain où les zones industrielles sont en périphérie. Cette particularité est due à la friche urbaine du Flon que l'on retrouve dans l'échantillon.

La dimension fractale des zones d'affectations industrielles et artisanales est plus importante à Ecublens, Jouxten-Mézery ou Crissier que la valeur de la dimension fractale de la zone d'affectation industrielle de Lausanne. Cela indique que les communes en périphérie ont des

activités industrielles et artisanales plus importantes. Jouxten-Mézery possède uniquement des activités industrielles, la lacunarité de 44,83 est supérieure à la valeur lacunarité de 31,80 dans Lausanne centre. Ils possèdent pratiquement la dimension fractale avec des valeurs respectives de 1,15 et 1,12, mais l'espace moyen est plus important tout comme l'écart-type. Cela indique qu'à Jouxten, l'affectation industrielle est plus agglomérée et qu'elle n'est composée que de quelques bâtiments importants. À Ecublens, il y a une plus grande mixité que dans les deux communes précédentes. Les zones d'affectation d'artisanat et industrielle dominent le paysage avec des valeurs de dimension fractale de 1,39 et 1,16. Les activités tertiaires avec leurs faibles dimensions fractales et leur grande lacunarité indiquent qu'il s'agit d'activités localisées à un endroit sur le territoire.

Pour Crissier, une commune reconnue pour ses centres commerciaux et ses stationnements, la valeur de la dimension fractale de la zone d'affectation commerciale est la plus importante. La valeur de dimension fractale de 1,42 indique une occupation de la zone d'affectation commerciale métastatique. La faible valeur de lacunarité de 6,18 et un écart type 4,12 indiquent une certaine homogénéité de la distribution de cette zone d'affectation sur le territoire. Cela correspond donc à la caractérisation habituelle du territoire de Crissier qui est reconnue comme une zone commerciale importante de l'agglomération Lausannoise. Les grands stationnements, résultats de la proximité avec l'autoroute des activités commerciales viennent dans ce cas sous-estimer l'importance de l'affectation commerciale, car ils ne sont pas considérés dans la mesure. Ils restent toutefois dédiés aux activités commerciales. Les zones d'affectations artisanales et tertiaires suivent par la suite. Tout comme à Ecublens, la valeur du calcul de la lacunarité de la zone d'affectation tertiaire indique que l'on pourrait résumer son emprise spatiale à une ponctualité. La zone d'affectation artisanale est relativement importante, car elle a une dimension fractale de 1,24, mais la lacunarité indique que les activités d'artisanat sont regroupées. L'écart type n'est pas assez élevé pour représenter un unique bâtiment, mais il est trop élevé pour avoir une distribution homogène sur le territoire.

3.2.1.3 Zones d'affectations installations publiques, sports et loisirs et verdure et forêt

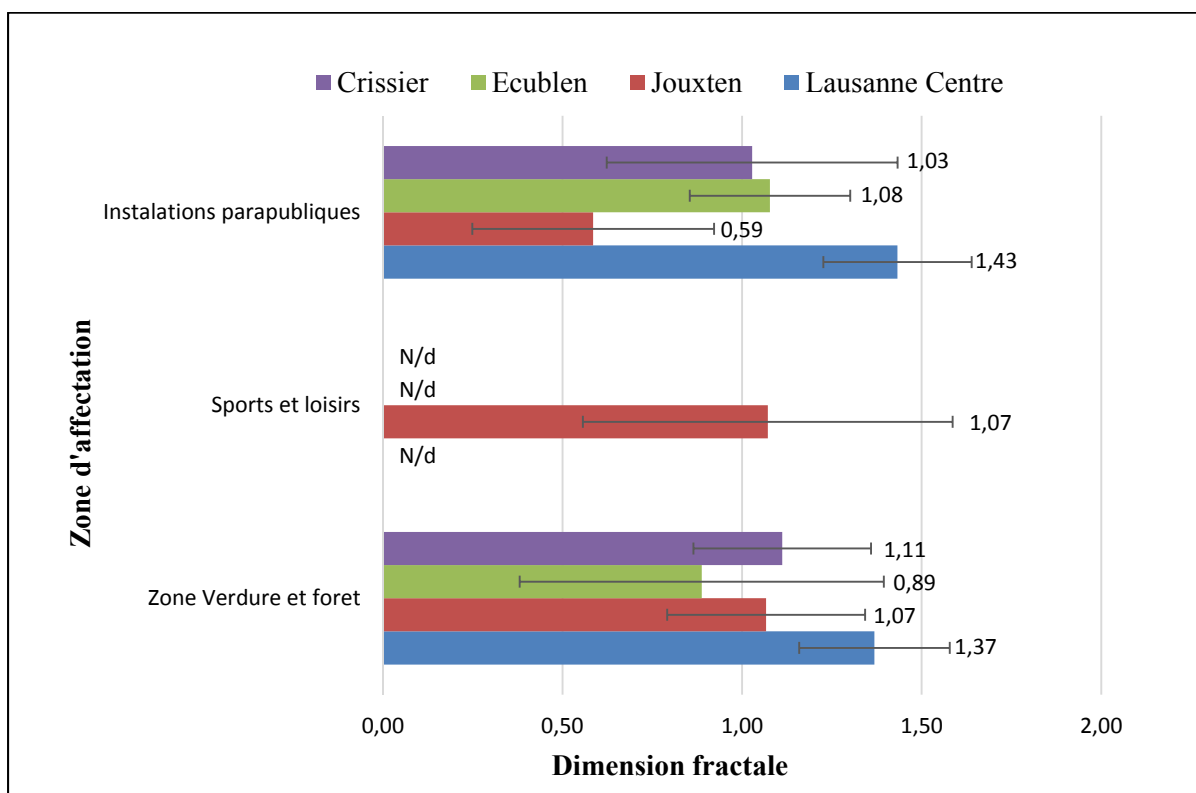


Figure 3.7 Dimension Fractale des zones d'affectations associées aux services publics, aux loisirs et aux lieux de verdure et forêts

Tableau 3.4 Lacunarité des zones d'affectations associées aux services publics, aux loisirs et aux lieux de verdure et forêt

Zone d'affectation	Lausanne Centre		Jouxten-Mézery		Ecublens		Crissier	
	Lacunarité	Écart-Type	Lacunarité	Écart-Type	Lacunarité	Écart-Type	Lacunarité	Écart-Type
Zone verdure et forêt	9,11	5,92	36,43	28,94	153,04	92,22	26,81	18,43
Sports et loisirs	0,00	0,00	88,65	59,45	0,00	0,00	0,00	0,00
Installations parapubliques	8,32	6,31	1421,70	842,78	32,57	28,90	79,25	71,51

La dimension fractale de 1,39 valide l'importance des installations parapubliques dans Lausanne. Cette valeur est supérieure à l'ensemble des mesures de la dimension fractale des zones d'affectations non mixtes. La lacunarité, avec une valeur de 8,32 et un écart type de 5,92 indique qu'elle est distribuée en plusieurs bâtiments importants qui occupent de manière homogène le territoire : la lacunarité est faible, mais l'écart type est pratiquement aussi important. L'importance des zones de verdure dans Lausanne centre dépasse celle des autres communes. La valeur de la dimension fractale est encore une fois supérieure.

Les installations parapubliques des communes de Jouxten-Mézery, Crissier ou Ecublens, sont plutôt localisées et sont formés d'un ou quelques bâtiments. Ils ont des dimensions fractales de faibles valeurs et des mesures de lacunarité élevées avec des écarts types importants. Les faibles valeurs de dimension fractale et les valeurs de lacunarité élevées indiquent qu'il y a une agglomération de la zone de verdure et forêt dans les communes de Jouxten-Mézery et Crissier. À Ecublens, il n'y a qu'une seule installation de zone et verdure, car la dimension fractale est très faible et la lacunarité est très élevée. À Jouxten, la dimension fractale de 1,07 est faible et la valeur de lacunarité à 1421,70 avec un écart type de 842,78 indique que la zone d'affectation de sport et loisir est très localisée.

3.2.2 Systèmes de transports et la morphologie urbaine

Pour être en mesure de bien décrire les systèmes qui forment les morphologies urbaines, la géométrie fractale doit pouvoir être jumelée aux autres mesures quantitatives et qualitatives des systèmes complexes pour pouvoir décrire les dynamiques qui lient les échelles. La géométrie fractale doit être complémentaire aux outils utilisés pour mesurer les dimensions de connectivité et d'historicité sur les axes organisationnelles et temporelles. Pour évaluer la capacité de la géométrie fractale à décrire les états et expliquer processus, les mesures de dimension fractale et de lacunarité ont été associées à des mesures de centralité et de connectivité. Les mesures de centralité ont été effectuées à l'aide de la mesure de *betweenness* dans le réseau de transport en commun du transport lausannois. Elles proviennent d'une étude précédente effectuée avec des collègues de l'EPFL (Chenais et al., 2014) sur le réseau

de transport à Lausanne (Chenais et al, 2014). Les résultats, présentés dans les figures indiquent une très haute centralité dans le centre de l'agglomération lausannoise. Les communes étudiées incluent Crissier, Ecublens et Lausanne. Jouxten-Mézéry n'est pas dans la portée de l'étude.

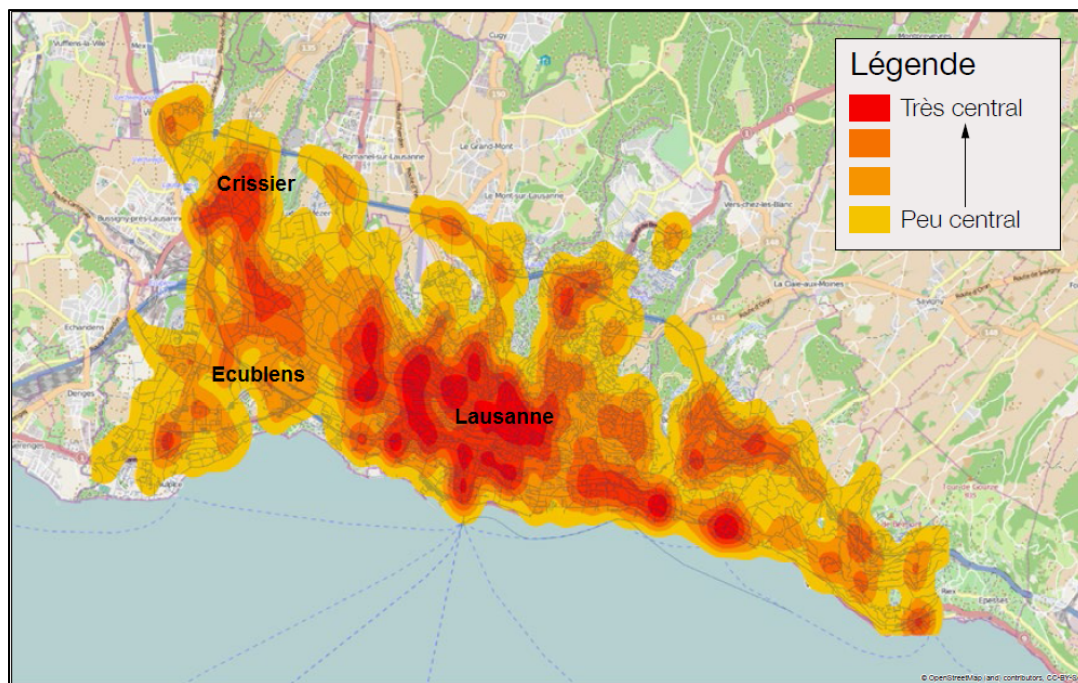


Figure 3.8 Centralité du réseau de transport routier dans l'agglomération Lausannoise
Tirée de Chenais et al (2014, p.16)

La capacité des agents à circuler dans le réseau, la connectivité, varie dans chacune des communes étudiées pour chaque moyen technique de transport. Tel que présenté dans la figure 3.9 qui présente les flux du réseau routier dans l'agglomération, la commune de Crissier est très bien connectée aux artères du système autoroutier. Elle se situe sur un nœud important qui lui confère une centralité élevée dans l'agglomération lausannoise. Ce nœud connecte l'Ouest et le centre de Lausanne au système autoroutier national. Un volume important de trafic routier s'y trouve ; l'un des plus importants de l'agglomération. Ecublens est la seconde commune étudiée la plus proche de ce nœud routier. Elle se situe sur la route reliant le nœud de Crissier et le centre de la ville. La centralité est plus faible, car le réseau est moins développé, mais il y a un pôle de centralité important grâce à la sortie d'autoroute.

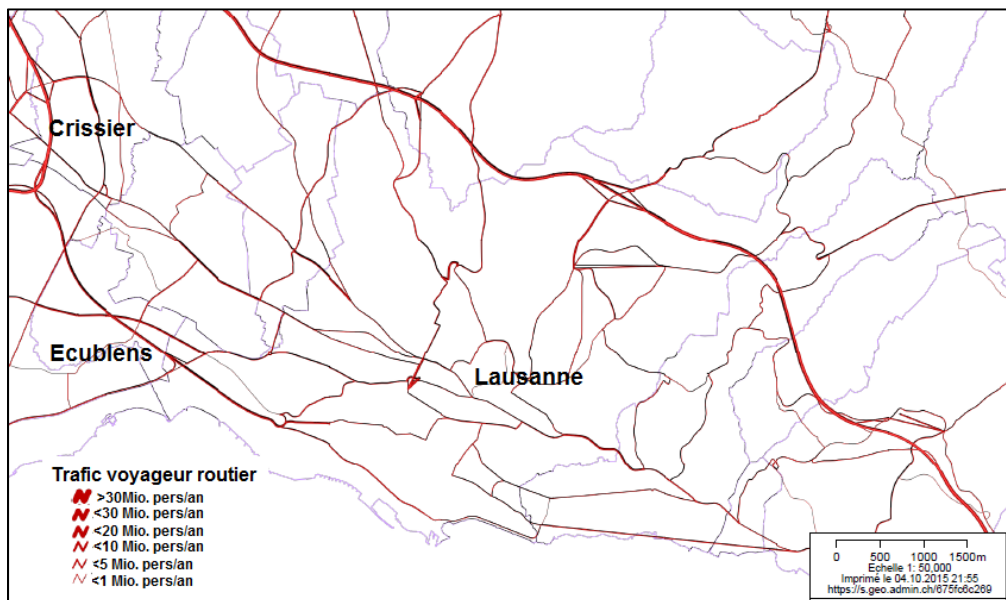


Figure 3.9 Image du volume de transport en voiture dans l'agglomération Lausannoise
Tirée du web-SIG Swisstopo (Données: ARE, 2015) ©

Le centre-ville de Lausanne n'est pas directement desservi par une autoroute, elle demeure toutefois très centrale, car l'analyse du réseau routier inclut également les rues qui forment un réseau très dense dans la municipalité. Il y a donc, un gradient décroissant entre Crissier, Ecublens et Lausanne de connectivité au réseau autoroutier. La densité crée une importante

centralité routière dans le centre de Lausanne, ces réseaux ont uniquement de faibles volumes de voitures ; ils sont donc moins importants dans la structure holarchique du réseau de transport automobile. Cette centralité donne une idée du rôle de la densité des holons, les nœuds pour augmenter la centralité d'un réseau. Cette importante centralité semble toutefois mal adaptée au mode de transport automobile car les volumes y sont faibles.

Pour les transports en commun, la centralité du réseau, présenté dans la figure 3.10, diffère légèrement des résultats autoroutiers. À Lausanne, le centre-ville a encore la centralité la plus importante. Il s'agit de l'endroit où les autobus, les lignes de métro et la ligne de train se réunissent. La commune d'Ecublens est desservie par une ligne de métro et des autobus. Crissier est desservie uniquement par des lignes d'autobus. La qualité de la desserte peut donc être inférieure, malgré des centralités plus importantes. La situation du réseau de transport en commun, la situation est un peu différente. Tel que présenté à la figure 3.11, le centre de Lausanne est très connecté, alors que la banlieue l'est un peu moins. L'axe le plus important ne relie pas les communes étudiées, il s'agit de l'axe Renens-Lausanne. La ligne de train reliant les deux communes vient augmenter la centralité, de Crissier.

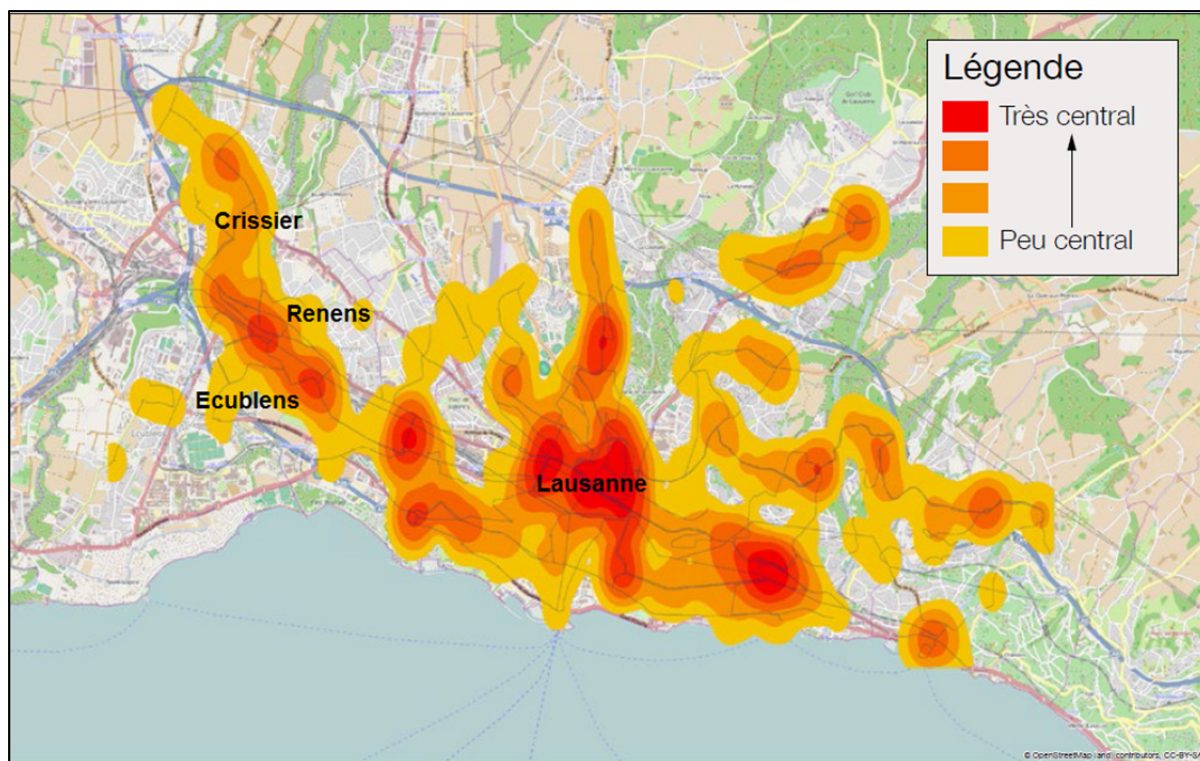


Figure 3.10: Centralité du réseau de transport public dans l'agglomération Lausannoise,
Tirée de Chenais et al (2014, p. 18)

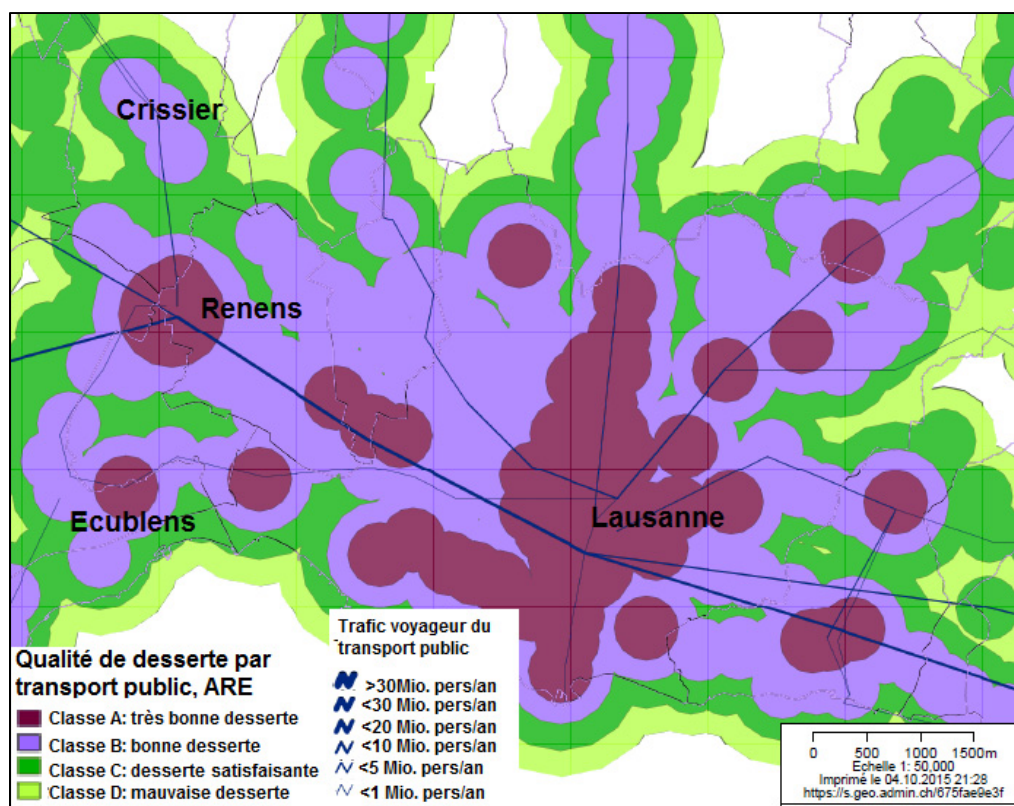


Figure 3.11: Image de la qualité de la desserte et du volume de transport en commun dans l'agglomération Lausannoise
Tirée du web-SIG Swisstopo, (Données: ARE,2015) ©

La connectivité, la capacité à se déplacer d'un nœud à un autre, à partir de ces communes est donc différente. La connectivité réelle des résidents d'Ecublens au centre de l'agglomération est plus importante pour une valeur égale de centralité à Crissier, car le service est plus important. À Lausanne, au centre de la ville, la centralité et la desserte et les volumes sont tous importants. Il y a donc gradient croissant de connectivité, de Crissier à Ecublens et d'Ecublens à Lausanne.

Les mesures fractales permettent de mesurer l'impact sur les morphologies urbaines de la centralité des lieux par rapport aux différents systèmes de transport. La centralité et la connectivité des lieux en rapport aux différents réseaux de transport en commun correspondent à des morphologies urbaines de niches. La figures 3.12 illustre avec la

dimension fractale les densités d'occupation des zones d'affectation sur le territoire, en fonction des systèmes de transport dominant un territoire.

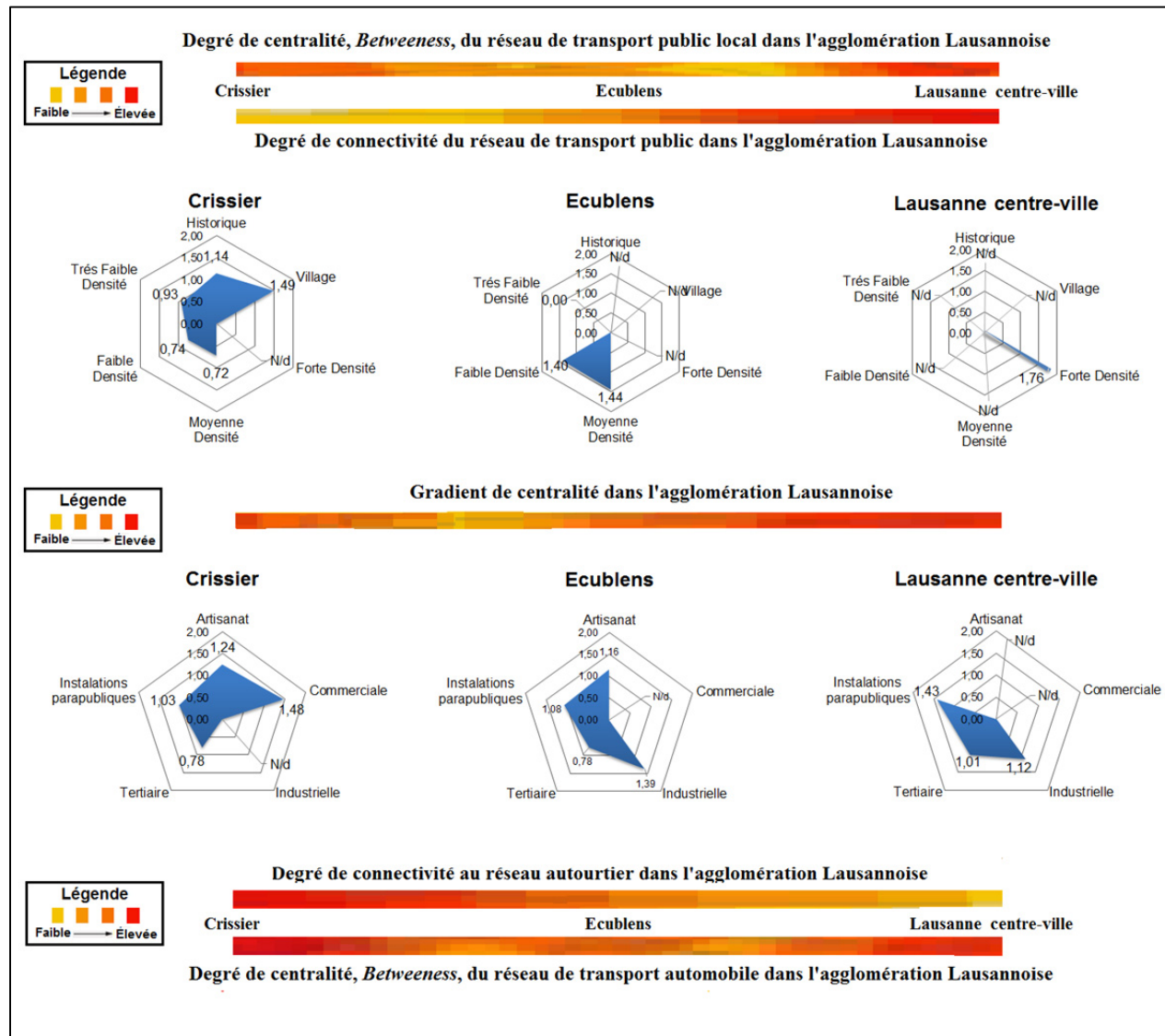


Figure 3.12 Dimension fractale des fonctions d'usages dans les communes et gradients de centralité et de connectivité associés.

Pour les activités mixtes, les mesures de dimension fractale décrivent des paysages urbains plus fragmentés dans les zones où le transport en commun a une faible centralité et lorsque l'usage de la voiture est répandu. La connectivité aux axes autoroutiers est associée à une plus grande ségrégation des activités et à plus de diversité dans les zones d'affectation. Ainsi, à Crissier, il y a une plus grande diversité de zone d'affectation ségréguée qu'à Ecublens, qui elle est, plus diversifiée que le centre-ville de Lausanne. Les zones mixtes sont plus importantes dans le centre de la ville de Lausanne. Il y a également un gradient de types de densité entre les communes mieux connectées au réseau de transport. Dû à la nature des méthodes de zonages suisses, les résultats demeurent partiels, car ils ne peuvent mesurer ce qui se trouve dans zones d'affectation mixtes. Les zones mixtes suisses ne permettent pas de mesurer la totalité de la diversité présente sur un territoire. Elle ne permet que de comparer les usages ségrégués aux activités mixtes.

Les valeurs de lacunarité, présentées à la figure 3.13 mesurent les différentes échelles de chacune des zones d'affectation. On peut observer des variations importantes entre les zones d'affectation et les communes dans leur ensemble. Pour les zones d'affectation mixtes, ces échelles semblent s'agrandir au fur et à mesure que l'on possède une connectivité au système de transport automobile. Ainsi, pour une même valeur de dimension fractale, les mesures de lacunarités sont plus beaucoup grandes à Crissier qu'à Lausanne ou Ecublens. L'exception demeure la zone village formée avant l'apparition de la voiture. Cette dernière demeure dense et agglomérée. L'étude de la morphologie urbaine et une connaissance du réseau de transport de l'agglomération lausannoise indiquent que la densité des activités mixtes du centre urbain a engendré des possibilités de connectivité importante pour un réseau de transport en commun dans son centre. La connectivité au réseau autoroutier a développé la commune avoisinante de Crissier avec le développement de la faible et très faible densité. La capacité d'accès direct à un nœud autoroutier semble également influencer la ségrégation spatiale des activités et le changement d'échelle. Les vestiges du village qui incluent les zones d'affectation historique et villages précèdent cette vague de développement. Leur échelle est plus petite, elles correspondent aux valeurs mesurées à Ecublens et Lausanne. La morphologie suit le réseau autoroutier et le gradient d'augmentation du volume de transport

automobile qui l'accompagne. Ecublens semble jouer le rôle de zone médiane entre les différents pôles de centralité. Il s'agit d'un amalgame de centralités plutôt faibles, mais assez bien connectées par des infrastructures autoroutières et de transport en commun. Il en résulte une forme urbaine qui correspond à ces dynamiques. Les zones d'affectation ont des densités moyennes ou faibles

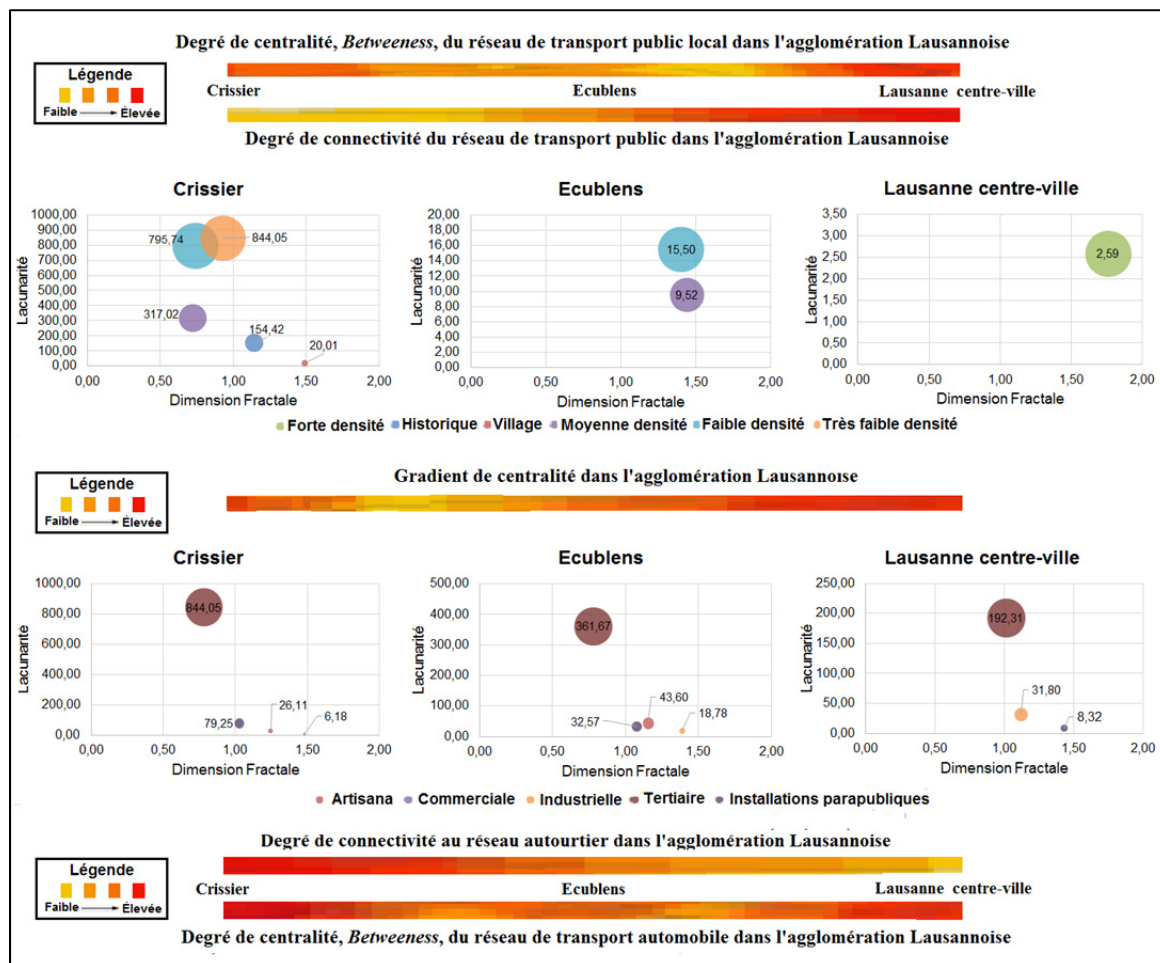


Figure 3.13 Lacunarité des zones d'affectations en fonction du réseau de transport utilisé.

Dans le centre de Lausanne, où la centralité très importante tant pour la voiture que pour les transports publics, il y a davantage de services publics. Il s'agit du point le plus central pour les deux systèmes de communication étudiés. Il s'agit donc d'un lieu approprié où peut se développer les activités publiques qui couvrent l'ensemble de l'agglomération. La centralité

et les densités associées permettent de faire des échanges d'information plus facilement. Les fonctions d'usages, qui nécessitent un échange d'information vont ainsi trouver dans ces conditions une niche intéressante. Il semblerait que la niche urbaine des activités industrielles dans l'agglomération lausannoise se situe dans l'écotone que forme Ecublens. Cette commune agit comme zone tampon entre les communes périphériques et le centre de Lausanne dans l'est de l'agglomération. Les activités industrielles les plus importantes se trouvent dans cette zone. Elles ont une centralité un peu moins stratégique, mais demeurent relativement importantes par rapport aux deux modes de transports. Le pôle de centralité secondaire, articulé autour de la voiture, avec son accès privilégié au réseau autoroutier dans la commune de Crissier donne une distribution bien différente des activités. Contrairement au centre de Lausanne où elles étaient intégrées à la zone d'affectation mixte, les activités commerciales ségréguées dominent le paysage.

Ces morphologies urbaines ont été portées par de nouvelles technologies supportées par un apport important en énergie. On pourrait y déceler une modification de la distribution spatiale des holons du système, pour absorber cet apport énergétique au système qui a engendré davantage de possibilités de mobilité. La morphologie urbaine a donc été modifiée, notamment une entrée d'énergie plus importante. Les outils techniques tel que l'automobile ont engendré, en partie, le développement de zones d'affectations de plus faibles densités dans l'agglomération. Les zones de plus forte densité sont issues d'une ère de planification antérieure aux modes de consommation associés à l'ère de l'automobile. Cette morphologie a engendré des centralités intéressantes pour développer des modes de déplacement en transport en commun et doux. Ces configurations associées au type de systèmes de transport utilisés et à la centralité des lieux dans les réseaux de communications pourraient être le résultat de structures holarchiques, articulées par des systèmes sociotechniques tels que la voiture ou les transports publics et les infrastructures qui les supportent. Il semble donc y avoir une relation locale, dans l'agglomération lausannoise, entre l'importance de la centralité et la connectivité d'une commune sur la manière dont les zones d'affectation sont distribuées sur le territoire de l'agglomération. Certains holons situés dans les zones d'affectations mixtes ont connu des distributions avec des lacunarités plus importantes en

présence de moyens techniques plus énergivores. Tel que décrit précédemment, il ne s'agit pas du seul facteur, mais de l'un des facteurs qui a engendré les modifications de morphologie urbaine. Lorsque ces holons sont rapprochés, ils engendrent des possibilités différentes, car les échelles dans lesquelles ils opèrent sont appropriés à des formes de mobilité différentes, moins énergivores. La localisation des activités et leur distribution sont en relation avec ces structures holarchiques. L'évolution du rôle des centres-villes et l'apparition d'agglomérations multipolaires seraient donc le résultat de l'évolution des structures holarchiques qui forment la ville. La dimension fractale et la lacunarité quantifient ces morphologies complexes et non euclidiennes, qui émergent de ces structures holarchiques.

La géométrie fractale peut donc être utilisée avec d'autres mesures de complexités. Elle permet de quantifier les relations entre les réseaux et les organisations spatiales sur des bases quantitatives et qualitatives. Il serait intéressant toutefois de quantifier cette évolution. En effectuant de nombreuses mesures de dimension fractale et de connectivité sur un axe temporel, il serait alors possible de quantifier les dynamiques de développement qu'engendrent les différents réseaux holarchiques. Une étude plus détaillée du système de transport et des différentes formes urbaines sur de multiples territoires pourrait générer des échantillons assez importants pour pouvoir mieux comprendre les dynamiques locales qui forment les processus de consommation et de production du système sociotechnique pour ensuite faire émerger les morphologies urbaines qui conviennent aux niches existantes.

3.3 Étude de sensibilité de la dimension fractale

La dimension fractale permet de décrire quantitativement des caractéristiques morphologiques du territoire. Il est donc important d'évaluer l'impact de différentes causes d'erreurs sous la forme théorique d'un contexte urbain sur la mesure. L'analyse de sensibilité mesure trois causes d'erreurs possibles : l'angle des composantes d'une géométrie, la forme des composantes d'une géométrie et le choix des limites des dimensions de boîtes considérées. Des expérimentations simples ont donc été construites pour évaluer l'impact de

l'angle et de la forme des bâtiments sur la mesure de la dimension fractale. L'impact du choix des dimensions limites des boîtes utilisées pour approximer la dimension fractale a aussi été étudié.

L'analyse de l'effet de l'angle sur la mesure de la dimension fractale a été faite sur deux géométries où la seule différence était l'angle des carrés qui formait la géométrie fractale. L'impact de la forme a été évalué en comparant les mesures de dimension fractale d'un ensemble géométrique formé de carrés et l'autre de cercles. Les deux ensembles géométriques occupent la même surface, car : ils ont le même nombre de composantes. Ils sont espacés de la même façon et chacun des cercles possède une aire équivalente aux carrés. L'écart entre les deux mesures, l'écart-type et les coefficients de variation sont présentés sous forme de tableaux. Ces indicateurs permettent d'évaluer de manière quantitative la stabilité des mesures de dimension fractale. Les graphiques de points décrivant l'évolution de la mesure de la dimension fractale en fonction de la dimension des boîtes utilisés permettent de comprendre comment la mesure évolue sur toutes les échelles de grandeurs pour chacune des géométries. Les liens entre les échelles de grandeurs et la dimension des boîtes en pixels est présenté au tableau 3.5. Les résultats démontrent que le choix des dimensions des boîtes à utiliser pour calculer la valeur de la dimension fractale est l'élément le plus important pour avoir des mesures précises et comparables.

Tableau 3.5 Dimension des boîtes et ordre de grandeur correspondant.

Ordre de Grandeur	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Dimension des boîtes (pixel)	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024

Pour mieux comprendre l'effet du choix des limites des dimensions de boîtes considérées et choisir les plus pertinentes, les données de tous les calculs de toutes les dimensions de boîtes utilisés pour mesurer la dimension fractale ont été compilées sous forme de graphiques et tableaux. L'augmentation itérative de la dimension des boîtes utilisée pour couvrir les

surfaces engendre 11 ordres de grandeur avec les images utilisées. Les dimensions de boîtes des ordres de grandeur 10 et 11 n'ont pas été considérées, car les mesures sont saturées (Annexe XIV). Il s'agit donc de données qui viennent surestimer la valeur de la dimension fractale. La limite de saturation se situe entre les ordres de grandeur 7 à 9 en fonction du pourcentage de territoire occupé mesuré. Cette plage limite a donc été étudiée pour déterminer la dimension de boîte limite à utiliser pour avoir la meilleure mesure. Le choix de la limite de dimension inférieure des boîtes est également considéré comme une source d'erreurs. Les échelles de grandeurs 1 à 3 ont donc aussi été analysées, car elles constituent les limites inférieures des dimensions de boîtes générées par les mesures. Le premier graphique permet d'effectuer une première évaluation des différents agencements d'ordre de grandeur. Il met en évidence les tendances provenant des mesures de dimension fractale utilisant les ordres de grandeur limites supérieures 7 à 9 et les ordres de grandeur limites inférieures 1 à 3. Les choix de plages de dimension de boîtes utilisées les plus pertinentes ont été ensuite comparées dans un tableau. Les mesures de dimension fractale de deux ensembles géométriques occupant la même surface, mais composés de structures différentes, ont été utilisées pour comparer les méthodes de calculs. Les surfaces à 23, 77, 83 et 88 % d'occupation de l'espace sont les points de référence. Cette approche permet de mettre en évidence la précision et stabilité des plages de dimension de boîtes utilisées dans le calcul des mesures de dimension fractale. Les erreurs de mesure entre deux géométries couvrant la même surface et le coefficient de variation sont les indicateurs quantitatifs qui permettent de départager la qualité des mesures. Cette comparaison a permis de déterminer que l'utilisation de l'ordre de grandeur 1 à 9 mène à des résultats plus précis et constants. Cette plage d'ordre de grandeur de boîtes utilisées pour calculer la dimension fractale a ensuite été comparée à la méthode FAST dans un second tableau en utilisant les mêmes indicateurs. La mesure utilisant les plages de boîtes 1 à 9 s'est révélée plus stable et précise. Suivant ce constat, un graphe de la dimension fractale en fonction de l'utilisation de l'espace a été tracé. Il permet d'évaluer la manière dont la valeur de la dimension fractale évolue en utilisant la plage optimale d'échelle de grandeur. Cette courbe permet de renvoyer les mesures de dimension fractale à des pourcentages de territoire occupé.

3.3.1 Effet de l'angle des composantes d'une géométrie sur la mesure de la dimension fractale

Pour étudier la qualité de la méthode de mesure, deux ensembles géométriques, formés de carrés, ont été comparés. La seule différence repose sur l'angle des carrés qui composent la géométrie. Dans un des deux cas, les carrés ont été pivotés de 45 degrés sur la surface pour former des losanges. Les deux surfaces restent donc les mêmes, seul un angle de 45 degrés a été appliqué sur une des deux géométries. Si l'angle des bâtiments n'a aucun effet sur la mesure, les valeurs de la dimension fractale devaient donc être les mêmes indépendamment de l'orientation des formes composant l'ensemble géométrique considéré. Les mesures expérimentales présentées dans le tableau 3.6 démontrent que la méthode de calcul de la dimension fractale est assez robuste et précise : il n'y a pas de différence entre les deux valeurs finales de la dimension fractale. Seul l'écart type change entre les deux mesures. L'écart type de la mesure à 45 degrés est plus faible que la mesure à 0 degré, il y a une différence de 0,05. Le coefficient de variation est légèrement supérieur également.

Tableau 3.6 Effet de l'angle sur la mesure de la dimension fractale

	Dimension fractale	Écart-type	Coefficient de variation
Géométrie formée de carrés à 0 degrés	1,80	0,20	11%
Géométrie formée de carrés à 45 degrés	1,80	0,15	8%

En analysant la courbe de point qui compose les mesures de la dimension fractale, il est possible de mieux comprendre comment il est possible d'obtenir ainsi une même valeur malgré la différence entre les deux géométries. Lorsque l'on compte les boîtes occupées, la mesure à zéro degré est beaucoup plus instable que la mesure à 45 degrés qui est plus lissée. Ces variations sont issues de la manière dont les géométries se positionnent dans la grille de boîtes qui mesurent l'espace occupé lors du calcul de la dimension fractale. Toutefois, elles

convergent, car l'estimation de la dimension fractale aux différentes échelles de grandeur diffère, mais suivent les mêmes tendances générales.

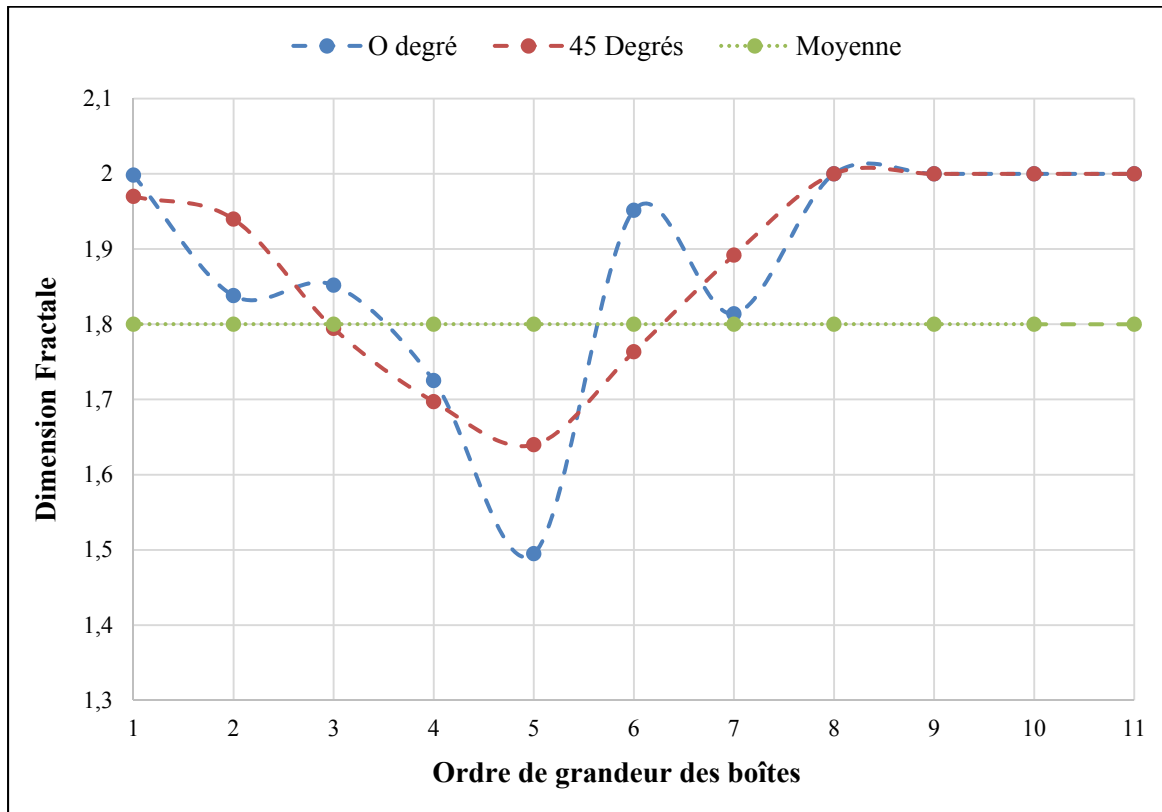


Figure 3.14 Effet de l'angle des composantes d'une géométrie sur la mesure de la dimension fractale

La mesure à zéro degré mesure ainsi une dimension fractale beaucoup plus petite que la mesure de la géométrie à 45 degrés dans le 5^e ordre de grandeur, mais la valeur obtenue pour la mesure au 6^e ordre de grandeur est beaucoup plus élevée pour la mesure à zéro degré qu'à 45 degrés. Il s'agit d'une tendance que l'on peut observer à toutes les échelles de grandeur qui ne sont pas saturées. Comme le programme Matlab du Laboratoire FAST inclut les ordres de grandeur 4 à 8, les valeurs sont bien balancées et la mesure reste stable. Si les ordres de grandeur utilisés n'incluaient pas l'une des deux valeurs extrêmes, les mesures de la dimension fractales auraient été différentes.

Pour s'assurer que l'orientation des bâtiments composant le tissu urbain n'influence pas la mesure de la dimension fractale, le choix des dimensions limites de l'intervalle de boîte utilisé pour calculer la dimension fractale est l'élément le plus déterminant. Pour avoir une précision et une répétabilité des résultats, il faut choisir des échelles de grandeurs qui incluent les valeurs inférieures et supérieures du spectre de mesure. L'impact de l'angle des bâtiments sur la précision de la mesure est alors très faible, voire négligeable. La *box counting method* peut évaluer, avec précision, des ensembles géométriques ayant des composantes aux orientations multiples, une caractéristique du tissu urbain.

3.3.2 Effet de la forme des composantes de la géométrie mesurée sur la mesure de la dimension fractale

Pour s'assurer que la dimension fractale soit en mesure d'évaluer la manière dont le tissu urbain est construit, il était nécessaire d'évaluer également l'impact de la forme des bâtiments sur la mesure. Deux ensembles géométriques couvrant la même surface ont donc été mesurés, l'un fait de carrés et l'autre de cercles. Comme la surface reste constante, la valeur de la dimension fractale devrait être identique. Plus les valeurs de la dimension fractale divergent, plus la méthode de mesure devient imprécise, car elle n'est pas en mesure de décrire deux surfaces ayant la même couverture mais différentes configurations spatiales. Les résultats présentés dans le tableau 3.7, indiquent qu'il n'y a pas d'écart significatif entre les mesures. Les deux valeurs de la dimension fractale sont identiques. Les différences résident dans l'écart type et le coefficient de variation. Ils sont plus faibles pour la géométrie composée de cercles.

Tableau 3.7 Valeur de la dimension fractale en fonction de la forme des composantes de la géométrie mesurée

	Dimension fractale	Écart-type	Coefficient de variation
Géométrie formée de carrés	1,74	0,20	11%
Géométrie formée de cercles	1,74	0,12	7%

Un écart type et un coefficient de variation plus important peuvent être expliqués à l'aide de la figure 3.15 qui présente les données brutes de la mesure de la dimension fractale. Les valeurs de la mesure de la surface composée de carrés est moins stable, car elle est composée de plus d'extrêmes, la courbe est moins lisse que la courbe formée par la géométrie de cercles. Ces valeurs sont le résultat de la position de la géométrie dans les grilles de carrés qui sont utilisées pour approximer les mesures de la dimension fractale.

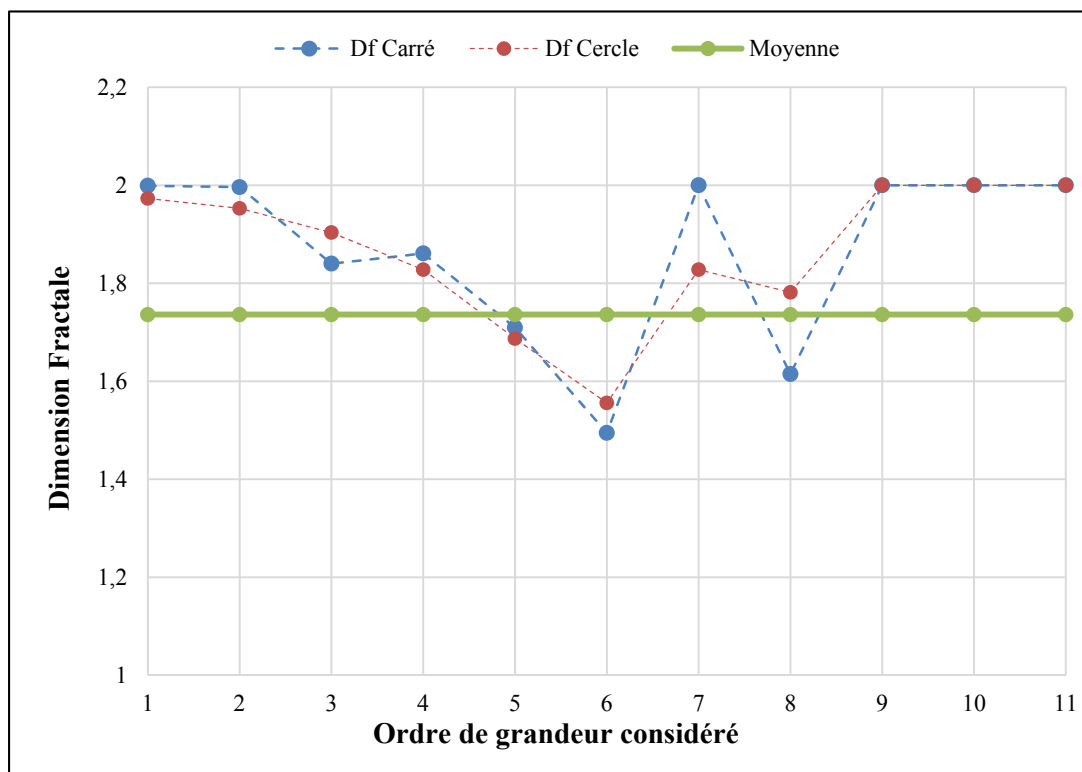


Figure 3.15 Effet de la forme des composantes de la géométrie mesurée sur la mesure de la dimension fractale

Les géométries placent les pixels dans différentes boîtes et cela fait varier les mesures aux différentes échelles de grandeur. La mesure finale reste toutefois là même, car les extrêmes divergent proportionnellement par rapport aux résultats de la courbe plus lisse. Ils ont donc la même moyenne. L'élément le plus important pour être en mesure de comparer les deux géométries réside donc dans le choix des limites des dimensions de boîtes utilisées pour

approximer la mesure. Elle doit inclure l'ensemble des extremums, sans quoi la mesure divergera vers l'un ou l'autre des extrêmes qui seront alors surreprésentés.

3.3.3 Impact des ordres de grandeur considérés sur la mesure de la dimension fractale

Le tissu urbain se compose autant de petits holons isolés, représentant un très faible pourcentage, que de groupes de holons denses couvrant une importante superficie. Pour que la dimension fractale soit en mesure de délivrer des résultats significatifs, les paramètres de mesures doivent être calibrés de manière à décrire l'ensemble des données mesurées. Le choix des ordres de grandeurs limitant la plage de dimensions de boîtes utilisées pour calculer la dimension fractale est l'élément le plus déterminant pour effectuer des analyses comparatives (Jin et Ong, 1995). Les expérimentations précédentes sur l'impact de l'angle et des formes géométriques des composantes d'un ensemble géométrique sur la mesure de la dimension fractale ont également souligné l'importance du choix des dimensions limites des boîtes utilisées. La compréhension des paramètres guidant le choix des ordres de grandeur sélectionné est déterminant pour être en mesure de produire des analyses comparatives sur différents territoires possédant des structures fractales différentes.

Le programme du laboratoire FAST sur Matlab utilise les ordres de grandeur 4 à 8 pour toutes les mesures. Comme il s'agit d'un programme d'analyse d'image, il ne s'agit pas nécessairement des ordres de grandeur les plus adaptés pour analyser la perspective spatiale du système urbain. Pour évaluer l'impact du choix des dimensions limites des boîtes considérées dans le calcul de la dimension fractale, plusieurs ensembles géométriques ont été construits. Suivant deux méthodes : l'une additive et l'autre soustractive, des ensembles géométriques couvrant de 1 à 100% du territoire ont été construits. Ces ensembles géométriques se veulent des approximations théoriques de différents tissus urbains qui ont ensuite été mesurés. Les données ont ensuite été compilées et présentées à la figure 3.16 pour comparer l'usage de différents ordres de grandeur à la méthodologie du laboratoire FAST.

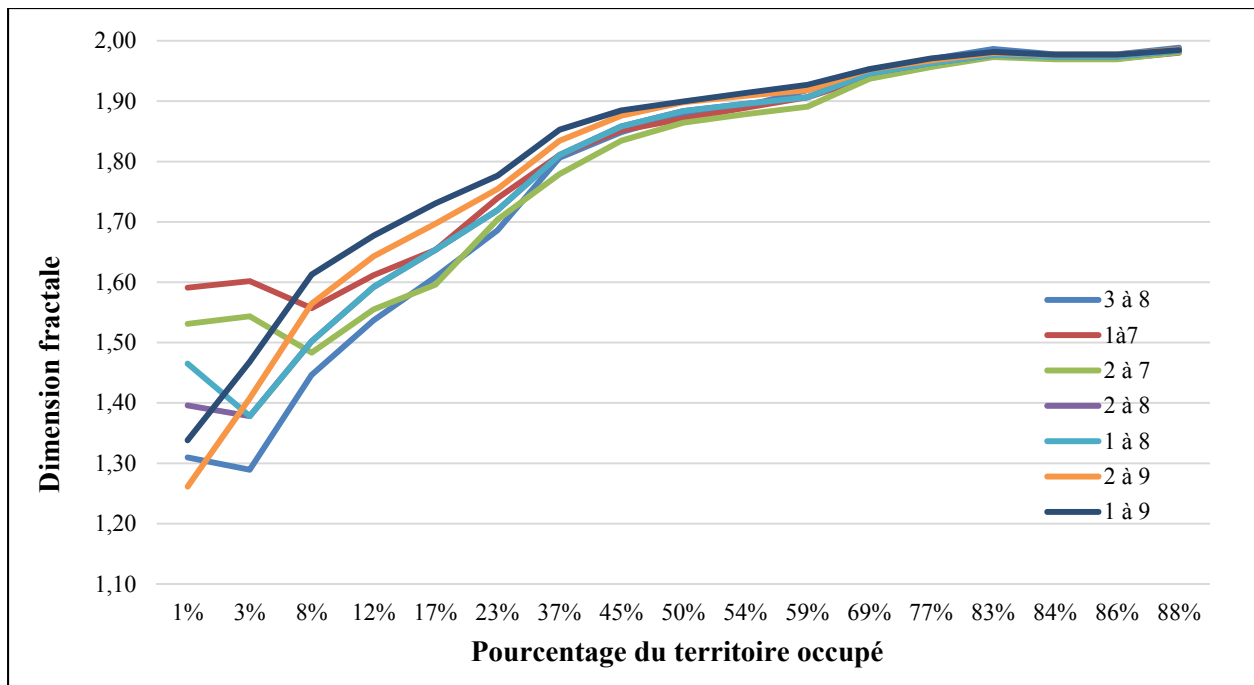


Figure 3.16 Graphe des mesures de dimension fractales en fonction du choix des ordres de grandeur

Les courbes de mesure de la dimension fractale convergentes vers la dimension topologique 2 lorsque l'espace occupé tend vers à 100%. Les erreurs de mesure les plus importantes se situent donc dans les mesures de géométrie occupant de petites surfaces. Un graphe des mesures de la dimension fractale sur une plage de 1 à 88 % permet de visualiser l'impact du choix des ordres de grandeur limites considérées sur la valeur finale de la dimension fractale pour une surface occupée identique. Pour que chaque mesure de dimension fractale puisse être reliée à une valeur correspondant à un pourcentage d'occupation de l'espace, les courbes des mesures de la dimension fractale doivent être croissantes. Autrement, deux couvertures spatiales différentes pourraient avoir la même dimension fractale. La recherche de cette propriété permet d'éliminer certaines courbes. L'élimination des méthodes utilisant uniquement les ordres de grandeur inférieurs à 8 est nécessaire. Dans ces cas, plus la limite supérieure utilisée est basse, plus il y a une inversion de tendance importante dans le calcul de la dimension fractale à des faibles pourcentages d'occupation du territoire. Cette inversion apparaît aux alentours de 3 % lorsque l'on arrête au 8e ordre de grandeur et vers 8 % au 7^e ordre de grandeur. Cela indique que l'usage de ces dimensions de boîtes est important pour

mesurer de faible densité d'occupation du territoire. L'utilisation d'ordres de grandeur s'approchant de la saturation est un élément important pour avoir des mesures cohérentes dans un contexte où l'on mesure des points dans l'espace ou encore des bâtiments isolés. Les courbes compilées permettent d'également mettre en évidence un autre impact du choix des limites des dimensions des boîtes sur la valeur de la dimension fractale calculée. Plus la dimension de la boîte limite inférieure est petite, plus les valeurs de la dimension fractale augmentent par rapport à la valeur dimension fractale calculée avec un ordre de grandeur supérieure. Dans ce cas, la valeur de la dimension fractale calculée avec comme limite inférieure le premier ordre de grandeur est toujours supérieure à la valeur de la dimension fractale calculée avec une dimension limite supérieure, dans ce cas le second ordre de grandeur.

Cette tendance haussière est expliquée par des valeurs de dimension fractale généralement élevées lorsque l'on calcule la dimension fractale lorsque la dimension de boîte approche le pixel. Cette mesure au premier ordre de grandeur augmente ainsi la moyenne de la dimension fractale globale de l'ensemble géométrique mesuré. Suivant ces constats, seulement deux plages de dimensions de boîtes sont encore à considérer. Les plages de mesures utilisant les ordres de grandeur 2 à 9 ou encore 1 à 9. Les deux courbes suivent les mêmes tendances et convergent, il n'est donc pas possible de les départager à l'aide du graphique. Une comparaison plus détaillée, présentée dans le tableau 3.8, est nécessaire afin de discriminer la plage d'ordres de grandeur la plus précise et constante.

Tableau 3.8 Analyse comparative du calcul de la dimension fractale
avec les ordres de grandeurs 1 à 9 et 2 à 9

Méthode	% occupé	Moyenne 1 à 9	Écart type	Coefficient de Variation	Écart entre les valeurs	Moyenne 2 à 9	Écart type	Coefficient de Variation	Écart entre les valeurs
Additive	23%	1,78	0,227	12,8%	-0,023	1,75	0,232	13,2%	-0,031
Soustractive		1,75	0,249	14,2%		1,72	0,248	14,4%	
Additive	77%	1,97	0,036	1,8%	-0,020	1,97	0,037	1,9%	-0,021
Soustractive		1,95	0,056	2,9%		1,95	0,058	3,0%	
Additive	83%	1,98	0,028	1,4%	-0,019	1,98	0,030	1,5%	-0,022
Soustractive		1,96	0,047	2,4%		1,96	0,048	2,5%	
Additive	88%	1,98	0,020	1,0%	-0,013	1,99	0,021	1,1%	-0,017
Soustractive		1,97	0,036	1,8%		1,97	0,037	1,9%	

Aucune valeur de dimension fractale n'est exactement la même. Ces différences résident dans le design opposé des configurations géométriques des ensembles géométriques mesurés. La méthode additive produit un ensemble géométrique composé de petites surfaces homogènes. La méthode soustractive est composée de composantes plus petites que la méthode additive. La méthode soustractive crée des ensembles géométriques sous forme de réseau avec des espaces homogènes. Il s'agit donc d'une mesure de deux configurations spatiales à l'opposé. Cela augmente l'erreur de mesure. Il faut noter également que les pourcentages de territoire occupé divergent légèrement à l'ordre du 0,1%, il s'agit d'une cause d'erreur. Deux critères ont été utilisés pour évaluer les deux plages de calcul de la dimension fractale et choisir la mesure la plus précise. Le premier est l'écart entre les deux mesures de la dimension fractale des ensembles géométriques. Le second est le coefficient de variation. Les différences entre les mesures calculées indiquent que les écarts entre les mesures de la dimension fractale sont plus petits lorsque l'on utilise tous les ordres de grandeur qui ne sont pas saturés. L'utilisation des ordres de grandeur 1 à 9 serait préférable. Cela indique que les mesures utilisant tous les ordres de grandeur sont plus stables. Les écarts entre des mesures sont plus faibles. Le calcul du coefficient de variation pour chacune des valeurs de dimension fractale indique que les valeurs entre les deux techniques sont

pratiquement les mêmes. Le choix des ordres de grandeur 1 à 9 a des coefficients de variation inférieurs en moyenne de 0,1 % par rapport aux coefficients de variation des ordres de grandeur 2 à 9. Ce faible écart vient toutefois appuyer le premier critère, car il indique que les mesures utilisant tous les ordres de grandeur sont légèrement plus précises. L'utilisation des ordres de grandeur 1 à 9 pour le calcul de la dimension fractale est la méthode la plus précise dans ce cas. Cette plage est comparée à celle utilisée dans le programme du laboratoire FAST dans le tableau 3.9.

Tableau 3.9: Analyse comparative du calcul de la dimension fractale avec les ordres de grandeurs 1 à 9 et 4 à 8

Méthode	% occupé	Moyenne 1 à 9	Écart type	Coefficient de variation	Écart entre les valeurs	Moyenne 4 à 8	Écart type	Coefficient de variation	Écart entre les valeurs
Additive	23%	1,78	0,227	12,8%	-0,023	1,65	0,237	14,3%	0,045
Soustractive		1,75	0,249	14,2%		1,70	0,288	17,0%	
Additive	77%	1,97	0,036	1,8%	-0,020	1,97	0,038	1,9%	-0,037
Soustractive		1,95	0,056	2,9%		1,93	0,068	3,5%	
Additive	83%	1,98	0,028	1,4%	-0,019	1,99	0,020	1,0%	-0,044
Soustractive		1,96	0,047	2,4%		1,94	0,056	2,9%	
Additive	88%	1,98	0,020	1,0%	-0,013	1,99	0,020	1,0%	-0,030
Soustractive		1,97	0,036	1,8%		1,96	0,043	2,2%	

La méthode de calcul de la dimension fractale utilisant tous les ordres de grandeur a donc été comparée à la méthode utilisée dans le programme du laboratoire FAST. Les mêmes critères ont été utilisés : la différence des valeurs de la dimension fractales obtenues et le coefficient de variation. Les différences entre les valeurs de dimension fractales calculées sont beaucoup plus marquantes que dans l'analyse comparative précédente. Les calculs de la dimension fractale utilisant les ordres de grandeur 1 à 9 sont beaucoup plus constants. La différence

entre les valeurs obtenues pour les mesures des deux ensembles géométriques couvrant 23 % de l'espace est de -0.021 pour la méthode utilisant l'ensemble des ordres de grandeur alors qu'elle est de 0,041 pour la méthode du laboratoire FAST. L'écart entre les différences de valeurs de la dimension fractale est ainsi passé de 0,008 entre les deux méthodes précédentes à près de 0,068 lors de la comparaison de la méthode du laboratoire FAST avec l'usage des ordres de grandeur 1 à 9. Le coefficient de variation vient appuyer également l'utilisation des ordres de grandeur 1 à 9 par rapport au programme Matlab utilisé précédemment. Le pourcentage est toujours plus faible lorsque l'on utilise les ordres de grandeur 1 à 9 pour calculer la dimension fractale. Les valeurs du coefficient de variation des calculs effectués par la méthode du laboratoire FAST sont en moyenne supérieures de 0,7 %. La méthode de calcul de la dimension fractale utilisant les ordres de grandeur 1 à 9 est donc supérieure à la méthode FAST.

Les graphes des mesures de la dimension fractale en fonction de l'espace occupée, présentés dans les figures 3.17 et 3.18, permettent de décrire la manière dont la dimension fractale est calculée et ainsi comprendre pourquoi utiliser l'ensemble des ordres de grandeur est préférable à la mesure du programme FAST. Le laboratoire FAST a dû diminuer la qualité des résultats dans certaines situations pour avoir un outil qui est capable de mesurer avec une certaine fiabilité un ensemble de données plus hétérogènes. Les cas limites ont donc été éliminés pour avoir plus de flexibilité. Toutefois dans le cas étudié, l'objectif est de mesurer l'occupation du territoire en général, pixel par pixel. L'utilisation des échelles de grandeurs inférieures est préférable, car on inclut une plus grande plage de données, ce qui augmente la précision des mesures. Les courbes à 23 % et 77 % démontrent bien cette perte de précision. La méthode du laboratoire FAST ne prend pas en compte les données qui poussent la dimension fractale vers le haut. Elle prend en compte uniquement la partie supérieure de la forme de cloche inversée que prennent les courbes. Ces données sont pourtant pertinentes. Dans le cas de l'analyse comparative des géométries à 23 %, comme la cloche est plus imposante, la mesure de la dimension fractale est moins précise que dans l'analyse comparative des géométries à 77 %. C'est ce qui expliquerait la valeur décroissante des écarts entre les mesures et des coefficients de variation au fur et à mesure que l'occupation

du territoire croit. Le choix des ordres de grandeur peut avoir un impact plus important sur la précision des résultats à mesure que la quantité d'espace occupé par des ensembles géométriques considérés diminue.

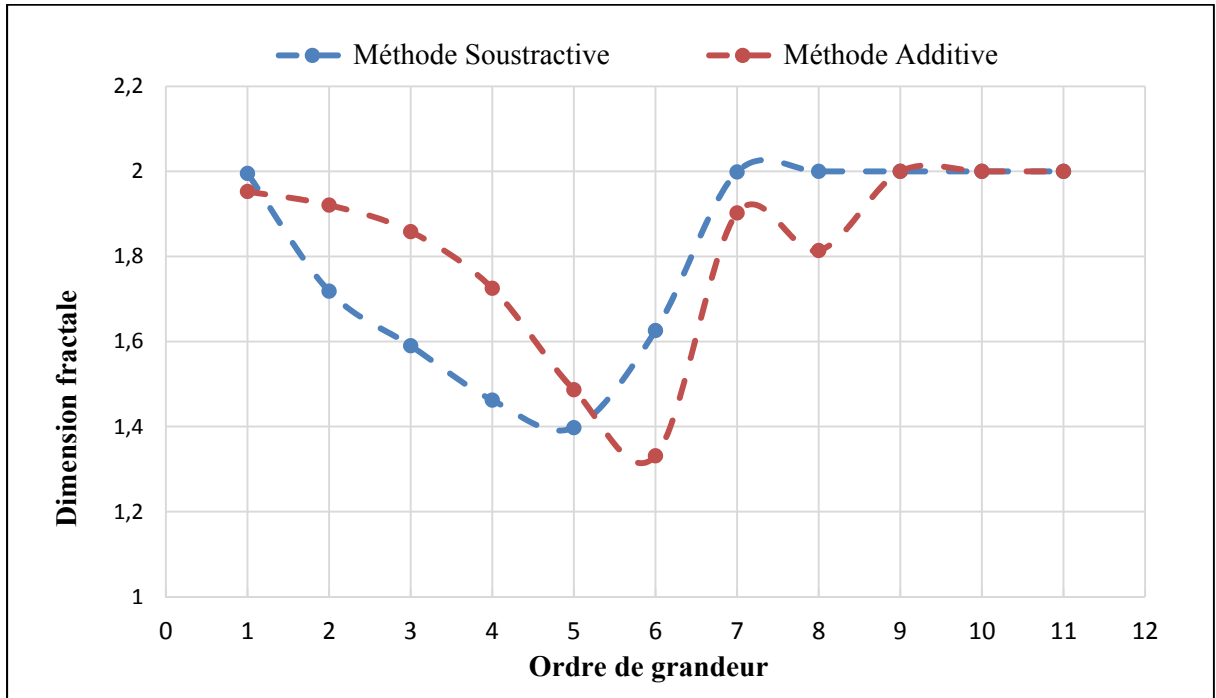


Figure 3.17 Effet de la géométrie sur la mesure de la dimension fractale à 23% d'occupation de l'espace

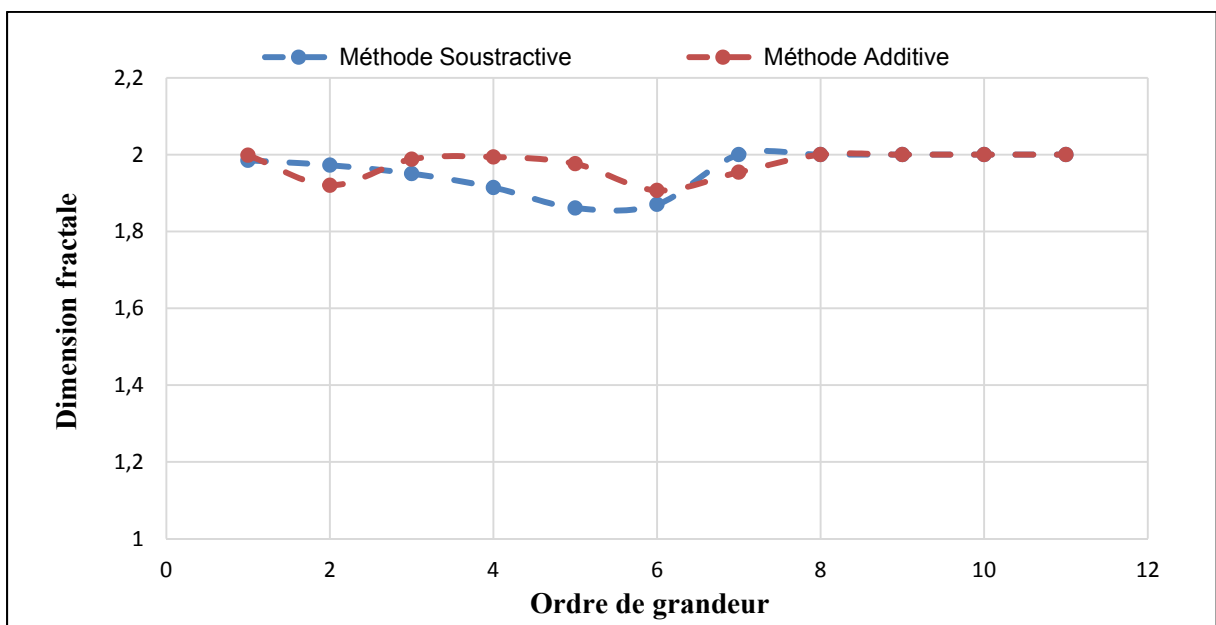


Figure 3.18 Effet de la géométrie sur la mesure de la dimension fractale
à 77% d'occupation de l'espace

L'analyse de l'effet du choix des ordres de grandeur a permis de trouver un outil qui augmente la qualité de l'analyse en démontrant qu'il est possible d'associer une valeur de la dimension fractale à une valeur approximative d'occupation du territoire. En mesurant une agglomération à partir d'une carte de 5000 X 5000 pixels sur 9 ordres de grandeur, une valeur de dimension fractale de 1,8 correspondrait à une occupation d'environ 20 % du territoire. Cependant, cette approximation est valable uniquement pour les conditions de mesures équivalentes à l'analyse de sensibilité. Par exemple, une valeur de dimension fractale de 1,8 équivaut à environ 25 % d'occupation du territoire lorsqu'elle est mesurée avec la méthode du laboratoire FAST. Si les paramètres changent, la courbe qui permet de faire l'association entre la valeur de la dimension fractale et le pourcentage d'occupation du territoire n'est plus valide. Il s'agit de la principale faiblesse de la mesure de la dimension fractale, les paramètres doivent être absolument les mêmes, sinon l'analyse comparative n'est plus valide. Il y a une quasi-infinité de valeurs qui pourraient être associées à un pourcentage, car les paramètres peuvent changer de manière infinie. La dimension et l'échelle de l'espace considéré, la quantité d'ordres de grandeur, la résolution de l'image sont toutes des facteurs qui vont modifier la valeur relative de la dimension fractale

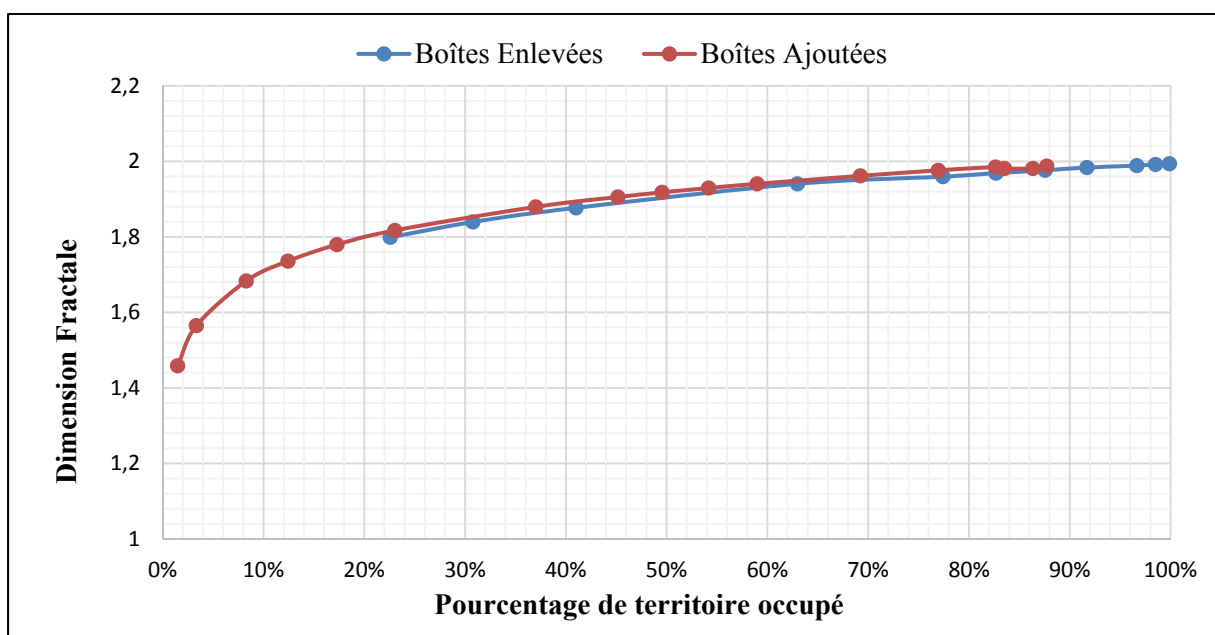


Figure 3.19 Valeur de la dimension fractale en fonction du pourcentage de l'espace occupé.
Valeurs moyennes utilisant les ordres de grandeur 1 à 9

CHAPITRE 4

DISCUSSION

La géométrie fractale met en perspective les caractéristiques spatiales des composantes des systèmes urbains. La dimension fractale quantifie le taux d'occupation, la densité, des composantes mesurées dans l'espace. La lacunarité donne l'information sur la distribution des éléments mesurés. Elles sont donc complémentaires, l'une donne l'information sur la quantité d'espace utilisée et l'autre sur la manière dont l'espace est occupé. La combinaison des deux mesures permet de sortir du cadre restrictif des mesures de densité et d'entrer dans la mesure de la distribution de l'hétérogénéité d'un système. Pris sous l'angle des systèmes holarchiques complexes ouverts et auto-organisés, la géométrie fractale permet de caractériser les holons qui forment les réseaux qui caractérisent les flux d'information, de matière et d'énergie. La géométrie fractale permet donc de caractériser les morphologies non euclidiennes qui émergent des processus complexes. La cartographie spatiale des holons qui composent ces systèmes permet d'étudier, modéliser et d'influencer les caractéristiques qui influencent ces processus. La nature matricielle de la géométrie fractale permet de mesurer les caractéristiques spatiales de pratiquement tous les sous-systèmes qui forment ces systèmes. La matrice correspond alors à l'échelle et la résolution de l'étude. Toutefois, pour y arriver, les paramètres qui entourent les méthodes doivent être identiques, sans quoi elles ne sont pas comparables. L'échelle, la résolution, les dimensions de boîtes utilisées doivent être paramétrées de manière précise pour que la méthode soit valide. Les valeurs obtenues sont donc relatives et doivent être considérées dans leurs contextes. Ces contraintes rendent les études sur de larges échantillons plus difficiles. C'est pourquoi le cas Montréalais et le cas Lausannois n'ont pu être comparés. Toutefois, en développant une méthode standardisée, il sera possible d'effectuer des analyses plus importantes. Ces standards devront dépendre des systèmes étudiés et de l'échelle de l'étude.

4.1 Caractérisation spatiale

Lorsque les ensembles géométriques fractals ne sont pas statistiquement autosimilaires, les valeurs obtenues par les mesures de la dimension fractale et de la lacunarité dépendent de la plage de dimension de boîte utilisée ainsi que de l'échelle de mesure et de la résolution du support utilisé. C'est le cas des mesures effectuées dans les analyses de cas. La dimension de ces boîtes est relative à la dimension et la résolution du support, car elle détermine les dimensions des ordres de grandeur utilisés. Comme dans toute projection cartographique, l'unité de mesure réelle des boîtes dépend de la résolution et de l'échelle du support qui est utilisée pour représenter une réalité. Ces paramètres doivent être calibrés de manières empiriques pour utiliser l'analyse fractale. Il s'agit de la principale difficulté de cette méthodologie pour avoir des résultats tangibles. La signification des résultats dépend de la réalité physique mesurée. Une approche pour effectuer des analyses comparatives est donc proposée en fonction des résultats obtenus par l'an.

Le choix du support numérique représentant la géométrie a un impact important sur la mesure. Pour comparer deux territoires, le premier paramètre à considérer est la résolution des cartes et images étudiées. La résolution la plus basse est la valeur déterminante. Pour s'assurer d'avoir les mêmes résultats, il faut convertir à des résolutions plus brutes les cartes possédant des résolutions plus fines. Si la résolution n'est pas la même, une quantité égale de pixels ne couvre pas la même surface. Il est donc essentiel de choisir les mêmes résolutions et les mêmes échelles pour effectuer des analyses comparatives. La disparité de la qualité des documents disponibles génère une perte de qualité. Il faudrait normaliser les résolutions pour avoir davantage de facilité à comparer les systèmes urbains. Comme la ville est un système complexe auto-organisé, on ne peut pas comparer un quartier avec une ville ou un village entier. Elles se situent à différents niveaux des organisations holarchiques des systèmes humains et naturels. L'organisation spatiale diffère car des propriétés émergentes apparaissent et modifient la configuration spatiale de l'espace. Il faut donc s'assurer de comparer ce qui est comparable aux mêmes échelles de grandeurs et avec la même résolution. Les études empiriques sur les différents systèmes pourront probablement

déterminer certaines échelles et résolutions à privilégier. En urbanisme, il s'agit généralement de l'échelle du quartier, car il s'agit du milieu de vie à l'échelle humaine.

En plus de l'échelle et de la résolution, il est nécessaire que l'ensemble géométrique considéré, la ville, soit circonscrit aux limites de la surface mesurée pour effectuer des analyses comparatives, sans quoi les valeurs ne peuvent être considérées. Les villes ont des configurations spatiales très différentes qui sont le résultat de spécificités abiotiques locales. Par exemple, une rivière peut traverser une ville ou une baie peut abriter une communauté. Dans ces cas, le choix de l'échelle et du territoire à inclure aux limites de l'image à analyser n'est pas sans difficulté. Ces caractéristiques géographiques incluent de l'espace vide dans les géométries à considérer. Dans ce cas, l'important est d'avoir une surface inoccupée équivalente, en termes dans les cartes des autres géométries à comparer. De cette manière, les valeurs mesurées resteront comparables. Dans ces cas, les valeurs de dimension fractales diminuent et les valeurs de lacunarité sont amplifiées de manière équivalente. Cette étape est très importante et elle doit être décrite de manière précise pour être en mesure de répéter l'expérience. Autrement, les caractéristiques spatiales initiales sont différentes et on ne compare pas la même surface occupée. Étant donné la diversité des configurations spatiales du système socio-économique, cet ajustement ne semble pas automatisable pour le moment. Pour le moment, il s'agit de la partie subjective du choix des paramètres.

Le choix des dimensions des boîtes utilisées dans le calcul de la dimension fractale et de la lacunarité est le dernier paramètre à être considéré pour effectuer une analyse comparative. L'analyse de sensibilité de la mesure de la dimension fractale a permis de relever l'importance du choix des limites utilisées pour le calcul de la dimension fractale. Il est de même pour la lacunarité. Il s'agit d'un choix empirique, car la situation change en fonction des territoires étudiés. Dans les études qui mesurent l'occupation du bâti humain sur un territoire, la mesure de la dimension fractale s'apparente à une mesure de densité. L'analyse de sensibilité démontre qu'il faut prendre la plus grande plage d'ordres de grandeur possible, de la plus petite jusqu'à des mesures saturées. L'ordre de grandeur inférieur est celui au pixel dans ce cas. Pour choisir la dimension de boîte limite supérieure, il faut prendre les mesures

avant de choisir. Il faut considérer tous les résultats jusqu'à saturation pour être en mesure de choisir la plage de dimensions de boîtes optimales. Par exemple, pour les mesures dans les tests de sensibilité, il s'agissait du 9^e ordre de grandeur, car à 3% c'est la dernière mesure qui n'est pas saturée. Pour choisir ces plages, il est nécessaire d'effectuer les mesures de dimension fractale sur l'ensemble des cas étudiés et d'ensuite choisir la plage de dimensions de boîtes à utiliser pour calculer la valeur moyenne sur l'ensemble des échelles de grandeur.

Pour la mesure de la lacunarité, une étude de sensibilité serait préférable pour valider le choix des ordres de grandeur. Les éléments à considérer sont les mêmes que la dimension fractale : l'échelle inférieure doit être plus grande ou égale au plus petit élément mesuré et que l'échelle de grandeur supérieure doit être égale au plus grand élément considéré (Plotnick et al, 1993). Pour ce cas, on peut se référer aux résultats de l'analyse de sensibilité. Pour la mesure de l'espace occupé, le plus petit élément considéré pourrait être le pixel. Le plus petit bâtiment pourrait aussi être considéré. Ce choix dépend du type d'analyse. Par exemple, dans les études de cas, la mesure de la dimension fractale porte sur l'utilisation du territoire pixel par pixel. La lacunarité a donc été calculée en utilisant comme limite inférieure le pixel. Pour la dimension maximale, il semblerait que la valeur de saturation tende vers 1. Il s'agit donc de considérer l'ordre de grandeur saturé comme valeur maximale. Dans les études de cas, cette valeur limite était le plus grand ordre de grandeur calculé par le programme. Il faut donc faire les mesures de lacunarité sur toutes les cartes et images étudiées pour ensuite choisir les ordres de grandeur. Il s'agit donc du même processus que la mesure de la dimension fractale.

Cette méthodologie pourrait être partiellement automatisée. Tous les paramètres pourraient être déterminés par un programme à l'exception du cadrage. Le choix des dimensions du support pourrait demeurer manuel, dû à la complexité des morphologies. Des analyses supplémentaires devraient être effectuées pour allouer un pourcentage standard d'espace inoccupé par une géométrie mesurée. Cela donnerait une certaine flexibilité pour développer une méthode standardisée avec une faible demande en ressources humaines. Une méthode standardisée permettrait alors d'effectuer des analyses comparatives de plusieurs territoires

de natures différentes. Il serait alors possible d'effectuer des études sur davantage de cas empiriques.

4.2 Analyse descriptive

L'étude et le design des dynamiques en cascade qui forment les multiples processus de production et de consommation sur plusieurs échelles de grandeur qui incluent l'ensemble des acteurs sur plusieurs échelles de grandeur demeurent marginaux. La gestion de l'évolution des systèmes urbains requiert une compréhension des dynamiques qui forment la ville, pour pouvoir influencer l'évolution du tissu urbain. Pour avoir une approche qui prend en compte la complexité des organisations humaines et naturelles, les études urbaines ont besoin d'un outil quantitatif qui caractérise les ensembles spatiaux complexes et fragmentés du système socio-économique. Les résultats obtenus démontrent que l'analyse fractale peut répondre à cette problématique car elle permet de décrire les géométries complexes qui ne sont pas euclidiennes. Les études de cas ont permis de quantifier l'hétérogénéité des structures organisationnelle de différents quartiers des agglomérations Montréalaise et Lausannoise. L'analyse fractale permet d'étudier les zones urbaines sur une multitude d'échelles. La qualité spatiale du tissu urbain en fonction du concept de ville durable a pu être quantifiée par l'analyse fractale. Chacune des méthodes de qualification des structures et du bâti, qu'il soit Suisse ou Québécois a été en mesure de quantifier l'axe spatial et d'explorer la dimension d'hétérogénéité. Ainsi, les zones centrales ont des mesures plus hétérogènes et des échelles plus petites. Une analyse des mêmes paramètres sur des cartes de différentes époques permettrait d'étudier également la dimension de contingence historique. Cette capacité à quantifier l'hétérogénéité spatiale des systèmes urbains pourrait permettre de comprendre la manière dont les parties prenantes s'organisent sur un territoire pour faire émerger certains comportements.

Les résultats permettent de comparer aisément différentes informations sur un ou plusieurs territoires. Une dimension fractale plus élevée indique une occupation du territoire plus grande jusqu'à la valeur maximale de la dimension topologique. Les mesures de la lacunarité

viennent compléter les mesures en décrivant l'homogénéité de l'occupation du territoire. Plus la valeur est basse, plus la distribution est homogène. La valeur de l'écart-type et les courbes de lacunarité permettent de donner une indication de la distribution de cette homogénéité. Pour l'écart type, plus le nombre est grand, plus il s'agit d'une distribution regroupée en aggloméré et plus le nombre est petit, plus les éléments mesurés sont dispersés. Les courbes de lacunarité décrivent l'évolution des structures à différentes échelles de grandeur. Si les conditions de reproductibilité des résultats sont respectées, l'analyse fractale s'avère être un outil quantitatif efficace et précis pour comparer différentes informations sur un territoire. La combinaison de l'étude des systèmes de transports lausannois et de la morphologie urbaine correspondante a ainsi permis de voir les relations qui existent entre la forme urbaine et les systèmes de communication. Il s'agit ici d'un processus sociotechnique avec des propriétés organisationnelles émergentes. L'organisation spatiale des activités humaines émerge ainsi des relations entre les technologies, l'énergie disponible et les processus culturels. Trois différentes niches urbaines ont pu être identifiées dans l'agglomération lausannoise.

L'usage de différentes techniques d'allocation du territoire a permis de relever que l'analyse fractale pouvait caractériser plusieurs formes d'informations présentes sur un territoire. La nature matricielle de ces études permet également d'étudier une multitude d'informations distribuées de manière complexe dans son environnement. Cette propriété leur permet de mesurer la distribution spatiale des éléments basiques et ponctuels qui sont généralement la cause des phénomènes émergents (Batty, 2005). En travaillant sur les holons du système urbain, les composantes formant le territoire, on peut alors travailler sur les flux qui les supportent. La nature quantitative des mesures permet une analyse systémique, car elle permet de comparer sur la même base, l'ensemble des composantes des formes urbaines. La géométrie fractale permet de décrire non seulement l'état spatial des systèmes complexes dans son ensemble (Encarnação et al., 2012), mais également de quantifier la complexité des systèmes qui compose la forme urbaine qui émergent des processus sous-jacents. Elle permet de mesurer l'évolution et la prépondérance des différents sous-systèmes. Le gradient urbain, observé dans l'agglomération lausannoise en témoigne. Dans le cas des formes urbaines, la géométrie fractale peut donc également décrire la manière dont la morphologie évolue sur

une base temporelle. Cela permet donc de quantifier l'évolution des différents systèmes qui composent la trame urbaine.

Appliquée à l'écologie industrielle, la géométrie fractale peut décrire la composition des niches industrielles. La description des acteurs sur un territoire permet d'évaluer, approximativement, les métabolismes d'un territoire et ainsi évaluer son potentiel métabolique. Les mesures non-euclidiennes peuvent également améliorer la qualité des mesures de stocks de matière première dans les systèmes urbains. La nature des bâtiments permet d'évaluer les types de matériels et les valeurs quantitatives, non-euclidiennes permettent d'évaluer quantitativement leurs distributions. Les études de cas ont ainsi cerné de multiples organisations industrielles. Cela permet donc de mieux étudier la manière dont les réseaux locaux se comportent et de comprendre les caractéristiques géographiques dont dépendent les processus industriels. La géométrie fractale est donc un outil de caractérisation empirique des systèmes complexes. Elle décrit, sur l'axe spatial, par des mesures quantitatives, l'hétérogénéité des structures que forment les réseaux holarchiques qui les composent.

4.3 Design et modélisation

Une méthode quantitative d'analyse du territoire efficace doit permettre l'étude, la modélisation et le design de structures spatiales plus efficaces pour engendrer l'hétérogénéité nécessaire à la création de nouvelles structures énergétiques holarchiques dissipatives qui réduiront l'impact environnemental des activités humaines. La littérature met de l'avant des structures qui se veulent denses et complexes et hétérogènes. Ce postulat repose une ville présentée comme une extension anthropique et naturelle des écosystèmes. Il faudrait donc, maximiser, en fonction des conditions locales différentes formes urbaines hétérogènes. En ingénierie écologique, la géométrie fractale a été utilisée pour optimiser ces structures. À l'aide de mesures quantitatives, il est possible d'optimiser la biomasse et la biodiversité des écosystèmes (Parrot, 2010). Avec la géométrie fractale, il est donc possible de ainsi maximiser la complexité des écosystèmes pour maximiser la création de structures holarchiques efficaces. L'efficacité a également été optimisée à l'aide de modèles de coûts

linéaires, tel que présenté dans la figure 4.1. Ces modèles sont de brefs aperçus des possibilités que la géométrie fractale pourrait avoir en urbanisme et en écologie industrielle. Il représente une combinaison des modèles cellulaires et fractals. La géométrie fractale est donc complé En utilisant les résultats obtenus dans les analyses de cas, on pourrait calculer et scénariser la manière dont doit évoluer les formes urbaines pour être plus durables. Cette approche serait complémentaire aux modèles cellulaires et aux modèles issus de la théorie des graphes pour comprendre les dynamiques qui forment les processus urbains et industriels.

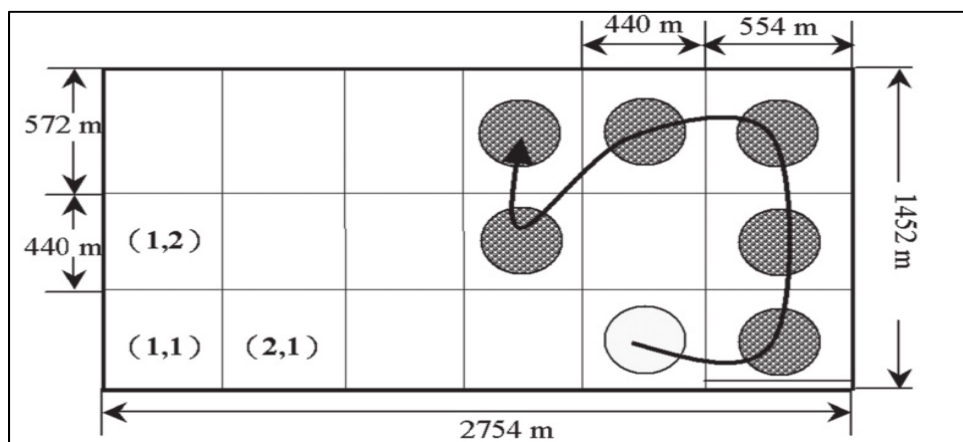


Figure 4.1: Déploiement optimal de récifs artificiels, en fonction de la complexité du récif et des coûts d'installation dans l'étude de cas du port de Xing-Da
Tirée de Lan et Hsui, (2006, p. 27)

À l'inverse des systèmes de production qui s'optimisent pour atteindre des objectifs de contrôle, les processus naturels tendent à maximiser l'accumulation d'exergie ou la dissipation d'énergie dans de multiples niveaux hiérarchiques. Ils s'adaptent ainsi à l'environnement changeant avec plus de structures émergentes et des hiérarchies de plus grands ordres obtenues (Chen et Chen, 2006). L'organisation des systèmes, sous la forme de structures holarchiques donne donc plus d'adaptabilité pour rendre les systèmes plus efficients. Par exemple, les inputs d'énergie ou d'exergie au niveau photosynthétique des écosystèmes oscillent avec les apports dominant du cycle de jour/nuit. L'énergie input aux autres niveaux des systèmes écologiques supérieurs est également régulière et non

intermittente (Mansson et McGlade, 1993). La fluctuation des besoins matériels et énergétiques est donc similaire aux processus industriels qui fluctuent également dans le temps. Les humains, avec les énergies renouvelables, entrent dans les mêmes dynamiques de production et de consommation. Pour stocker l'énergie produite selon les cycles géophysiques, lunaires et solaires, les écosystèmes stockent l'énergie de multiples manières en fonction des conditions dont les niches dépendent. Par exemple, les humains ne peuvent substituer la nourriture par des énergies fossiles ou l'énergie solaire (Ulgiati et Brown, 2009). De la même manière, les symbioses industrielles s'auto-organisent en fonction des acteurs locaux, pour maximiser l'usage des ressources disponibles. La modélisation des structures de production et de consommation sur base spatiale pourrait donc permettre de comprendre comment organiser la diversité des acteurs avec leurs métabolismes propres sur un territoire pour qu'ils forment un système global plus efficient. La géométrie fractale, en mesurant efficacement la composition et donc les métabolismes des formes urbaines pourrait donc modéliser la composante spatiale de ces systèmes. Les valeurs obtenues seraient plus révélatrices que les modèles entièrement cellulaires car ils quantifieraient la disposition spatiale. Il serait donc possible de mesurer l'effet de différentes configurations hétérogènes quantifiables. Il serait alors plus facile de transposer ces apprentissages à la planification urbaine.

Les écosystèmes ne sont pas uniquement fonction de la quantité totale d'énergie disponible, mais également par la qualité des différents flux. Ils dépendent de deux propriétés de qualité dans les structures holarchiques: la qualité parallèle et la qualité croisée (Ulgiati et Brown, 2009). La qualité parallèle est l'efficacité d'un processus dans les mêmes niveaux hiérarchiques. Pour tout produit issu des processus écologiques, il y a une infinité de manières de le produire dépendant des conditions. C'est sur ces processus que les technologies travaillent généralement. La qualité croisée est reliée à l'organisation hiérarchique du système. C'est à ce niveau que la géométrie fractale peut être utilisée pour analyser la disposition des différents holons qui forment les réseaux holarchiques. Elle dépend des transformités entre les holons et leurs échelles. Théoriquement, dans les systèmes naturels, plus la transformité est grande, plus l'apport en l'énergie solaire est important pour

produire les résultats escomptés. Cela s'accompagne d'une position plus importante dans la hiérarchie énergétique de l'univers. Pour un même résultat, un système avec une transformité plus faible est écologiquement plus efficient (Cai et al, 2009). Ainsi, la soutenabilité d'un système dépend de la relation entre ce système et ces entrants externes en énergies et leur transformité qui dépend eux aussi des dynamiques du système plus grand qui les comprennent (Cambell et Garmestani, 2012). Par exemple, dans le système industriel, la performance énergétique des bâtiments est reliée à la qualité des tissus urbains (Steemers, 2003). L'étude des systèmes humains avec la géométrie fractale décrit donc la configuration spatiale des métabolismes, des acteurs, de leur valeur, de la disponibilité des ressources sociales, énergétiques et matérielles pour comprendre les configurations spatiales qui permettent de faire émerger des systèmes holarchiques plus soutenables. Cette organisation spatiale peut être également décrite sous la forme de pulsation, plus l'élément est haut dans l'holarchie, plus le temps nécessaire à accumuler l'énergie est importante (Brown et al, 2004). Ainsi, à Lausanne, la configuration des composantes du centre de Lausanne et de Montréal qui sont denses et hétérogènes, présentent des niches ayant des positions plus développées dans le rôle holarchique. La diversité et l'échelle des mesures ont données des valeurs de dimension fractale et de lacunarité quantifiant cette diversité.

La géométrie fractale permet d'opérationnaliser, sur une base quantitative, la volonté de l'urbanisme durable et de l'écologie industrielle de gérer la diversité des holons pour modifier les processus de industriels de production et de consommation. Les résultats permettent, d'envisager la modélisation de scénarios pour mieux comprendre la manière dont il faut organiser les modèles organisationnels humains en fonction de différentes dimensions sociales, techniques ou environnementales.

Dans les structures urbaines, ces modèles organisationnels sont facilement identifiables dans les infrastructures publiques. Le système d'éducation en est un bon exemple : les garderies, les centres de la petite enfance et les écoles primaires sont distribués à l'échelle du quartier, ensuite des écoles secondaires généralement à l'échelle des villes et les institutions postsecondaires à l'échelle nationale et régionale. L'organisation spatiale du savoir suit ces mêmes schémas holarchiques. Plus elles s'élèvent dans la hiérarchie de la connaissance, plus

leur distribution est pulsée. Cela expliquerait la nature autosimilaire des métabolismes croissant en fonction de leur dimension (Allen, 1997, Batty et Longley, 1994, Sim et al, 2015). Tel que présenté dans la figure 4,2, la géométrie fractale permet de décrire ces pulsations hétérogènes sur un territoire en quantifiant la manière dont les holons sont distribués dans l'espace. C'est ce qui explique les mesures quantifiant la présence prépondérante des services publics dans le centre-ville de Lausanne.

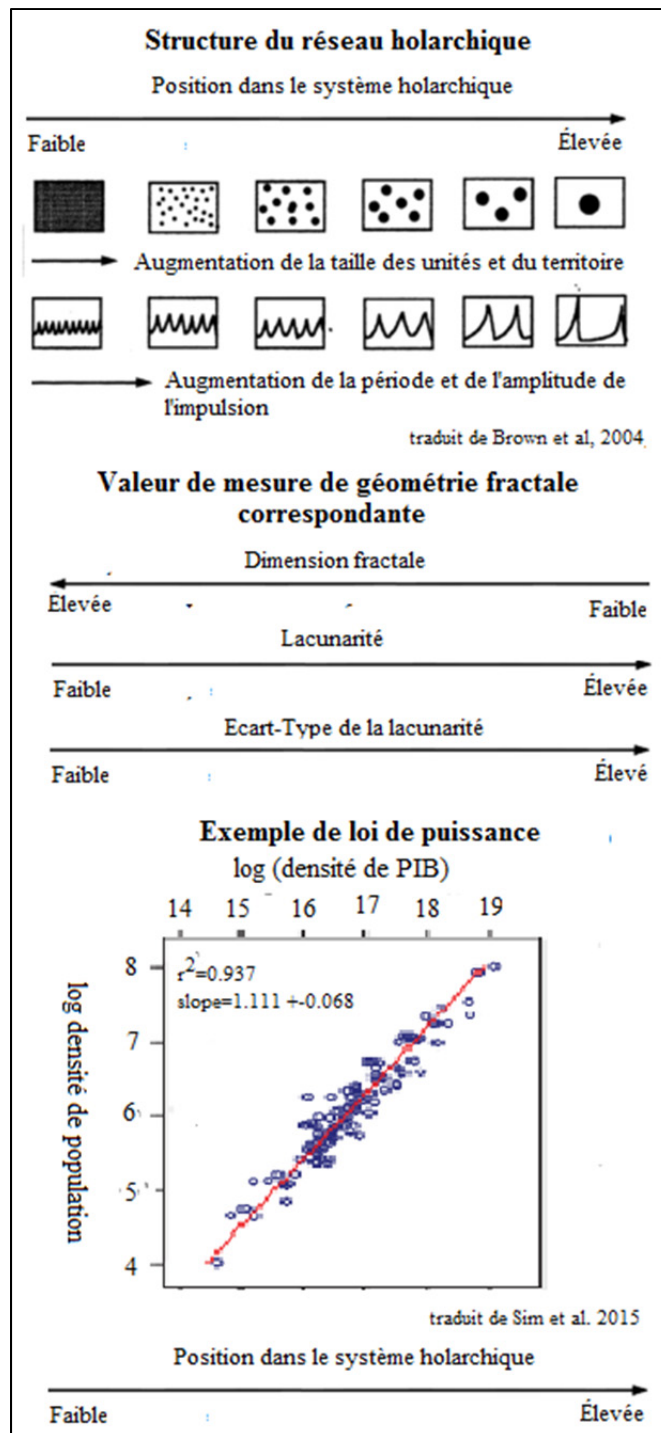


Figure 4.2: Relation entre structure holarchique, mesure de géométrie fractale et lois de puissances
Tirée de Brown et al (2004, p. 19) ainsi que Sim et al (2015, p. 6)

Pour être réalisable, la modélisation de ces processus doit incorporer certains modèles économiques qui incorporent les connaissances sur les comportements des humains et des organisations (Andrews, 2000). Les propriétés émergentes sont le fruit de règles simples qui créent beaucoup de complexité lorsqu'elles sont associées (Sander, 2008). Ainsi, avec la théorie des jeux, on pourrait trouver certaines configurations spatiales optimales en fonction des comportements de différents acteurs sur un territoire pour maximiser les possibilités d'échanges d'information, d'énergie et de matière résiduelles à une échelle donnée. Chaque point serait placé de manière à maximiser la complexité du système tout en créant un maximum de possibilité d'échange dans les structures hétérogènes. On tenterait ainsi de faire émerger des systèmes plus complexes qui créeraient des chaînes holarchiques plus efficaces ; cette maximisation des potentiels énergétiques et matériels est fonction des structures hétérogènes, décrites par des mesures fractales. Elle permet de mieux comprendre les schémas spatiaux des structures organisationnelles et les réseaux qui permettent de faire émerger des comportements plus responsables tels que les symbioses industrielles sur un territoire. Lorsque ces structures seront quantifiées, les infrastructures des systèmes industriels peuvent être optimisées de la même manière que l'ingénierie des écosystèmes optimise le développement des récifs artificiels dans la pratique. L'objectif est de trouver les valeurs de la dimension fractale et de la lacunarité de chacune des composantes du système qui maximise les possibilités d'échanges sociaux et économiques. Il sera alors possible de trouver comment agencer les différents acteurs sur un territoire pour créer le maximum de capital social et économique, tout en diminuant l'empreinte environnementale. La complexité du système urbain et industriel pourra être ainsi maximisée pour être plus soutenable. En combinant la géométrie fractale au processus technique, économique et social, l'aménagement du territoire prendrait ainsi une nouvelle dimension. Elle offrirait ainsi une possibilité d'action et d'optimisation des composantes structurelles des systèmes socio-économiques. Ces modèles pourraient ainsi quantifier l'interdépendance structurelle entre les artefacts individuels et les systèmes qui servent à les produire et les utiliser (Erkman, 2004). Ils pourraient aider à construire des cités plus efficaces en engendrant davantage de processus symbiotiques.

4.4 Gestion territoriale

Les villes encadrent les interactions entre les personnes, les lieux et l'environnement. Le paysage urbain encadre l'image mentale des différents acteurs du milieu. Les caractéristiques complexes des systèmes physiques, sociaux et biologiques permettent d'entrevoir de nouvelles techniques de conception et de gestion des systèmes urbains ; ils engendrent de nouvelles approches pour décrire les sociétés qui se forment, s'adaptent et évoluent face aux conditions changeantes. La différence de mesure entre les différentes formes urbaines et leurs impacts environnemental connus à l'échelle des quartiers. L'organisation des formes urbaines formées par les dynamiques sociales et techniques ont donc un impact sur la gestion de ces flux qui ont un impact environnemental. Les planificateurs urbains doivent donc guider les interactions positives et tenter de minimiser les boucles de rétroaction négative. Pour y arriver, ils doivent comprendre les dynamiques qui encouragent ses interactions et créer des dynamiques qui amplifient les dynamiques adaptatives des parties prenantes. Dans littérature, aucune approche quantitative autre que la densité n'a été abordé. Pourtant les planificateurs urbains doivent considérer la ville comme une manifestation de plusieurs processus co-évolutifs notamment entre la ville, ses habitants et l'environnement qui l'entoure (Neuman, 2005). Ce point mérite d'être relevé afin d'éviter toute confusion entre l'écologie industrielle et les nombreuses invocations à une vague vision holistique mêlant chaos, complexité et fractales (Erkman, 2004) Tel que démontré par les analyses de cas, les formes urbaines peuvent être utilisé pour évaluer l'état de la forme urbaine. Il s'agit donc d'un outil qui pourrait agir comme instrument de la gestion de la forme urbaine. La différence de mesure entre les différentes formes urbaines et leurs impacts environnemental connus à l'échelle des quartiers. L'organisation des formes urbaines formées par les dynamiques sociales et techniques ont donc un impact sur la gestion de ces flux qui ont un impact environnemental.

Cependant ces systèmes sont dynamiques et non statiques, les conditions ou l'état d'une ville ne peuvent être soutenables que pendant une période de temps défini. Les mesures de géométrie fractale ne doivent pas être utilisés uniquement pour remplacer les modèles euclidiens statiques. La ville doit donc être adaptative et avoir une méthode de gestion qui

peut être évolutive. L'application de la géométrie fractale à la dimension historique peut évaluer l'effet de certaines mesures sur le développement territorial. Elle permet de quantifier l'impact spatial de certaines décisions techniques ou politiques. Par exemple, l'analyse fractale peut quantifier l'impact architectural ou fonctionnel sur un territoire. Il s'agit donc d'un outil qui permet de mesurer l'effet de certaines politiques sur l'organisation humaine. L'étude de cas Montréalais a permis de soulever ces différences en montrant la prépondérance des espaces institutionnels dans la banlieue. Ces dynamiques favorisent certaines dynamiques d'étalement urbain. Il est désormais possible de quantifier les réseaux de holons qui forment ces dynamiques. L'exemple de la distribution ethnique de citoyens d'une ville indique d'ailleurs qu'elle peut également quantifier les distributions géographiques de certains phénomènes socio-économiques qui sont émergents (Wu et Sui, 2001). Il suffit de mesurer les territoires aux bonnes échelles pour comprendre, sur une base quantitative, les caractéristiques spatiales de certains territoires considérés. Une méthode empirique d'optimisation de la qualité des territoires peut être envisagée. Le paradigme changerait et l'organisation des holons dans les villes tenterait d'encadrer les interactions entre les personnes, les lieux et l'environnement. Les paysages urbains que ces mesures décriraient seraient complémentaires aux images mentales des différents acteurs du milieu.

La complexité émerge quand il y a une quantité croissante de variables indépendantes qui commencent à interagir de manière interdépendante et imprédictible. Le rôle des scientifiques dans un paradigme de systèmes complexes auto-organisés ouverts et holarchiques est d'apprécier certaines caractéristiques narratives, qualitatives et quantitatives de ces systèmes (Sander, 2008). Les valeurs issues de l'analyse fractale représentent des états contrairement aux méthodes de zonages euclidiens qui déterminent des positions géographiques exactes. Dans les études de cas, on peut décrire un état, mais jamais la position exacte des bâtiments. Les résultats ne permettent pas d'effectuer une planification chirurgicale, à l'échelle de la rue. Cette particularité permet d'intégrer différents systèmes holarchiques, sous forme de multiples dimensions qualitatives et quantitatives. Ces mesures permettent de faire une gestion scientifique du système urbain. En intégrant les résultats d'analyses empiriques et de modélisation, la géométrie fractale peut décrire l'hétérogénéité

des multiples dimensions qui forment la morphologie urbaine. Ils agissent en indicateurs quantitatifs simples qui permettent de comparer l'état actuel de la distribution des holons à une distribution théorique optimale. Suivant les principes guidant les systèmes complexes, il serait préférable de quantifier comment les fonctions urbaines occupent le territoire avec la géométrie fractale au lieu de planifier exactement où devraient être les fonctions d'usages sur un territoire. Des distributions d'hétérogénéité en fonction des conditions locales pourraient être ainsi être allouées. Les fonctions d'usages pourraient être alors développées à l'échelle de la rue, en respectant les dynamiques d'échelles locales des différents acteurs présents sur un territoire. Cette approche permettrait d'intégrer les connaissances des études des sous- systèmes urbains sur des bases quantitatives au processus plus global de la planification territoriale. Il s'agirait d'une manière d'encadrer la distribution de propriétés multifonctionnelles de certains lieux. Cette approche systémique permet d'intégrer de multiples dimensions qualitatives et quantitatives car elle n'alloue pas de lieux ou d'emplacement exact. Les gestionnaires des systèmes urbains pourraient combiner les connaissances vernaculaires et scientifiques d'un milieu de manière cohérente. Par exemple, il serait possible de favoriser certaines configurations locales, comme l'importance des activités commerciales sur les lieux avec des centralités importantes, tout en respectant les valeurs de dimension fractale et de lacunarité. Les modèles numériques et les études empiriques deviennent alors des outils d'aide à la décision et non des outils de planification. Les échelles d'études et les rôles des professions sont respectés en allouant aux citoyens, aux entrepreneurs, aux architectes ou aux ingénieurs le design de l'espace à leurs échelles. Le rôle du designer urbain est alors d'évaluer l'impact de leurs activités sur le système. Les valeurs de la géométrie fractale permettent alors de faire le lien entre les décisions effectuées à l'échelle individuelle et les autres échelles des différents systèmes qui forment les morphologies urbaines.

Il s'agit d'un mode de gestion évolutive plus efficace que la planification classique, car cette approche laisse place à une transformation étant donné que les lieux ne sont pas directement alloués. Il s'agirait de faire la gestion des états favorables et défavorables aux dynamiques étudiées en fonction des conditions environnementales des systèmes abiotiques, biologiques,

technologiques, sociales, etc. Une évolution des mesures permettrait ainsi de faire évoluer les paradigmes culturels en modifiant le monde physique dans lesquelles les parties prenantes pensent et d'en voir les possibilités. Le gestionnaire de système urbain a donc un rôle essentiel à jouer dans la transition écologique. L'écologie industrielle doit donc s'inspirer des précédents travaux en écologie du paysage. Les systèmes industriels, comme les écosystèmes, sont des systèmes thermodynamiques ouverts, qui produisent des flux qui augmentent la qualité énergétique dans des structures hiérarchiques auto-organisées (Kays, 2002). L'étude et la caractérisation des systèmes urbains et industriels peuvent donc améliorer la compréhension des différentes propriétés spatiales qui sont nécessaires à l'émergence de nouvelles propriétés telles que la soutenabilité. Des politiques de gestion et d'optimisations systémiques de l'organisation des systèmes industriels pourront ensuite être par la suite appliquées. Suivant l'analogie de l'écologie du paysage, ces études permettront de quantifier l'effet de l'augmentation de la complexité sur les systèmes sociotechniques à différentes échelles de grandeur. D'un point de vue pratique, la géométrie fractale permet de comprendre et d'optimiser les solutions qui sont applicables aux différents systèmes. La description de ces informations supporte l'émergence de comportement plus soutenable (Thomas et al, 2010).

La géométrie fractale pourrait être également appliquée à la gestion et au développement de symbioses industrielles. Les symbioses permettent de réduire l'impact environnemental des activités industrielles par une approche systémique. L'importance de la compréhension d'un territoire est un facteur de réussite dans le développement de symbioses industrielles (Chertow et Ehrenfeld, 2012). L'analyse fractale peut décrire la perspective géographique des symbioses pour caractériser ou modéliser la disposition spatiale des acteurs, des infrastructures et des flux. Les symbioses industrielles sont des processus qui proviennent des interactions locales entre les acteurs locaux. Ils ont besoin d'avoir l'information nécessaire pour qu'ils puissent être en mesure de conclure des transactions. La caractérisation des flux de matière et d'énergie avec la géométrie fractale pourrait donner aux différentes parties prenantes, les informations sur la densité et l'homogénéité des flux de matière et d'énergie sur un territoire. Ces flux ont des configurations complexes, car ils suivent les mêmes

géométries que les systèmes urbains (Zhang, 2013). Les gisements industriels et urbains, issus des processus de consommation et de production pourraient donc être caractérisés sur une base quantitative. Par exemple, un commerçant ou un industriel qui désire vendre ou acheter des matières résiduelles pourrait utiliser les analyses métaboliques des entreprises sur un territoire pour discriminer différents systèmes locaux. Il aurait ainsi la possibilité de choisir un environnement qui lui assurerait une densité et homogénéité en ressource qui correspond le mieux à ses besoins. L'acteur du système industriel retrouverait les informations nécessaires pour qu'il s'installe dans sa niche industrielle qui lui convient le mieux. Il s'agit d'une mesure complémentaire aux études de flux de matière et d'énergie pour de qualifier et quantifier les flux disponibles dans un système industriel. L'analyse fractale deviendrait alors une mesure quantitative amalgamant les différentes informations disponibles sur un territoire. Ces informations pourraient faire partie des différentes boucles de rétroaction qui dirigent les marchés pour créer de nouvelles symbioses industrielles.

Actuellement, les matériaux sont recueillis par des collectes collectives qui réunissent et centralisent une multitude de matériaux en grandes catégories (Erkman, 2004). Or, les approches de conception et de gestion centralisées ne sont pas adaptées aux systèmes complexes (Chertow & Ehrenfeld, 2012, Hook, 2011). Dans le cas du recyclage, le décyclage en est un symptôme. Les matériaux de haute qualité sont amalgamés à des produits de basse qualité, il y a une perte économique et énergétique considérable. La qualité des produits est nivelée à la baisse par les processus centralisateurs, et ce, malgré l'apparition de procédés automatisés des processus de tri. La possibilité d'utiliser la géométrie fractale pour quantifier les gisements urbains se base sur des réalités économiques existantes. Ainsi, dans l'industrie extractive des métaux, il y a une la corrélation entre les prix des métaux et leur dilution. Cela indique que l'écologie industrielle a trouvé un facteur de prix qui pourrait influencer l'attrait du recyclage (Harper et Graedel, 2004). Hors, la dimension fractale et la lacunarité sont des indicateurs de densité et d'homogénéité et donc de possibles indicateurs de dilution des ressources dans les systèmes. En fonction de l'homogénéité et de la qualité des ressources disponibles, les entreprises pourraient être recrutées pour participer à une niche particulière due à leurs *inputs* et *outputs*. En donnant l'information sur la qualité des gisements urbains, il

serait alors possible de créer des marchés régionaux et locaux en fonction des flux de matière et d'énergie disponibles dans le système. Le recyclage s'effectuerait à la source, en fonction de la qualité des gisements, en suivant les processus qui guident les symbioses industrielles. La valeur réelle des matériaux résiduelle pourrait alors être exploitée à leur pleine valeur économique, car on prendrait leur qualité en compte. Les flux seraient cartographiés sur des plans matriciels et seraient ensuite évalués avec la géométrie fractale. Il serait alors possible d'importer ces données dans des modèles de collecte pour minimiser les coûts.

Une approche incluant la géométrie fractale pourrait donc permettre de comprendre la configuration spatiale des réseaux de transformations d'énergie et donc également les flux matériels et d'informations. Elle permet de décrire les formes qu'engendrent les séries hiérarchiques qui expliquent les capacités d'énergie disponibles pour effectuer du travail. Ces hiérarchies incluent les chaînes alimentaires, l'organisation spatiale des centres urbains, la hiérarchisation de la concentration des matériaux, l'augmentation de la concentration avec l'échelle et la relation inverse des fréquences et des intensités des ondes pulsées (Odum, 2007). La géométrie fractale permettrait donc de décrire et de gérer chacun de ces sous-systèmes qui forment les morphologies urbaines. En mesurant, optimisant et dirigeant chacun de ces sous-systèmes par une gestion spatiale des multiples attracteurs, il sera alors possible de créer un tout, plus grand que la somme de ses parties, plus intégré avec son environnement.

CONCLUSION

Par leur rôle économique et par leur importance démographique, les zones urbaines sont responsables du dépassement des limites d'exploitation renouvelables des différents systèmes biophysiques terrestres. Pour réduire leur impact environnemental, les villes doivent prendre en considération l'ensemble des flux matériels et énergétiques qu'elles consomment et génèrent. Ces flux sont organisés sous forme des structures holarchiques, composées de holons possédants chacun des métabolismes individuels dépendant de leurs liens aux holons des échelles supérieures et inférieures. Pour les systèmes urbains, les holons sont l'ensemble des composantes économiques qui supportent les villes. La géométrie fractale a donc été appliquée à différentes études de cas pour étudier sa capacité à décrire l'organisation spatiale de ces holons dans les formes urbaines. Les mesures de géométrie fractale sur les cartes réglementaires de zonage montréalaises et vaudoises ont permis de valider la capacité de la dimension fractale et de la lacunarité à décrire la densité, les échelles et l'homogénéité des structures urbaines. La géométrie fractale peut décrire l'empreinte spatiale des composantes locales des systèmes urbains. Elle discrimine différents paysages urbains sur plusieurs territoires. La géométrie fractale peut donc décrire la distribution des holons sur un territoire. Elle peut mesurer leurs organisations notamment autour de différents systèmes sociotechniques

L'étude de cas montréalaise a démontré que l'analyse fractale peut quantifier la géométrie non euclidienne des structures spatiales qui forment les structures urbaines. Les valeurs numériques représentent, par une triangulation de la dimension fractale, de la lacunarité et de son écart type, l'état spatial de la distribution des fonctions urbaines sur les territoires. Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension est donc généralement plus dense et hétérogène que les structures spatiales de l'arrondissement Rivière-Des-Prairies-Pointes-aux-Trembles. Les mesures d'hétérogénéité des fonctions urbaines sur les territoires permettent de quantifier et d'identifier, différentes formes urbaines qui forment des niches aux impacts environnementaux différents. Elles permettent donc d'évaluer l'hétérogénéité des quartiers et mesurer les carences dans la composition des formes urbaines. Par exemple, il est possible

d'évaluer à l'aide de mesures quantitatives l'impact de projets de développement urbain sur la densité et la distribution des fonctions urbaines sur un territoire.

L'analyse spatiale des règlements d'aménagement suisses sur quatre communes a identifié différentes compositions urbaines dans l'agglomération lausannoise. Ils ont permis de mesurer les différences morphologiques entre la périphérie et le centre de l'agglomération lausannoise. L'amalgame des mesures de géométrie fractale des mesures de transport a permis de mettre en évidence, les relations qui existaient entre la sphère sociotechnique et la morphologie urbaine. Les moyens de transport utilisés sur un même territoire forment des boucles de rétroactions avec les formes urbaines locales. Les activités sont plus ségréguées et la lacunarité est plus élevée lorsque les moyens de transport sont plus énergivores. Il y a donc des niches sociotechniques, qui sont associées à certaines morphologies urbaines. L'échelle de la distribution des zones d'affectation et leur ségrégation est plus élevée dans les endroits qui dépendent de moyens de transport automobiles. Les zones qui offrent une connectivité plus grande ont des valeurs numériques de lacunarité plus faibles. Elles sont organisées à de plus petites échelles et les usages mixtes du territoire occupent un territoire important. Cela indique que la géométrie fractale peut être utilisée pour quantifier les relations entre les formes urbaines les systèmes de transport. Les mesures quantitatives permettent donc d'évaluer et d'éventuellement d'optimiser ces relations pour réduire l'impact des activités humaines sur l'environnement. L'objectif sera alors de créer des niches urbaines qui engendrent des découplages matériels et énergétiques en organisant les parties prenantes de manière optimale sur un territoire. Des études supplémentaires sont toutefois nécessaires pour identifier les différentes organisations spatiales optimales en fonction de dimensions sociotechniques prédéterminées.

Pour valider la précision des résultats de la mesure de la dimension fractale sur des formes urbaines, une analyse de sensibilité a testé trois causes d'erreur possible : l'angle des composantes mesurées, la forme géométrique utilisée et le choix des dimensions limites des boîtes à utiliser pour calculer la dimension fractale moyenne. La valeur moyenne de la dimension fractale n'a pas varié de manière significative lorsque l'angle des composantes ou

la forme des composantes a été altéré. La principale difficulté rencontrée avec les analyses issues de la géométrie fractale réside dans la nature empirique des dimensions de boîtes limites utilisées. Ils limitent la capacité de comparer des études effectuées par différents chercheurs. Une méthodologie empirique avec un processus standardisé permet de calibrer les mesures et augmenter la reproductibilité des expérimentations. Il a été proposé d'effectuer les mesures avant de choisir les ordres de grandeur utilisés. Ainsi, les choix des dimensions de boîtes utilisés pour calculer la dimension fractale sont fonction des structures mesurées. Cette méthodologie maximise la précision des résultats. Des analyses supplémentaires des différentes méthodes de calcul de la dimension fractale et de la lacunarité demeurent indispensables pour créer des standards de mesure et d'analyse. Une analyse de sensibilité des mesures de lacunarité est également nécessaire pour effectuer des analyses plus poussées pour mitiger l'impact du edge effect avec la méthode mathématique utilisée.

D'un point de vue théorique, la géométrie fractale permet de quantifier les systèmes complexes en mesurant la dimension d'hétérogénéité des composantes d'un système sur un axe spatial. Sa nature matricielle permet de mesurer un ensemble d'indicateurs sur un territoire. Elle peut, entre autres, être appliquée à organiser les composantes des métabolismes urbains. Les systèmes complexes et thermodynamiques répondent aux conditions dans lesquels ils évoluent; leur nature, leur consommation et leur comportement sont donc directement affectés par la nature physique des infrastructures qui les supportent. La gestion des réseaux holarchiques est donc un élément clé de la transition vers une diminution des impacts environnementaux.

D'un point de vue pratique, la géométrie fractale pourrait être utilisée pour appliquer et gérer les modèles organisationnels prônés par les symbioses industrielles, le nouvel urbanisme et l'écologie urbaine. Ils engendrent ces types de découplages et modifiant les liens entrent les acteurs et donc les holons d'un territoire. Ces approches reposent sur la création de propriétés émergentes telle que le capital social et sur la gestion spatiale des composantes du système. À l'instar des écosystèmes naturels qui reposent également sur des systèmes holarchiques, les gestionnaires des systèmes urbains tentent décroisonner les usages, notamment en augmentant la diversité fonctionnelle. La gestion de cette diversité à l'aide de la géométrie

fractale pourrait s'avérer un élément clé. Suivant les méthodes utilisées en écologie, l'application de la géométrie fractale pourrait élucider, en partie, les effets quantitatifs de l'évolution des systèmes humains et naturels. On pourra alors connaître les configurations qui feront émerger de nouvelles propriétés aux systèmes urbains et industriels

La géométrie fractale peut mesurer et optimiser l'organisation spatiale des acteurs économique. Elle se pose donc comme méthode complémentaire aux techniques de zonage dites euclidiennes qui ont été développées pour planifier la ville et ségréguer les usages. Contrairement à ces méthodes qui imposent des normes réglementaires précises sur la localisation des usages et les formes urbaines, la géométrie fractale mesure l'état du système. Elle permet de mesurer la cohésion entre les échelles, en laissant de la place à une optimisation locale des formes urbaines et en quantifiant leur impact sur le système. Cette technique augmente ainsi la capacité du système à évoluer vers une plus grande hétérogénéité. Par exemple, cela pourrait permettre aux pratiques de symbioses industrielles de s'établir hors des écoparcs industriels locaux, car la géométrie fractale peut mesurer l'organisation spatiale des métabolismes dans les formes urbaines. Une optimisation de l'hétérogénéité couplée à des analyses de flux de matière et d'énergie elles pourraient coordonner les différents acteurs locaux afin de créer d'avantages de symbioses sur un territoire. Idéalement, il serait ultimement possible de coupler les systèmes holarchiques humains aux systèmes naturels en organisant la distribution des multiples holons humains et naturels sur un territoire, notamment à l'aide de l'écologie urbaine. En coordonnant la distribution des holons et ainsi de la configuration des activités industrielles, les zones urbaines réintégreraient les limites physiques des territoires qui les supportent en s'intégrant aux réseaux holarchiques des systèmes naturels. Les activités humaines deviendraient ainsi plus intégrées aux cycles naturels, et les processus dissipatifs des villes se coupleraient aux services écosystémiques des territoires qui les supportent. Cela réduirait l'impact global des villes et donc celles de l'humanité sur les systèmes naturels.

ANNEXE I

CARTE DES RÈGLEMENTS D'URBANISME UTILISÉS DE L'ARRONDISSEMENT VILLERAY-SAINT-MICHEL-PARC-EXTENSION



Figure-A I-1 Carte du Règlement d'urbanisme de l'arrondissement
Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension

ANNEXE II

CARTE DES RÈGLEMENTS D'URBANISME UTILISÉS DE L'ARRONDISSEMENT RIVIÈRE-DES-PRAIRIES-POINTES-AUX-TREMBLES

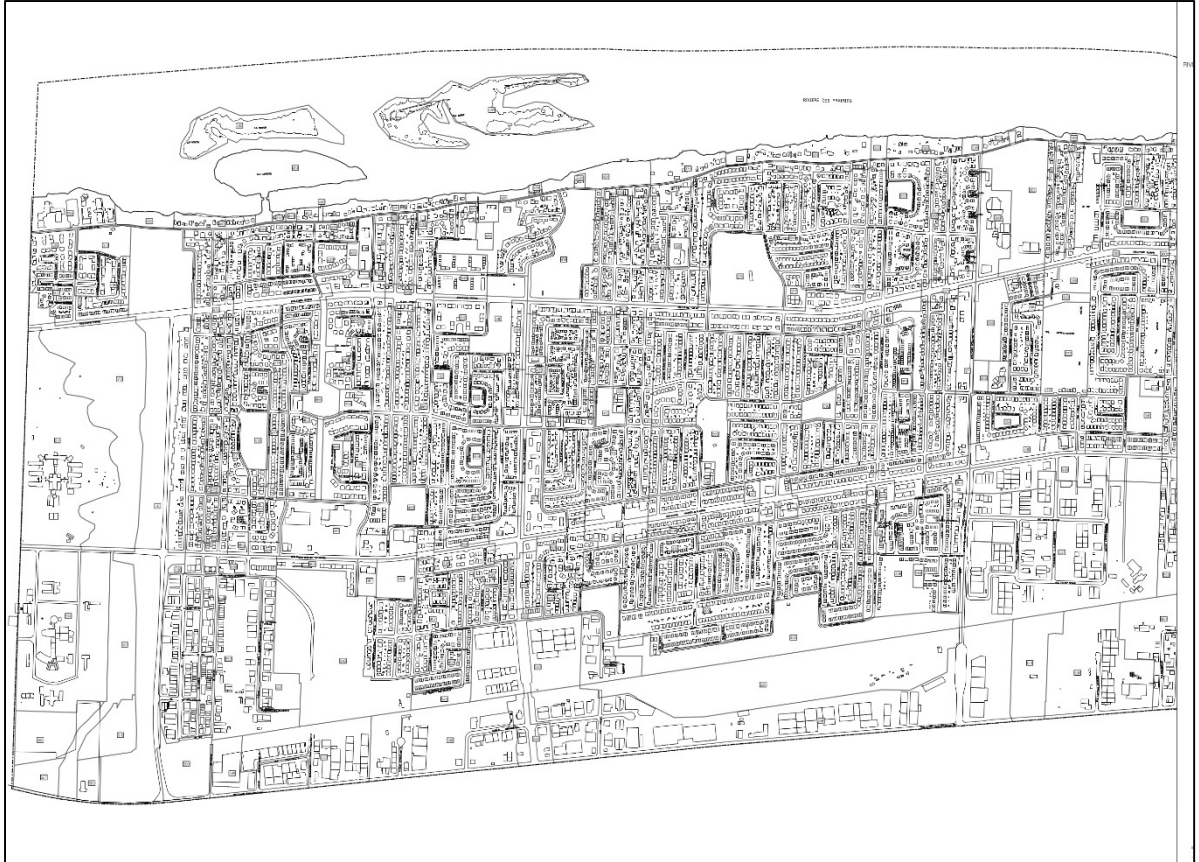


Figure-A II-1 Carte du Règlement d'urbanisme de
Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles

ANNEXE III

CARTES DES CATÉGORIES D'USAGES SÉGRÉGUÉES DE L'ARRONDISSEMENT VILLERAY-SAINT-MICHEL-PARC-EXTENSION

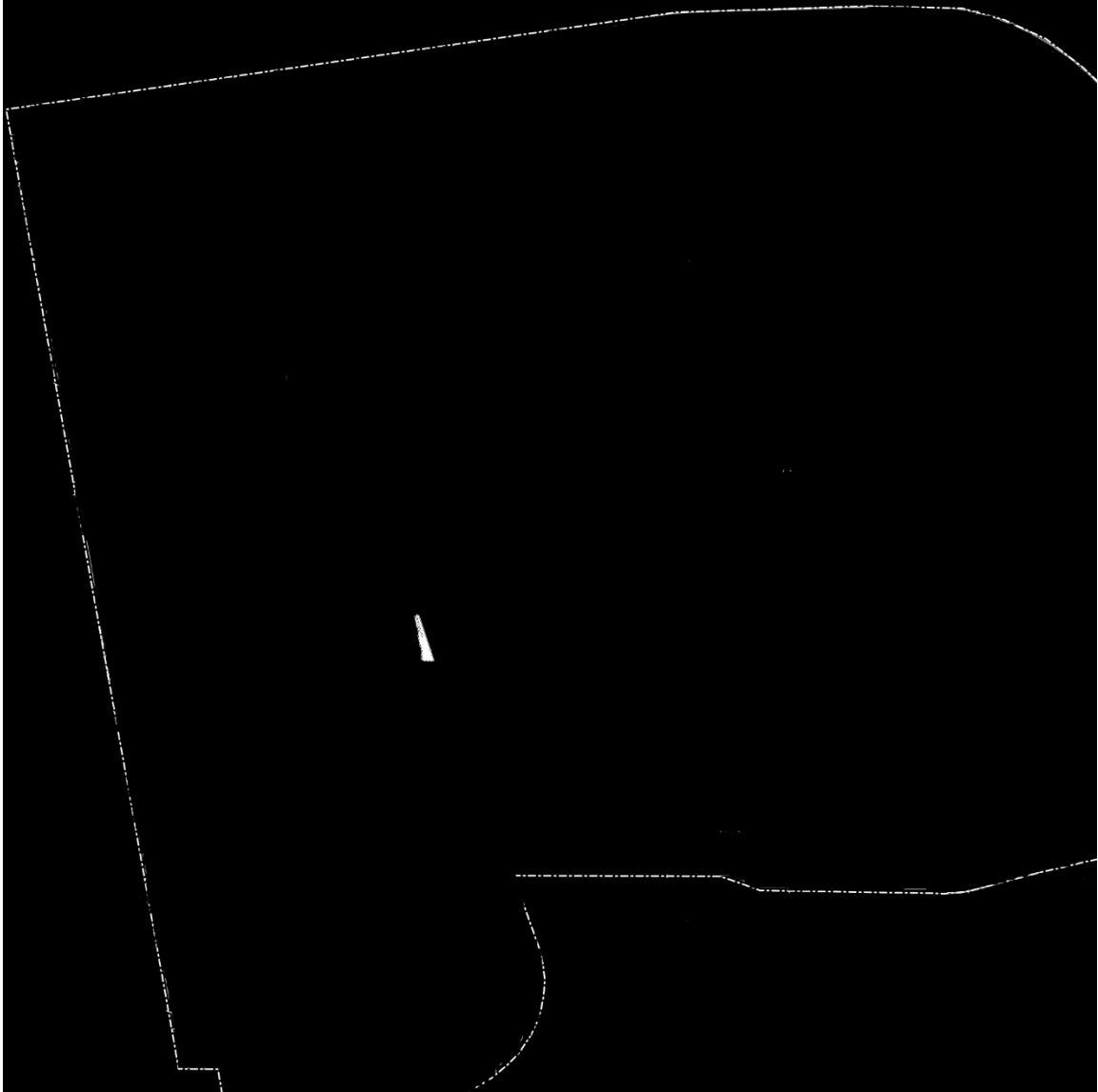


Figure-A III-1 Catégorie d'usage commerciale et institutionnelle dans
Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension



Figure-A III-2 Catégorie d'usage commerciale dans
Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension

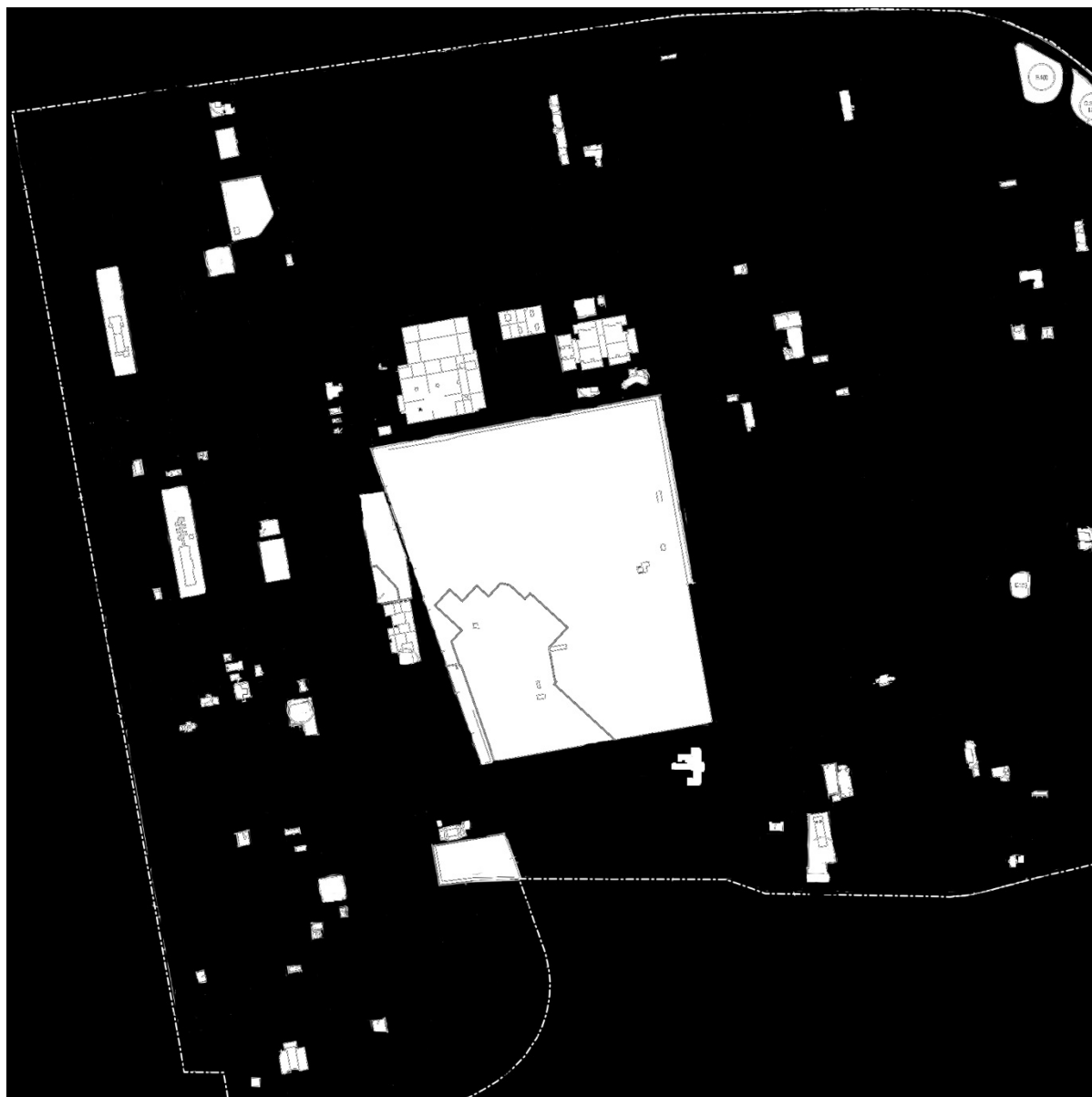


Figure-A III-3 Catégorie d'usage institutionnelle dans
Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension

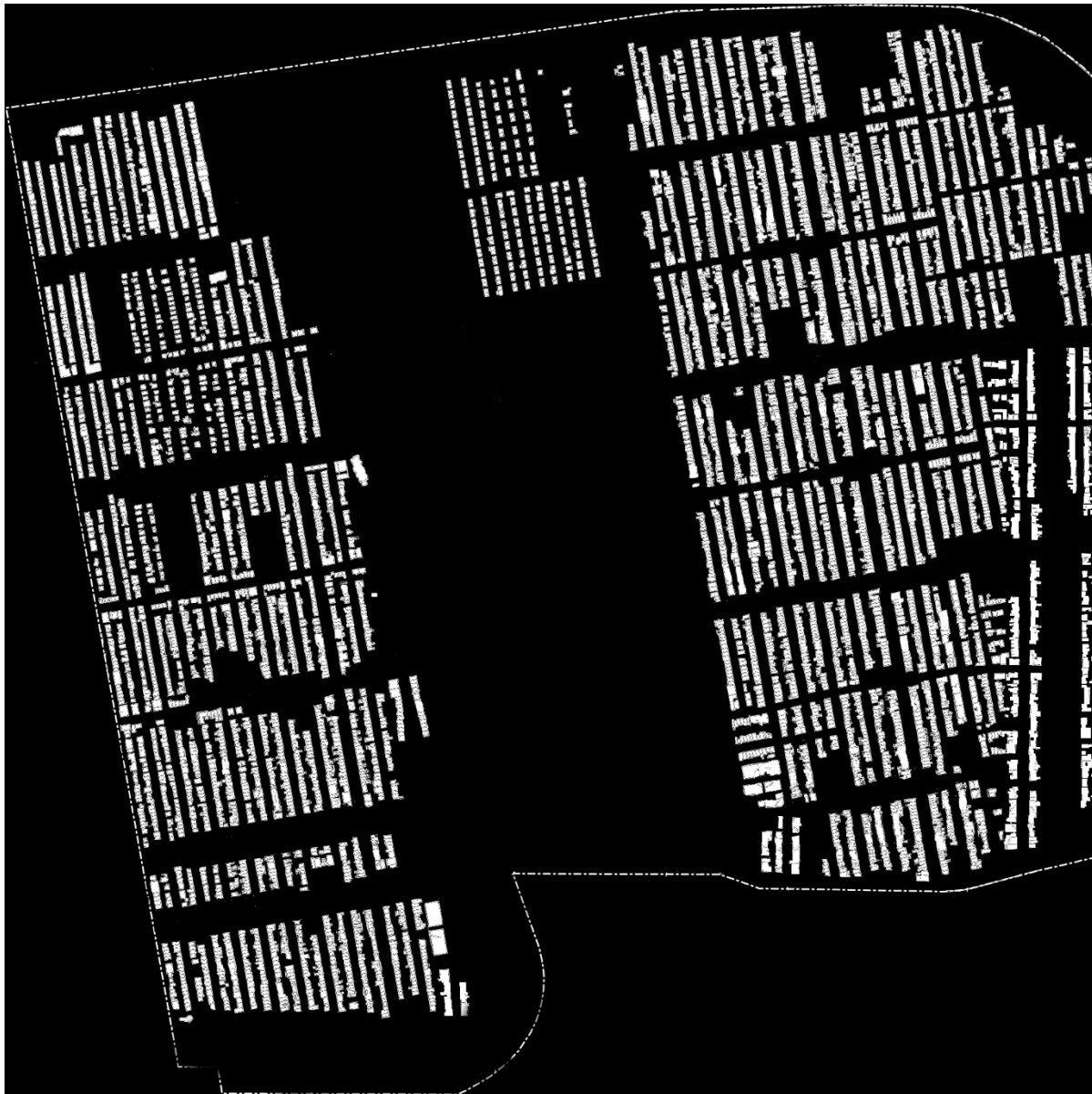


Figure-A III-4 Catégorie d'usage résidentielle dans
Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension



Figure-A III-5 Catégorie d'usage commerciale et industrielle dans
Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension

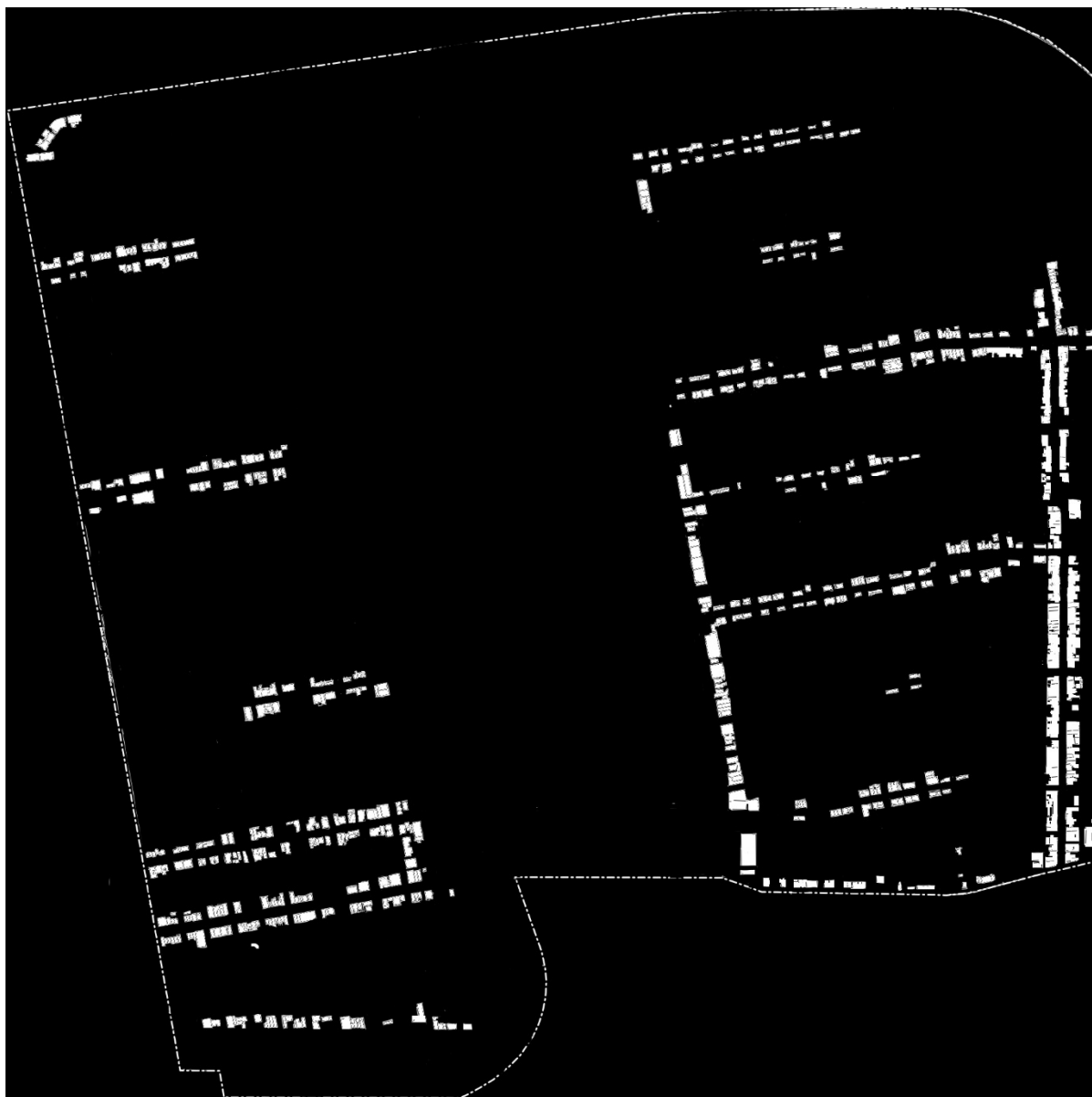


Figure-A III-6 Catégorie d'usage commerciale et résidentielle dans
Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension

ANNEXE IV

CARTES DES CATÉGORIES D'USAGES SÉGRÉGUÉES DE L'ARRONDISSEMENT RIVIÈRE-DES-PAIRIES-POINTES-AUX-TREMBLES

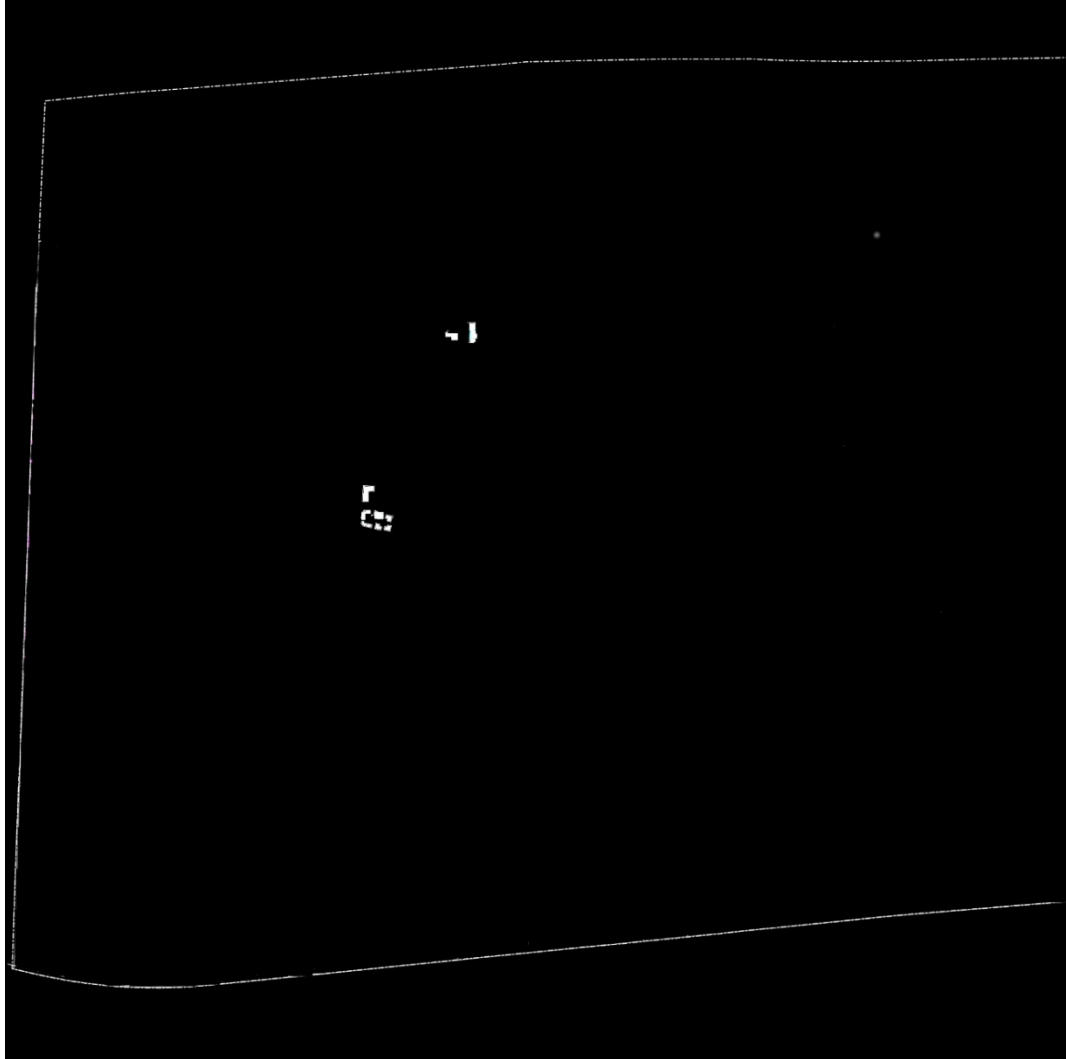


Figure-A IV-1 Catégorie d'usage commerciale et résidentielle dans
Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles

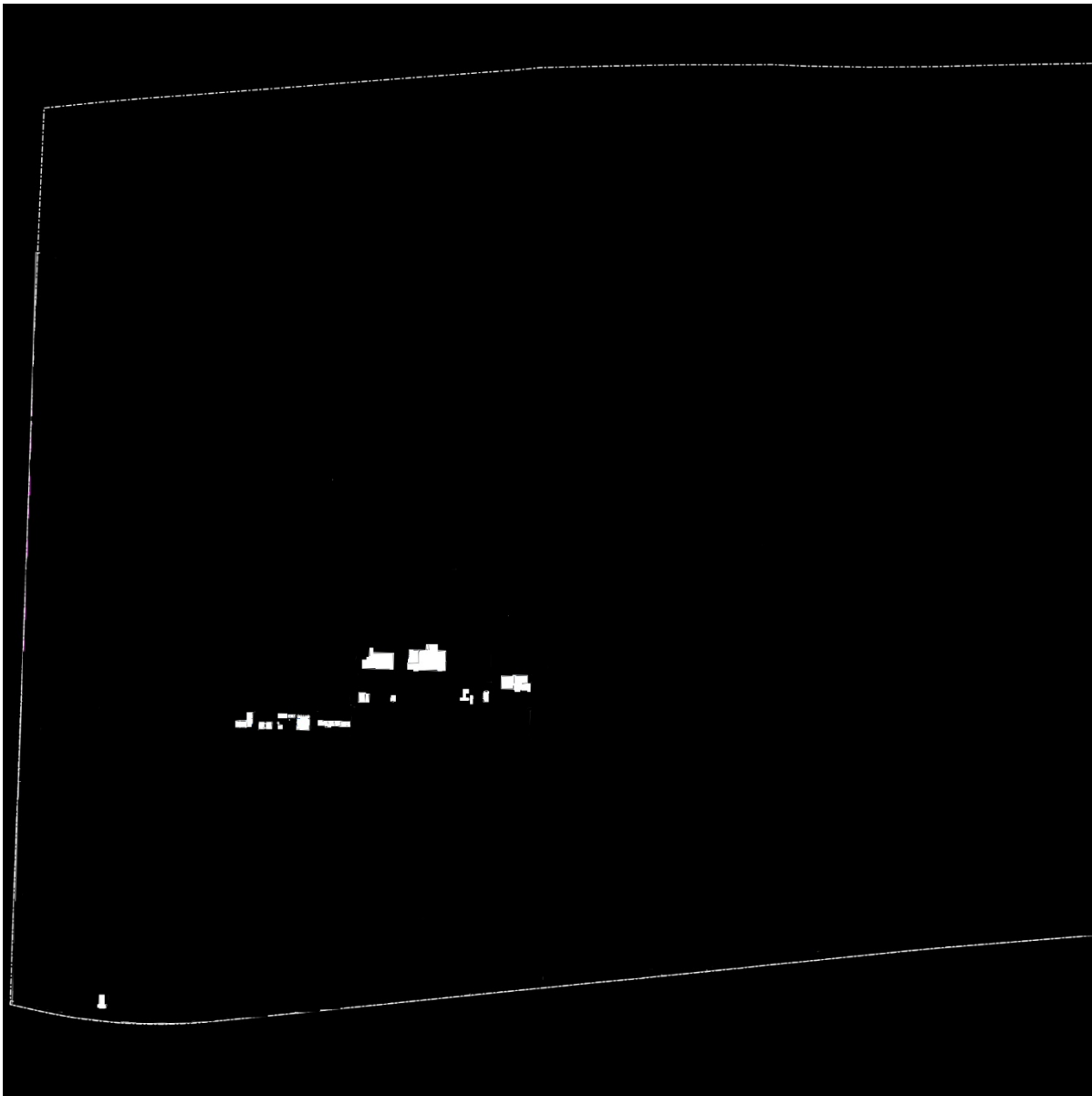


Figure-A IV-2 Catégorie d'usage commerciale dans
Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles

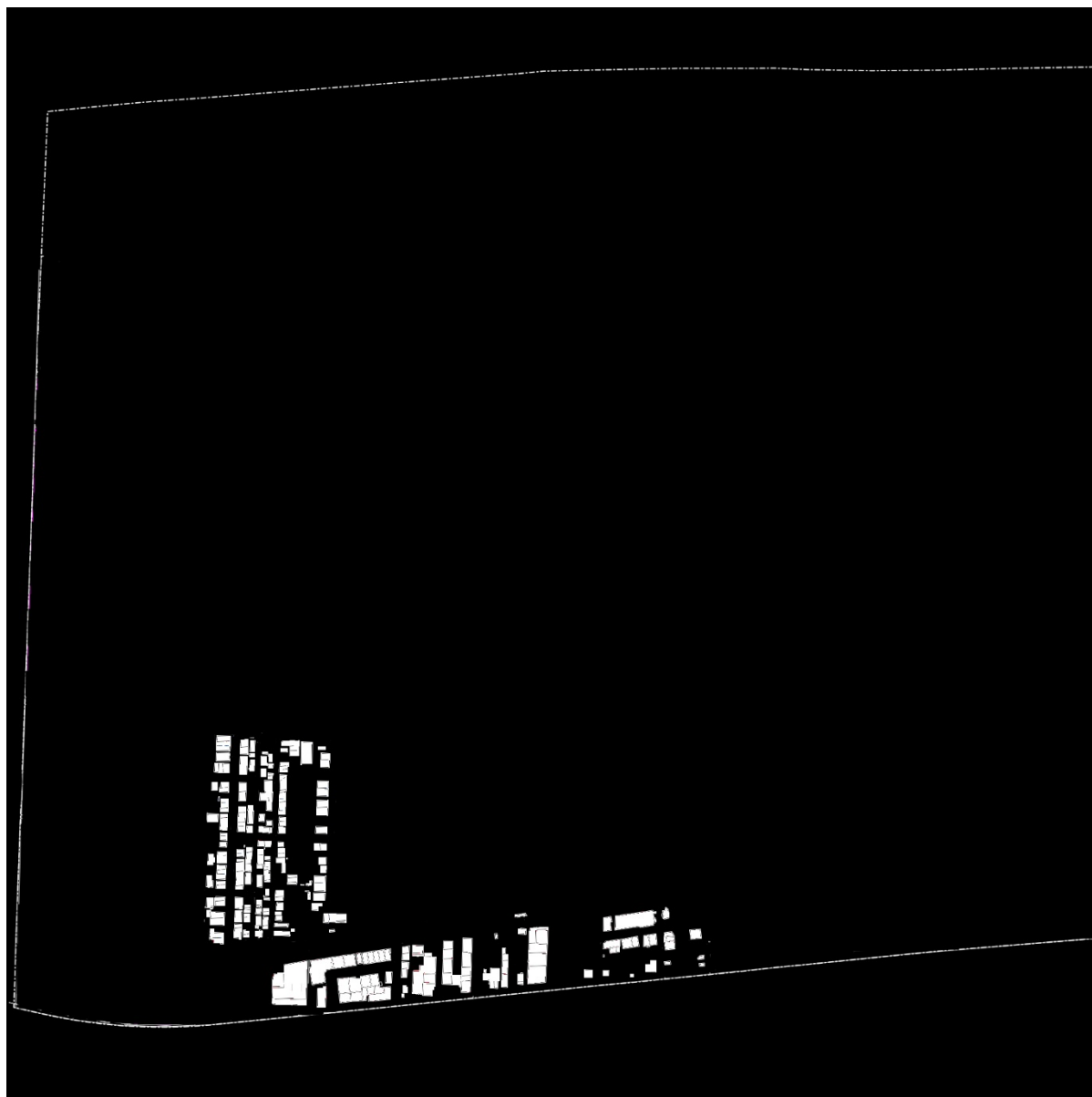


Figure-A IV-3 Catégorie d'usage commerciale et industrielle dans
Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles

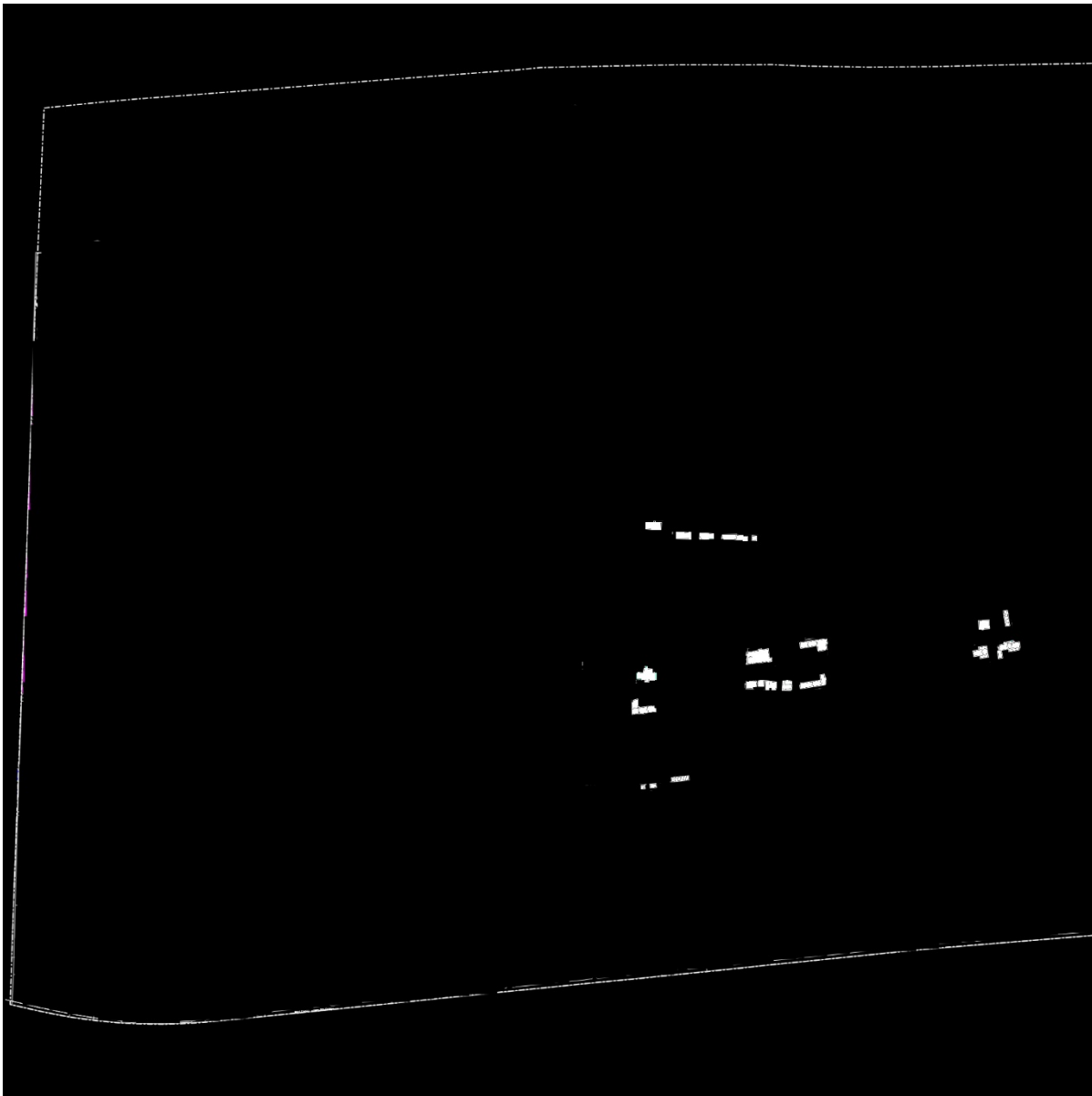


Figure-A IV-4 Catégorie d'usage commerciale et institutionnelle dans
Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles

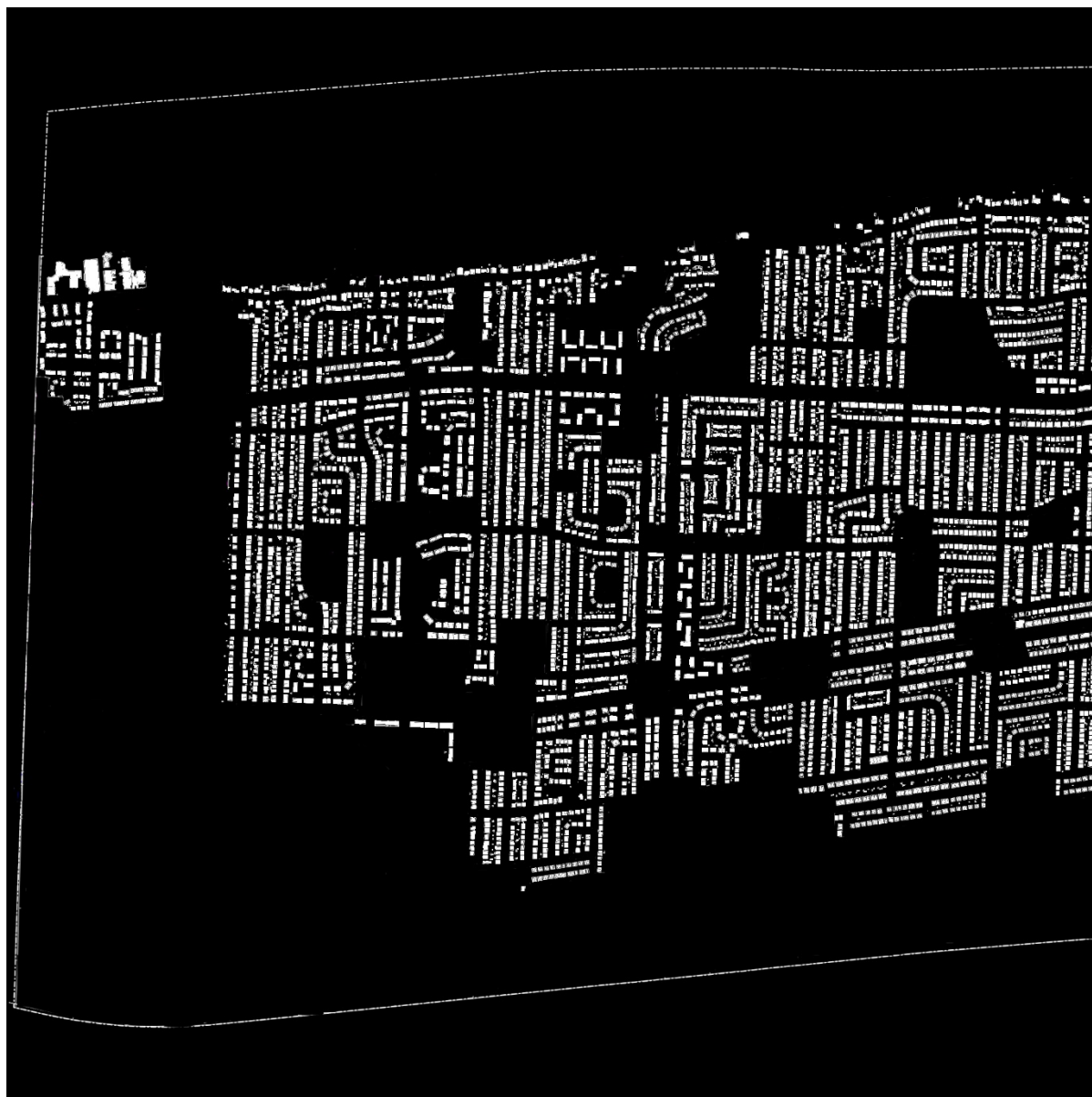


Figure-A IV-5 Catégorie d'usage résidentiel dans
Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles

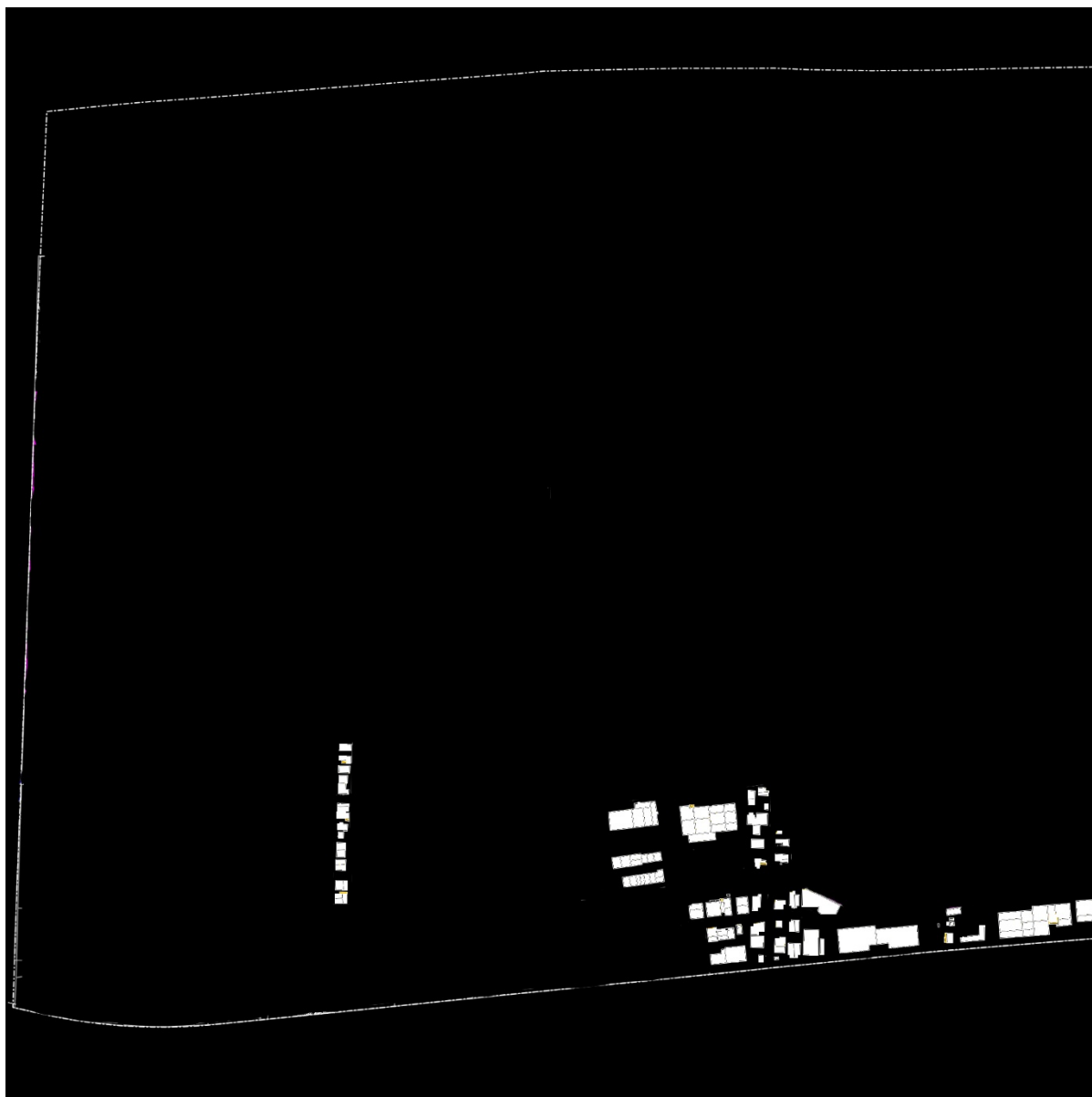


Figure-A IV-6 Catégorie d'usage industrielle dans
Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles

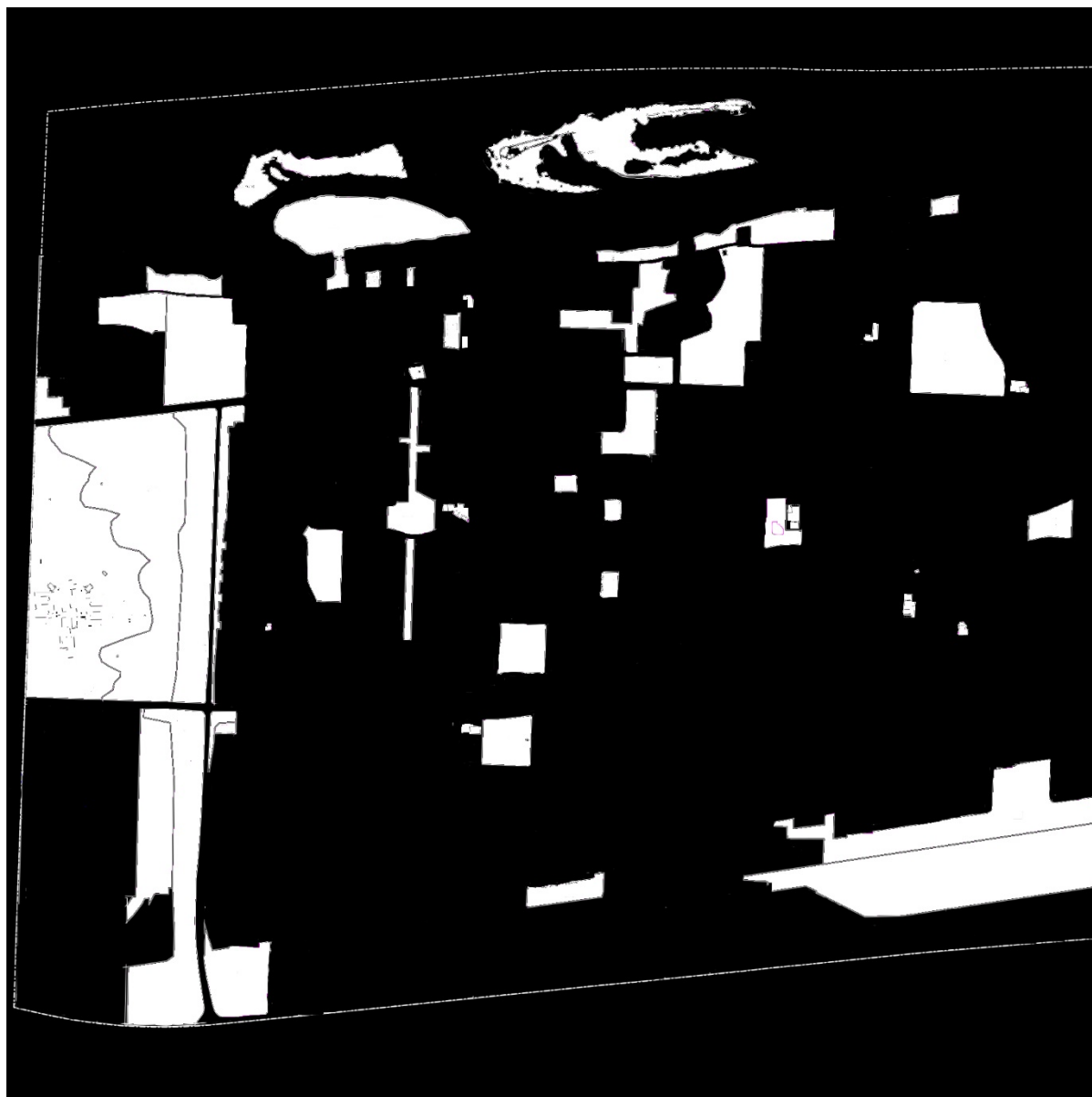


Figure-A IV-7 Catégorie d'usage institutionnelle dans
Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Trembles

ANNEXE V

LÉGENDE DÉCRIVANT LES ZONES D'AFFECTATIONS



Figure-A V-1 Légende du code de couleur des zones d'affectation suisses
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

ANNEXE VI

CARTE DES ZONES D'AFFECTATIONS DE LA ZONE SÉLECTIONNÉE À LAUSANNE



Figure-A VI-1 Carte des zones d'affectation Lausanne
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

ANNEXE VII

CARTE DES ZONES D'AFFECTATIONS DE LA ZONE SÉLECTIONNÉE À ECUBLENS

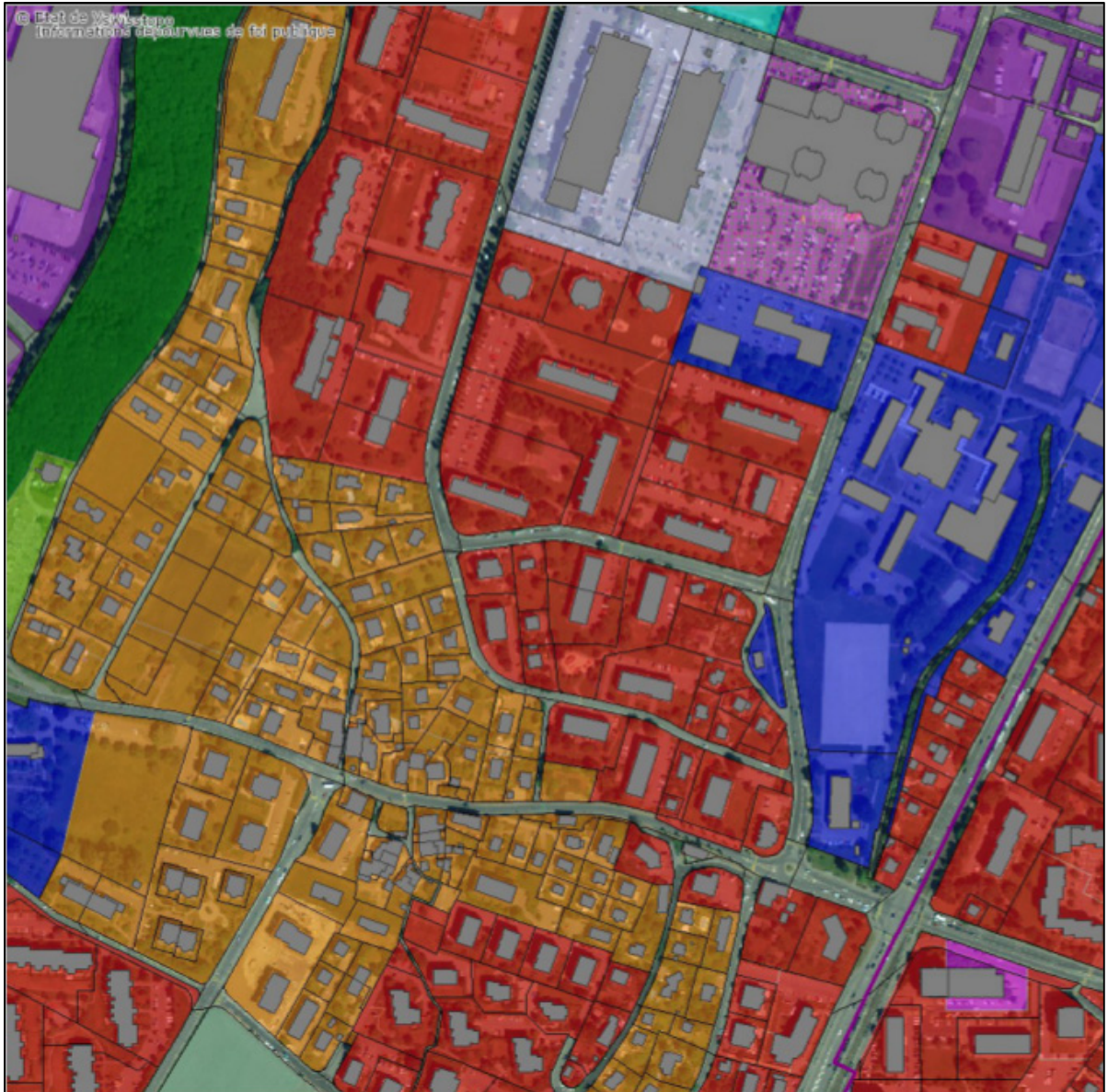


Figure-A VII-1 Carte des zones d'affectation d'Ecublens
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

ANNEXE VIII

CARTE DES ZONES D'AFFECTATIONS DE LA ZONE SÉLECTIONNÉE À JOUTEN-MÉZÉRY



Figure-A VIII-1 Carte des zones d'affectation de Jouxten-Mézéry
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

ANNEXE IX

CARTE DES ZONES D'AFFECTATIONS DE LA ZONE SÉLECTIONNÉE À CRISSIER



Figure-A IX-1 Carte des zones d'affectation de Crissier
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

ANNEXE X

CARTES DES ZONES D'AFFECTATIONS SÉGRÉGUÉES DE LAUSANNE



Figure-A X-1 Zone d'affectation mixte haute densité à Lausanne
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)



Figure-A X-2 Zone d'affectation industrielle à Lausanne
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

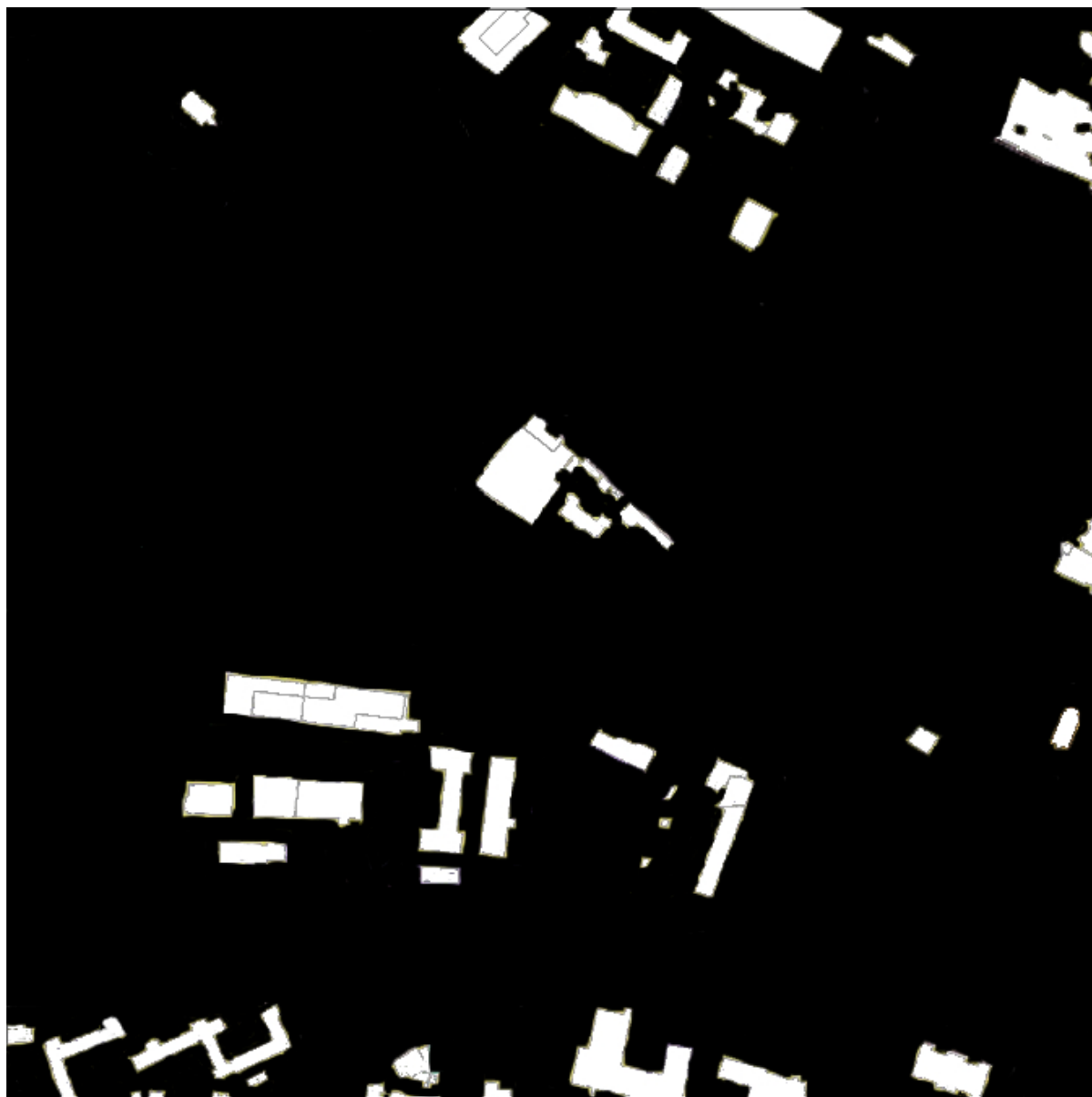


Figure-A X-3 Zone d'affectation d'installations parapubliques à Lausanne
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

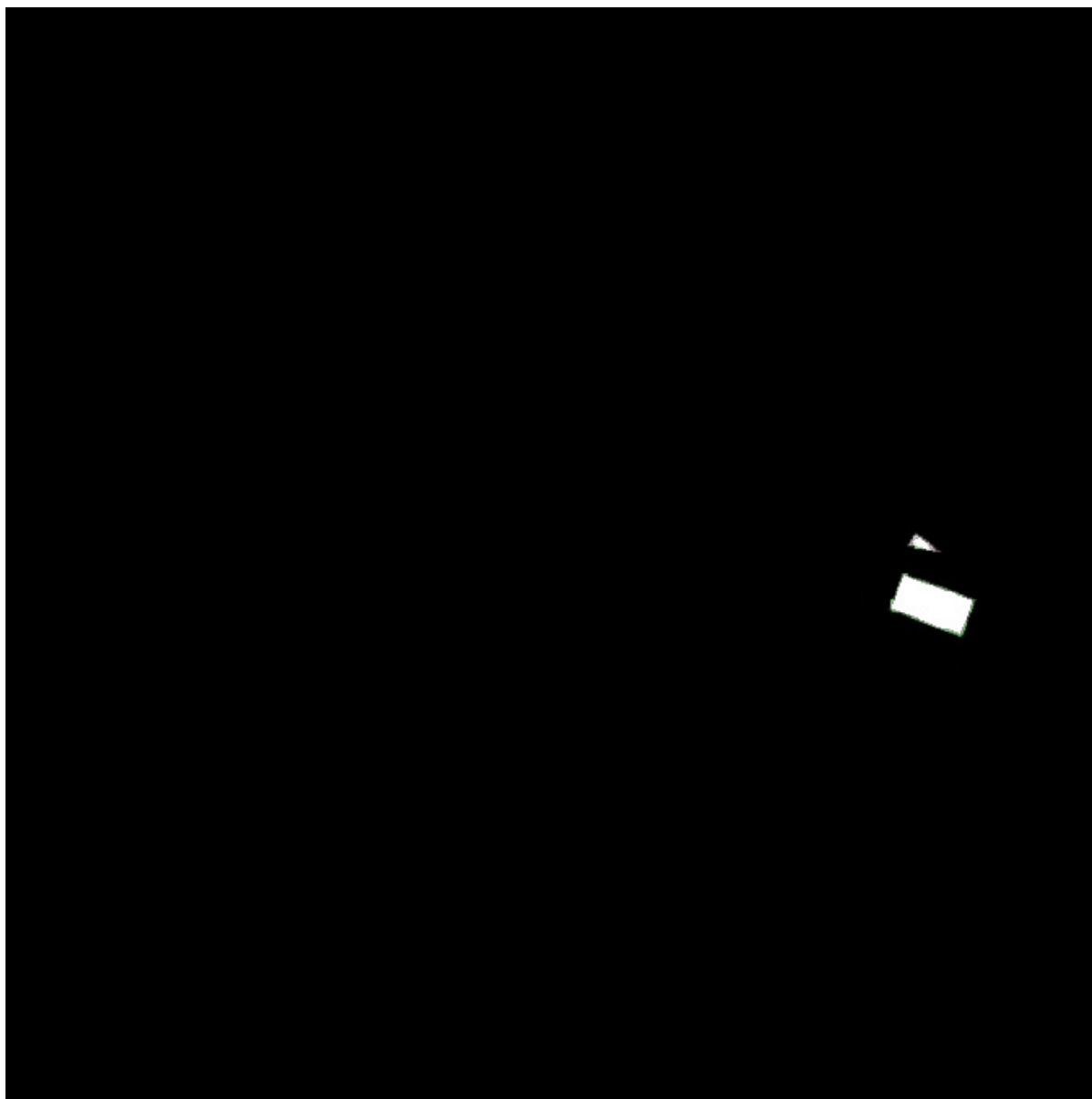


Figure-A X-4 Zone d'affectation tertiaire à Lausanne
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)



Figure-A X-5 Zone d'affectation zone de verdure et forêt à Lausanne
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

ANNEXE XI

CARTES DES ZONES D'AFFECTATIONS SÉGRÉGUÉES D'ÉCUBLENS

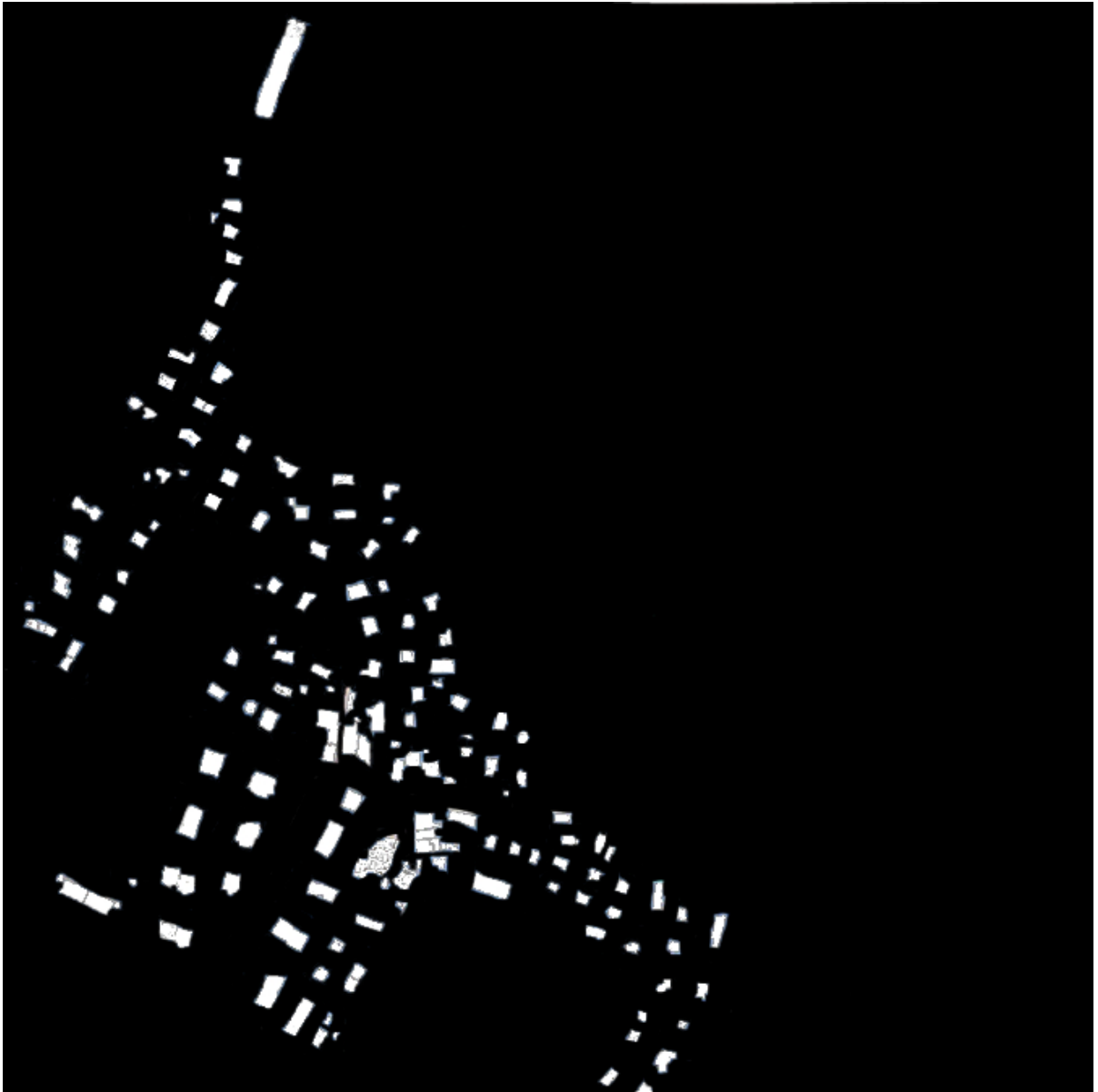


Figure-A XI-1 Zone d'affectation mixte faible densité à Ecublens
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

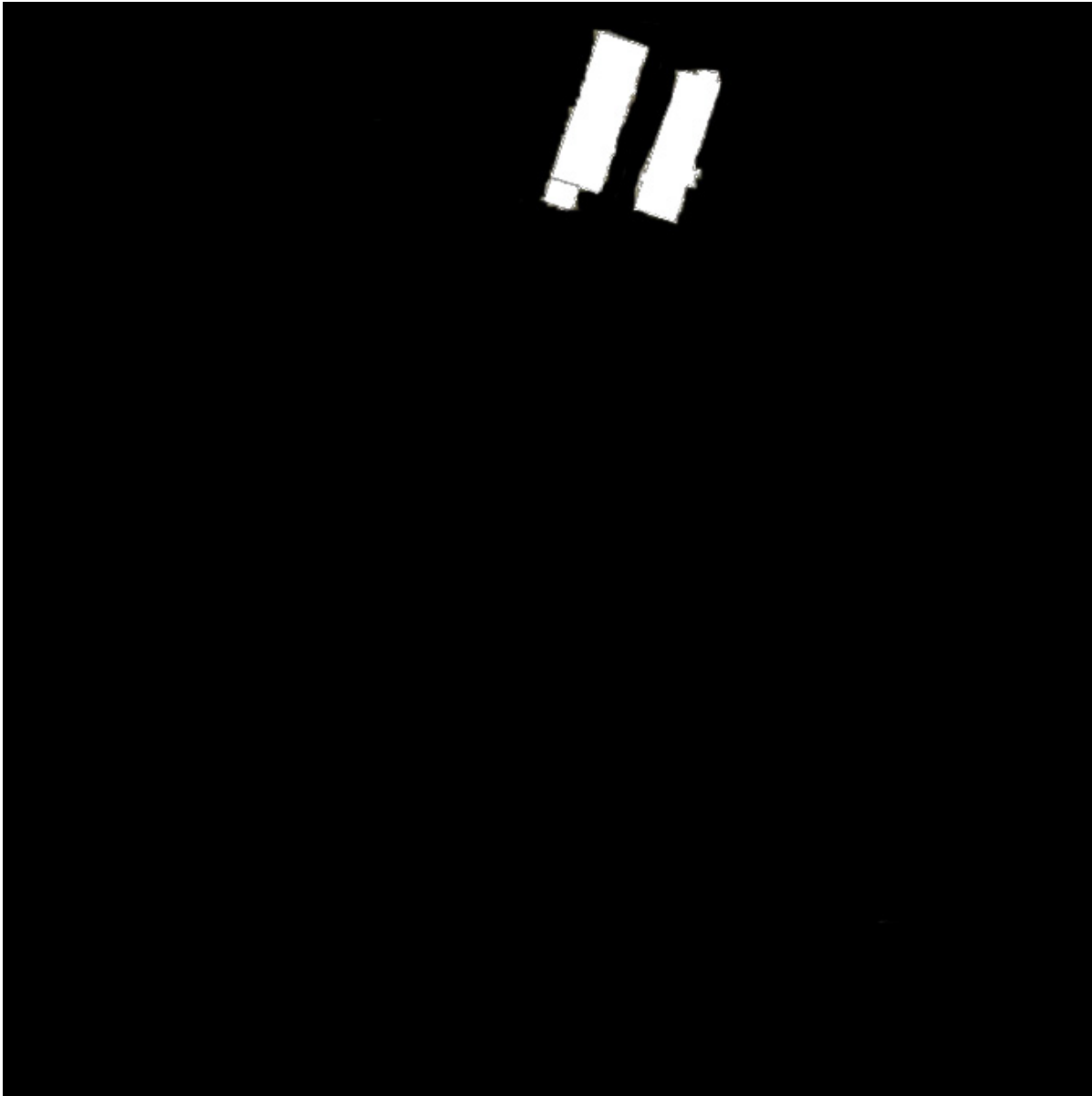


Figure-A XI-2 Zone d'affectation artisanat à Ecublens
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)



Figure-A XI-3 Zone d'affectation mixte moyenne densité à Ecublens
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

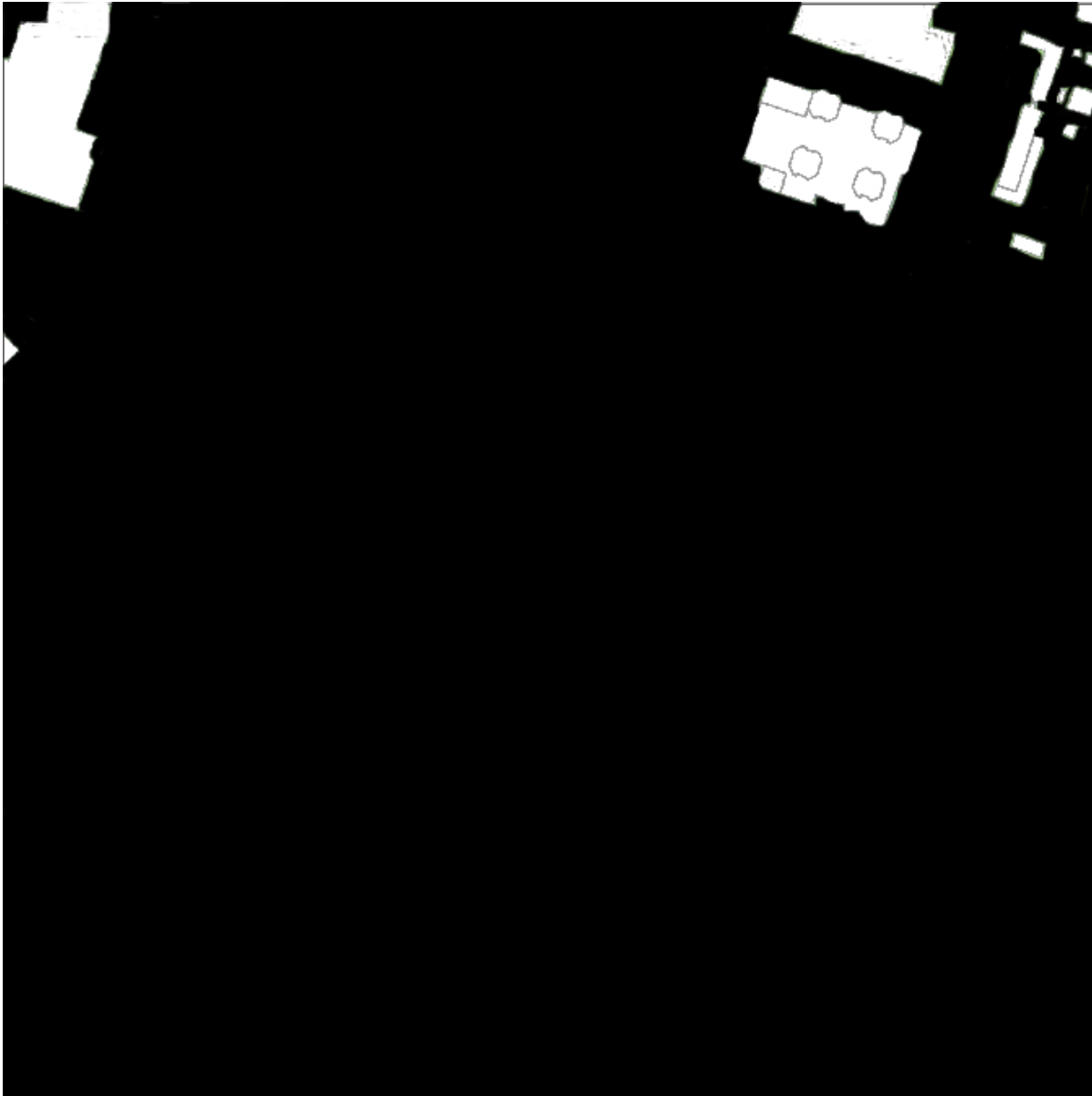


Figure-A XI-4 Zone d'affectation industrielle à Ecublens
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

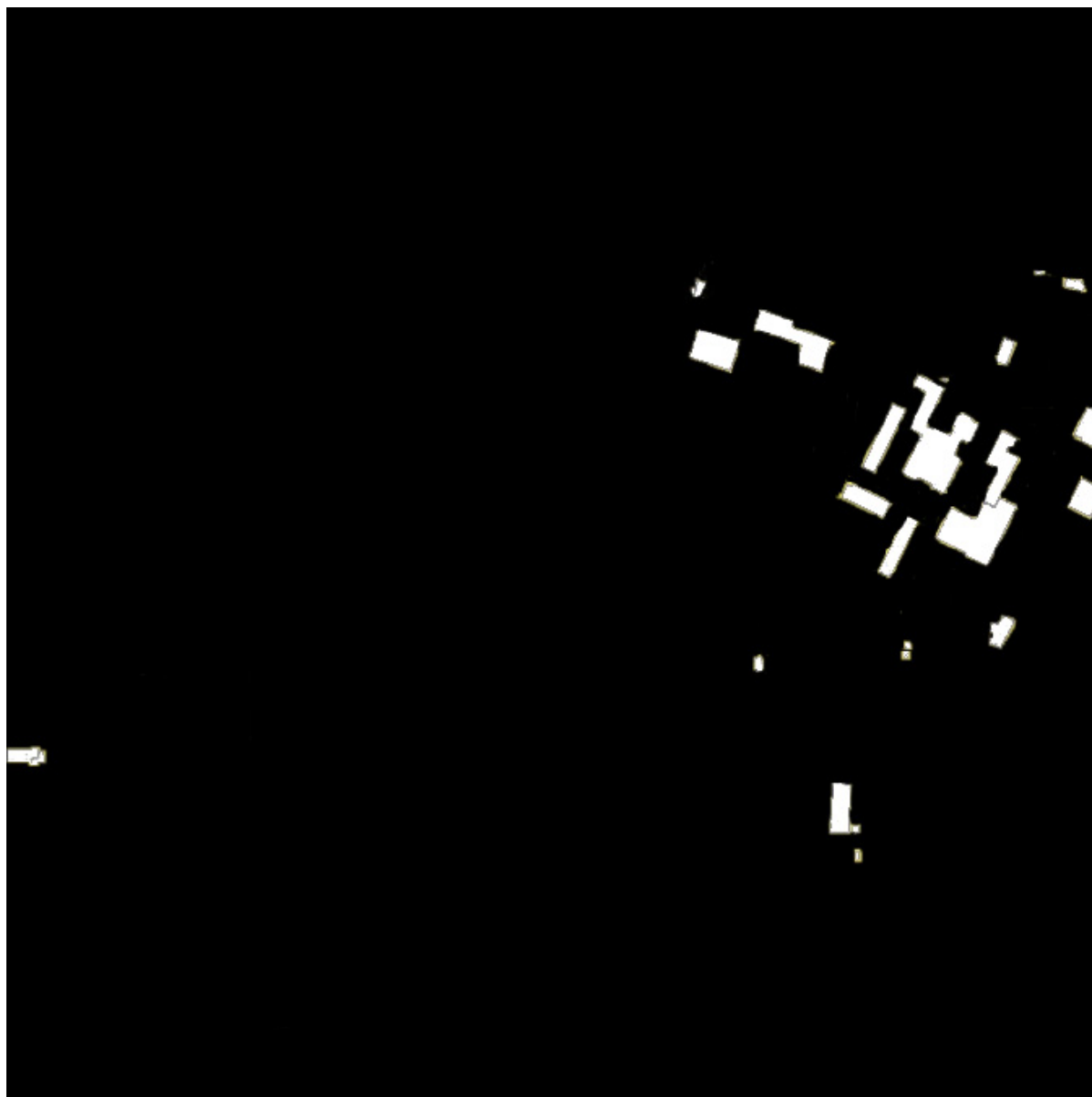


Figure-A XI-5 Zone d'affectation installations parapubliques à Ecublens
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)



Figure-A XI-6 Zone d'affectation zone de verdure et forêt à Ecublens
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)



Figure-A XI-7 : Zone d'affectation tertiaire à Ecublens
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

ANNEXE XII

CARTES DES ZONES D'AFFECTATIONS SÉGRÉGUÉES DE JOUXTEN-MÉZERY



Figure-A XII-1 Zone d'affectation mixte faible densité à Jouxten-Mézery
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

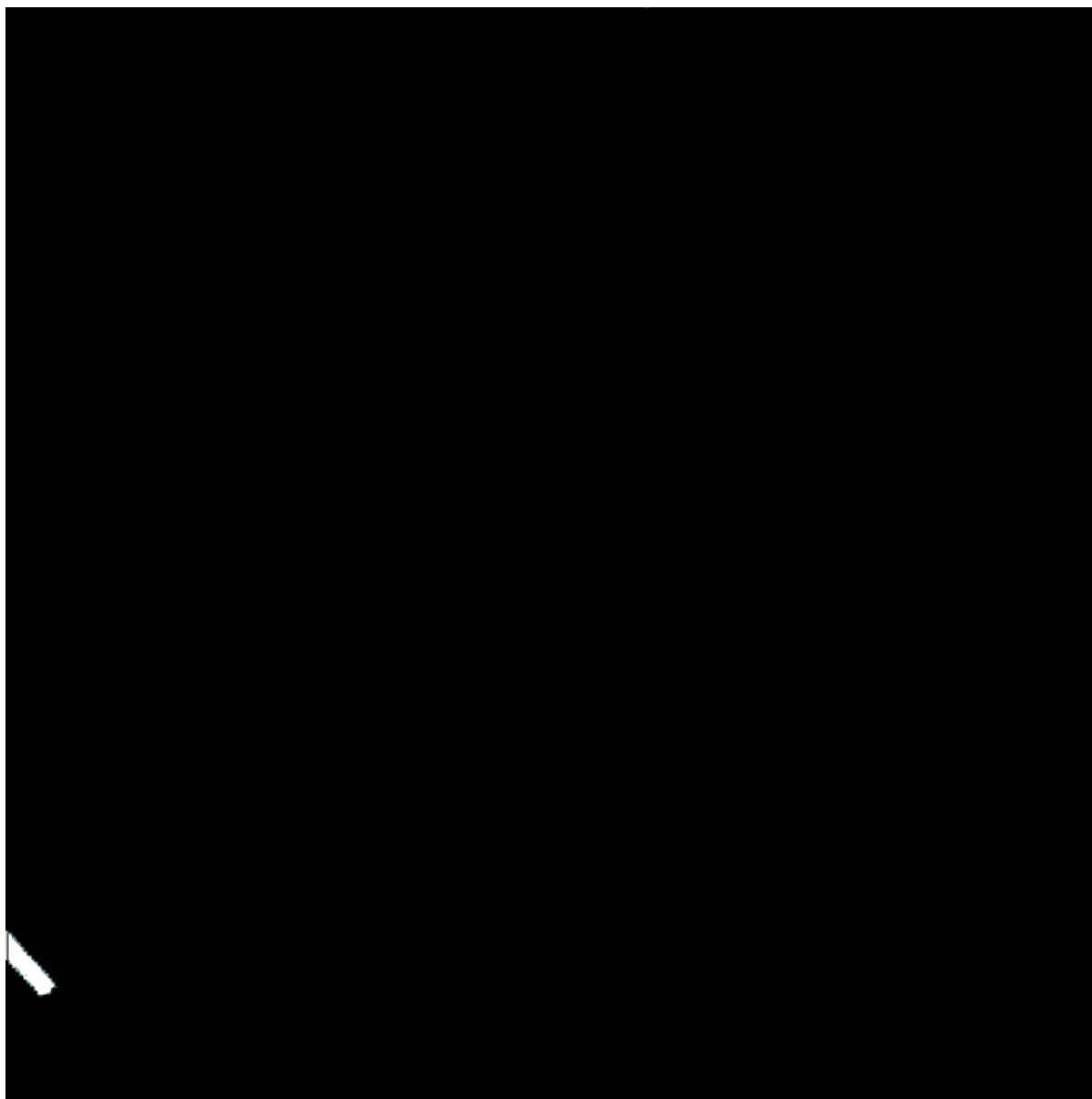


Figure-A XII-2 Zone d'affectation mixte haute densité à Jouxten-Mézery
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

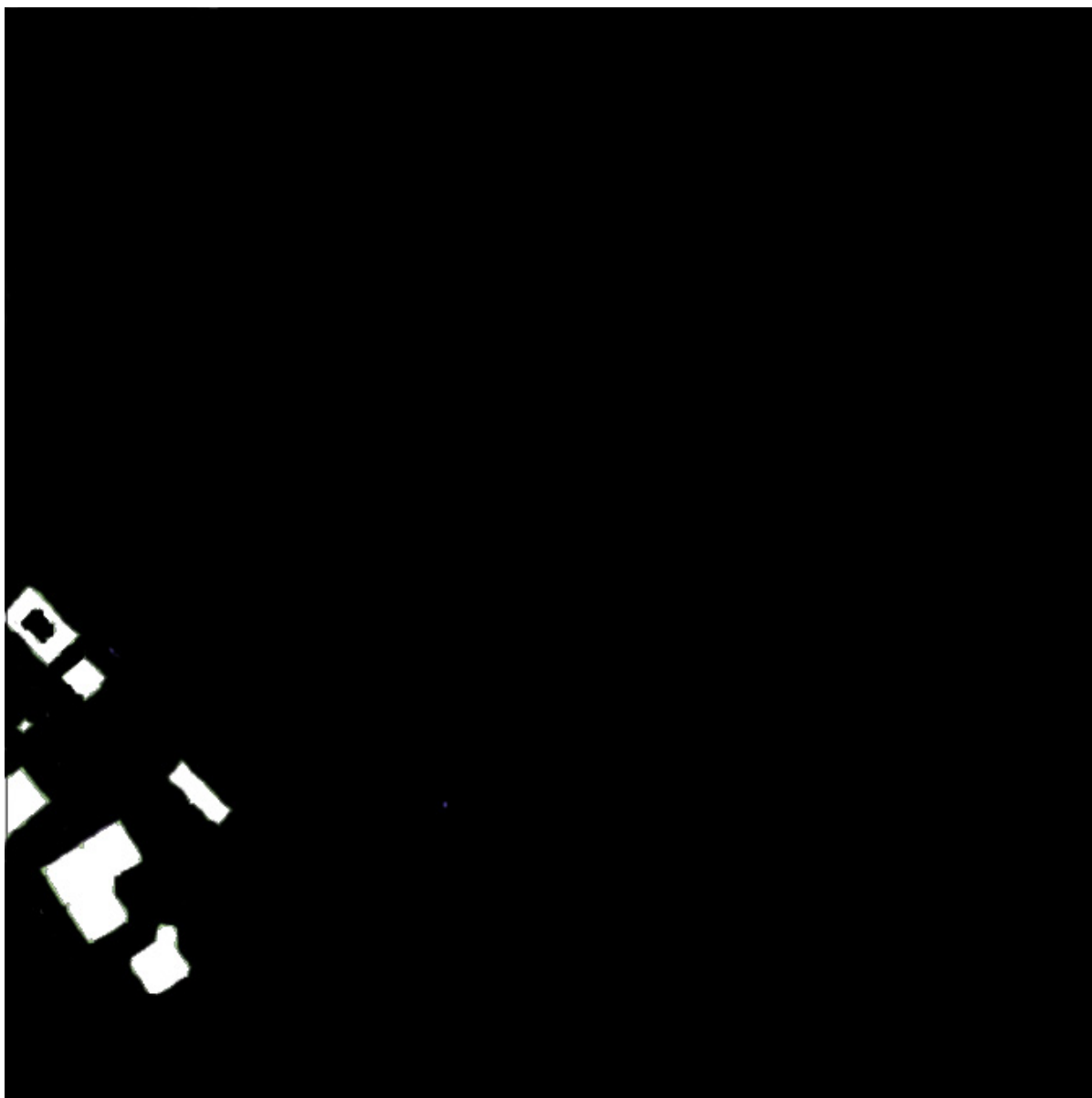


Figure-A XII-3 Zone d'affectation industrielle à Jouxten-Mézery
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

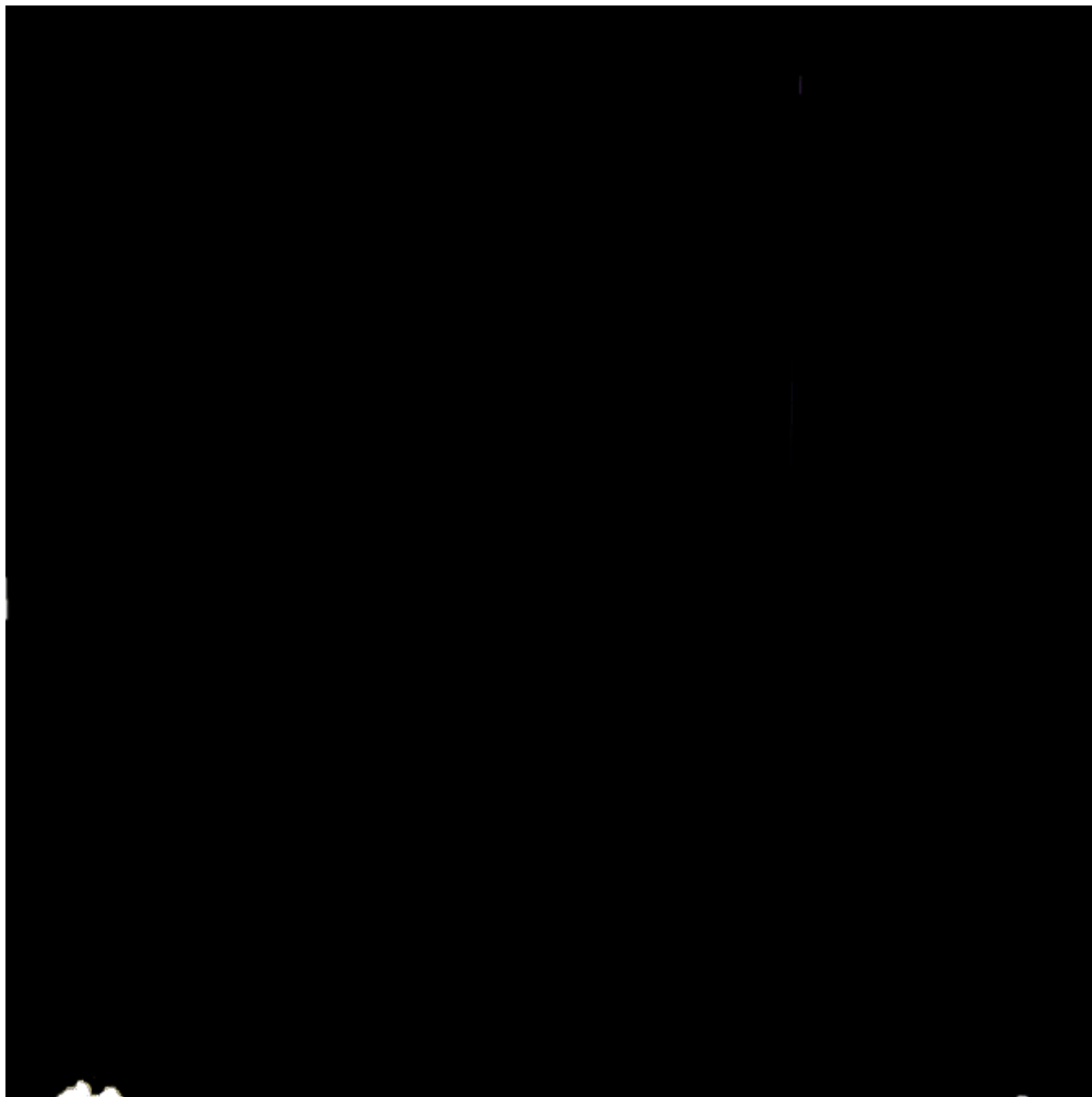


Figure-A XII-4 Zone d'affectation installations parapubliques à Jouxten-Mézery
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

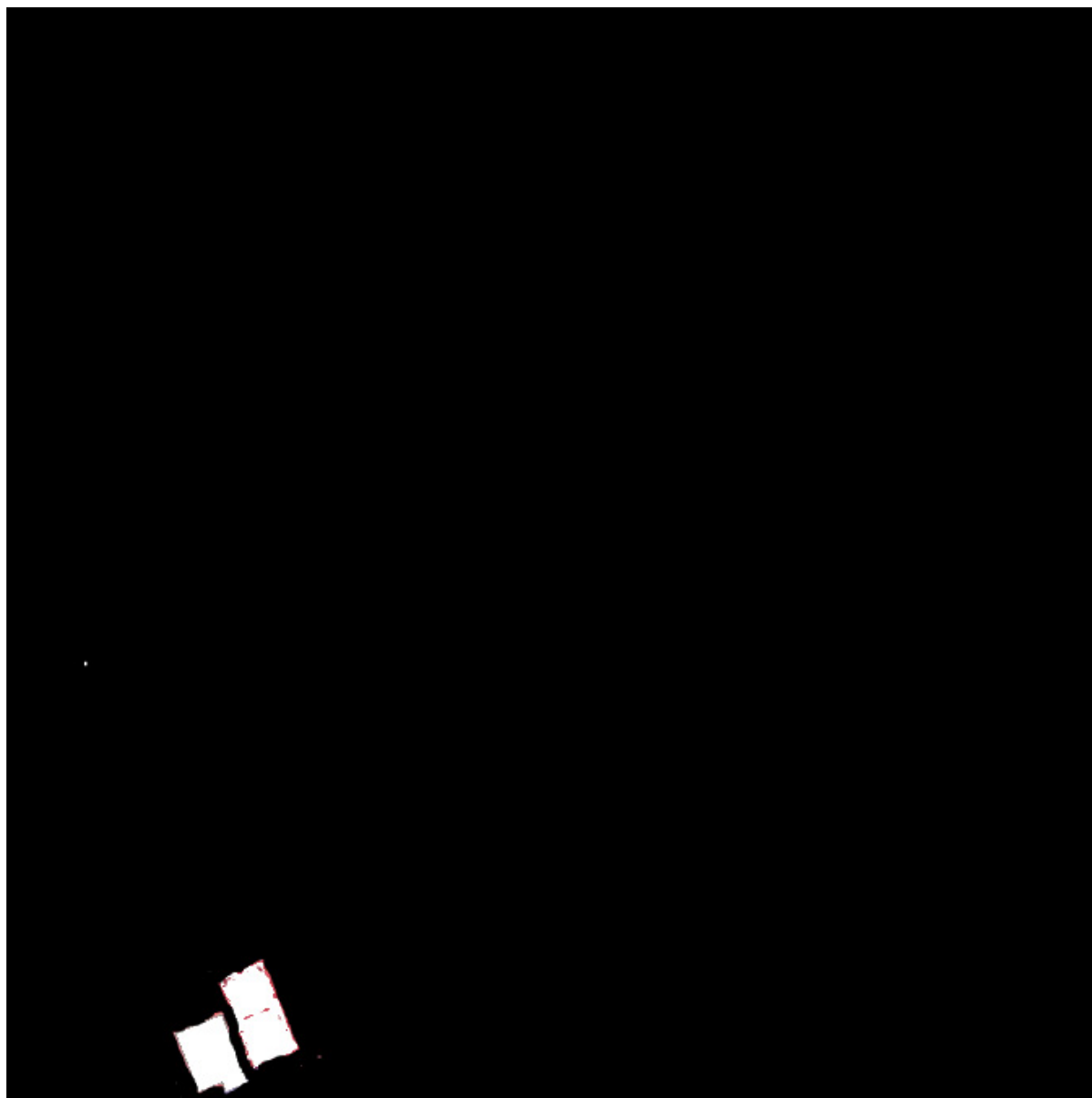


Figure-A XII-5 Zone d'affectation sport et loisir à Jouxten-Mézery
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

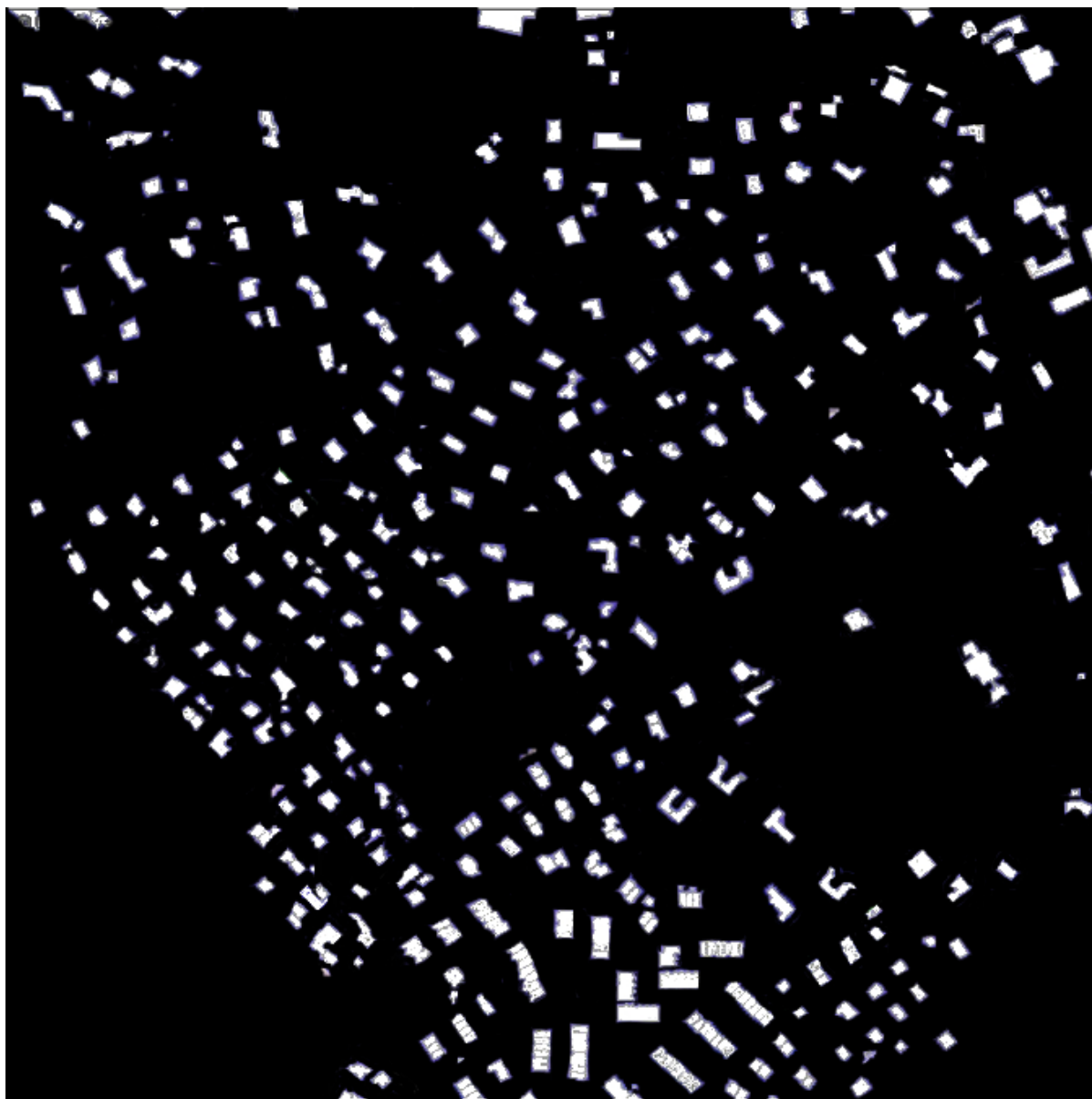


Figure-A XII-6 Zone d'affectation mixte très faible densité à Jouxten-Mézery
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)



Figure-A XII-7 Zone d'affectation zone de verdure et forêt à Jouxten-Mézery
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

ANNEXE XIII

CARTES DES ZONES D'AFFECTATIONS SÉGRÉGUÉES DE CRISSIER

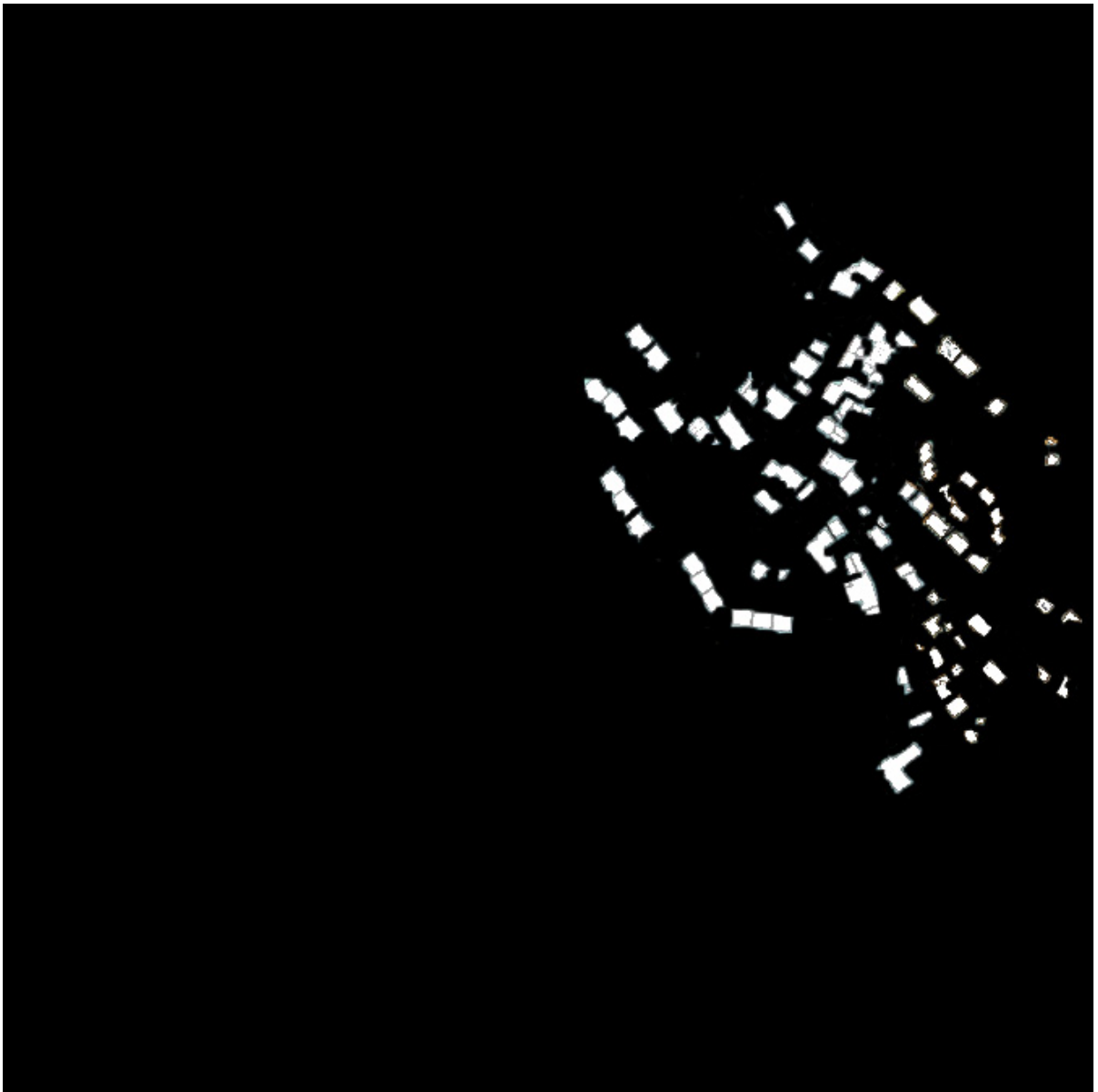


Figure-A XIII-1 Zone d'affectation village à Crissier
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

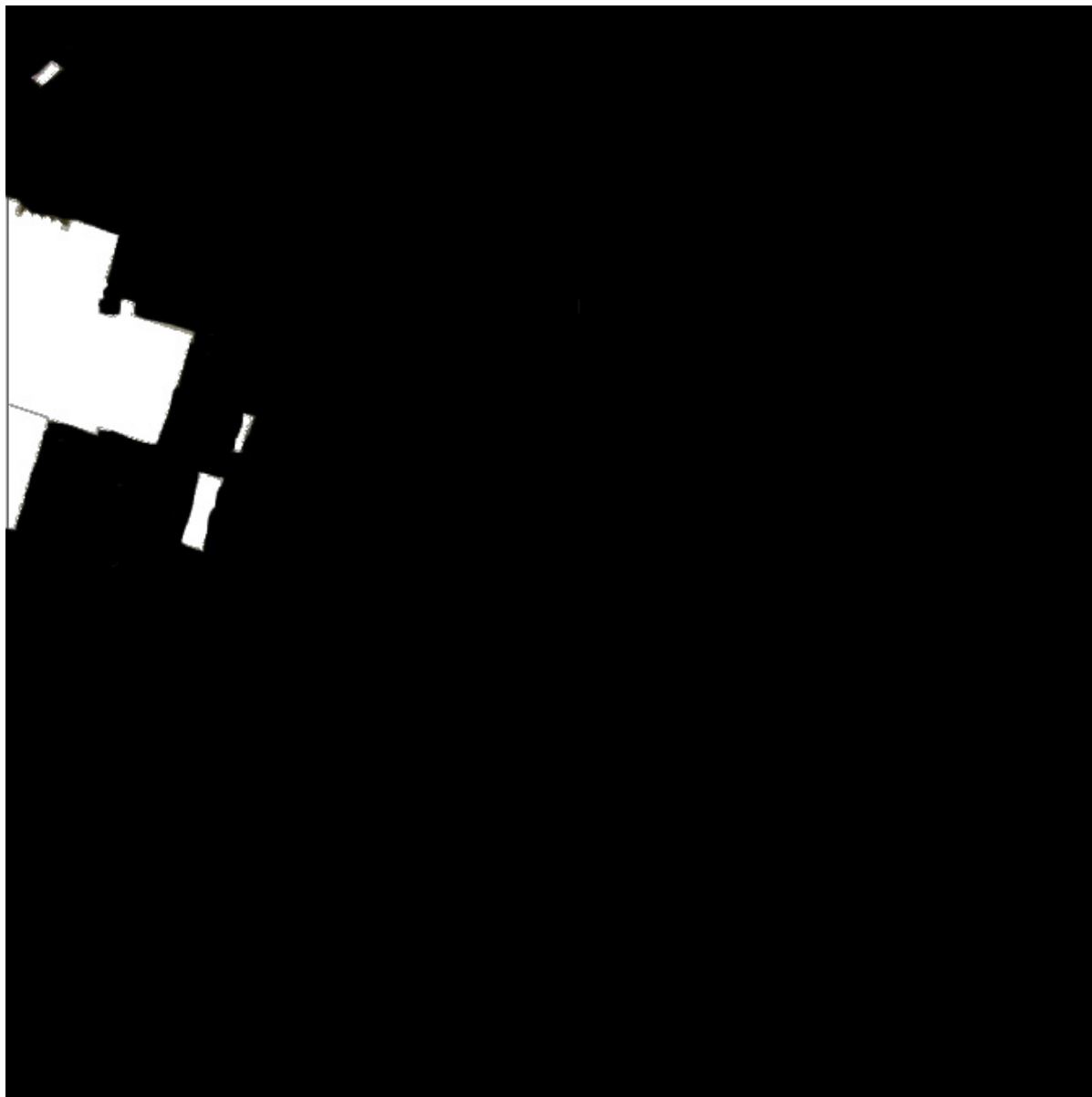


Figure-A XIII-2 Zone d'affectation artisanat à Crissier
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)



Figure-A XIII-3 Zone d'affectation commerciale à Crissier
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

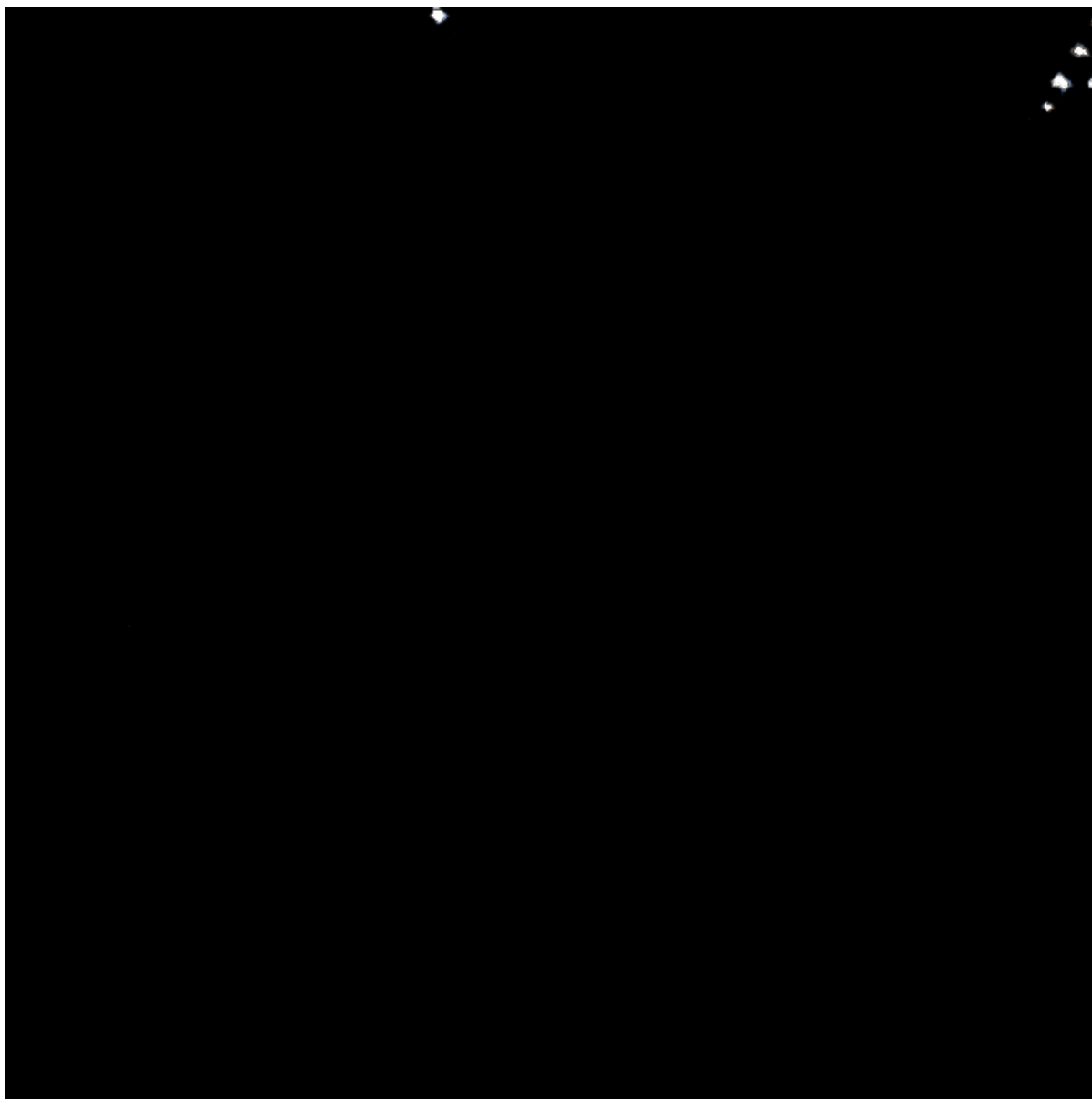


Figure-A XIII-4 Zone d'affectation faible densité à Crissier
 Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)



Figure-A XIII-5 Zone d'affectation zone verdure et forêt à Crissier
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)



Figure-A XIII-6 Zone d'affectation historique à Crissier
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

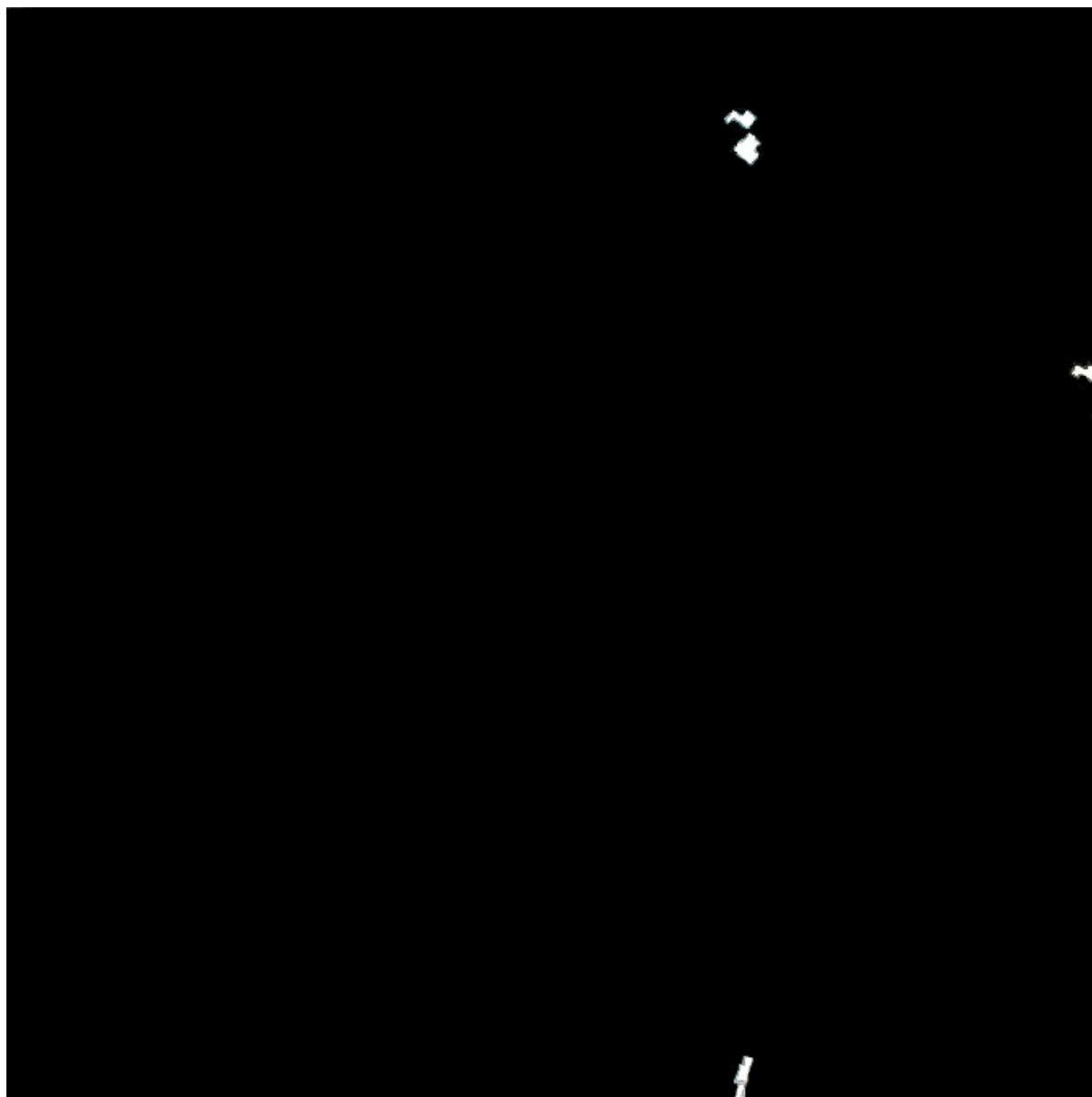


Figure-A XIII-7 Zone d'affectation mixte moyenne densité à Crissier
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)



Figure-A XIII-8 Zone d'affectation installations parapubliques à Crissier
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

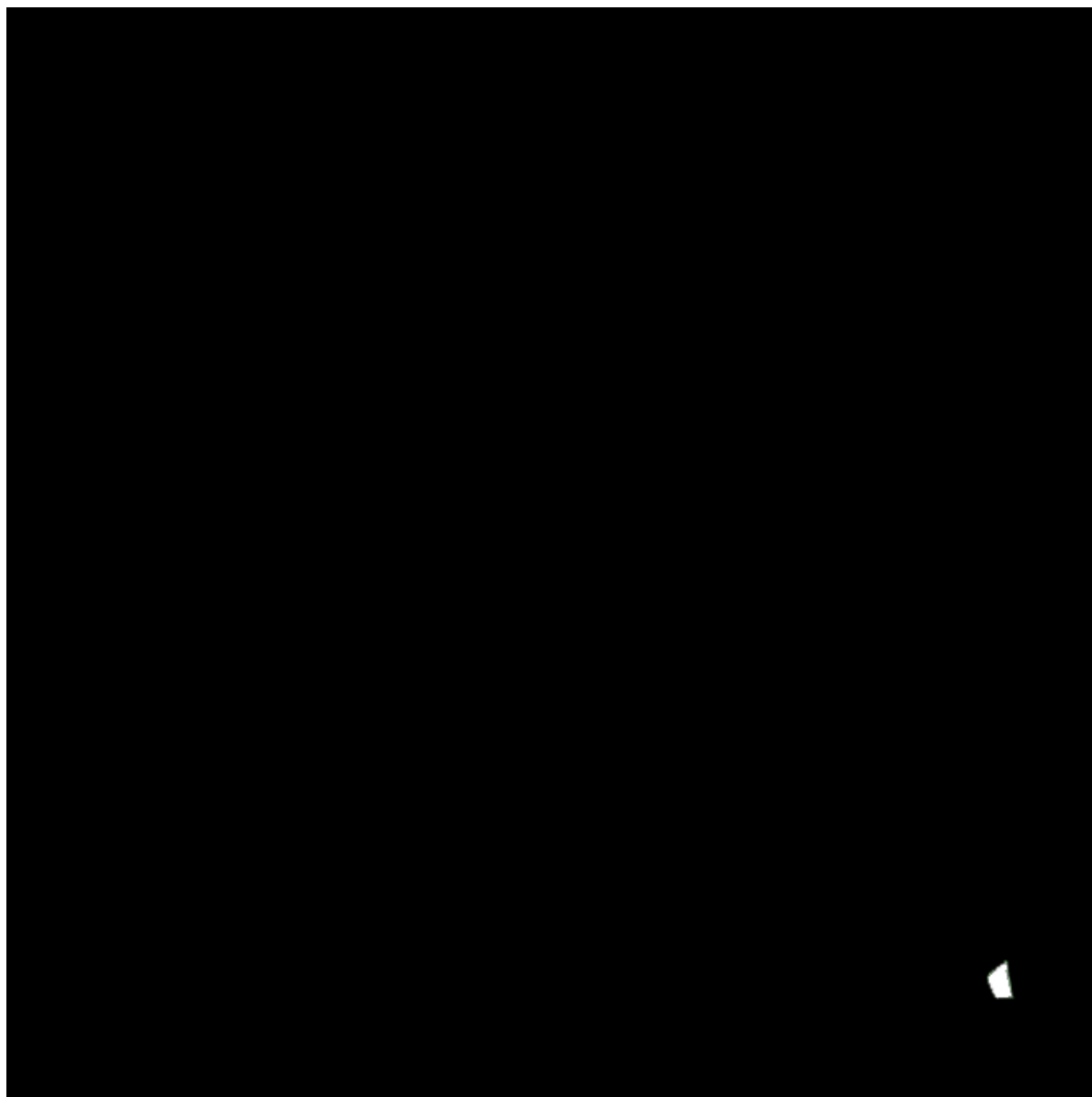


Figure-A XIII-9 Zone d'affectation tertiaire à Crissier
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)



Figure-A XIII-10 Zone d'affectation mixte très faible densité à Crissier
Tirée de la base de données Web-SIG Géoplanet (2014)

ANNEXE XIV

RÉSULTATS DE L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Ordre de grandeur	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Dimension de boîte	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024
% d'espace occupé	Dimension fractale calculée pour chaque dimension de boîte calculée										
1%	1,95	1,91	1,86	1,74	1,46	1,15	1,07	0,58	0,32	2,00	2,00
3%	1,95	1,91	1,84	1,69	1,47	1,17	1,17	0,39	1,61	2,00	2,00
8%	2,00	1,84	1,70	1,75	1,51	1,22	0,88	1,61	2,00	2,00	2,00
12%	1,95	1,92	1,85	1,76	1,53	1,17	1,11	1,81	2,00	2,00	2,00
17%	2,00	1,92	1,84	1,72	1,52	1,17	1,40	2,00	2,00	2,00	2,00
23%	1,95	1,92	1,86	1,72	1,49	1,33	1,90	1,81	2,00	2,00	2,00
23%	1,99	1,72	1,59	1,46	1,40	1,63	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
31%	1,90	1,82	1,73	1,59	1,51	1,69	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
37%	2,00	1,84	1,85	1,73	1,49	1,95	1,81	2,00	2,00	2,00	2,00
41%	2,00	2,00	2,00	2,00	1,26	1,44	1,95	2,00	2,00	2,00	2,00
45%	1,95	1,92	1,86	1,72	1,60	2,00	1,91	2,00	2,00	2,00	2,00
50%	1,91	1,91	1,86	1,70	1,81	2,00	1,91	2,00	2,00	2,00	2,00
54%	1,95	1,92	1,85	1,71	1,88	1,91	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
59%	2,00	1,84	1,70	1,98	1,98	1,95	1,91	2,00	2,00	2,00	2,00
63%	1,97	2,00	1,92	1,86	1,78	1,82	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
69%	1,96	1,92	1,85	1,99	2,00	1,95	1,91	2,00	2,00	2,00	2,00
77%	1,99	1,97	1,95	1,91	1,86	1,87	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
77%	2,00	1,92	1,99	1,99	1,98	1,91	1,95	2,00	2,00	2,00	2,00
83%	2,00	1,92	1,99	2,00	1,98	1,95	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
83%	2,00	1,98	1,97	1,94	1,88	1,89	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
84%	1,98	1,95	2,00	1,99	1,99	1,98	1,91	2,00	2,00	2,00	2,00
86%	1,98	1,95	2,00	1,99	1,99	1,98	1,91	2,00	2,00	2,00	2,00

ANNEXE XV

RÉFÉRENCE : CHENAIS ET AL. 2014

Comment l'aménagement des réseaux de transport influence-t-il la
motilité des personnes?

Deux cas d'étude : Renens et Crissier, deux villes de l'agglomération lausannoise



Sommaire

1. Introduction	5
2. Analyse de littérature	
Les systèmes de transport, des réseaux complexes.....	6
La Mesure de la centralité.....	6
3. Etude de données	
Renens.....	8
Crissier.....	10
L'agglomération lausannoise.....	12
4. Mesures de la centralité	
Méthode	14
Réseau routier.....	16
Réseau de transports publics	17

Introduction

Afin de pouvoir exercer des activités sociales ou économiques, les biens et personnes doivent pouvoir être en mesure de transiter dans l'espace. Le transport définit les activités sociales et économiques d'une société. L'importance des transports pour une population est, de nos jours, comparable à l'importance de son système sanguin. Les réseaux de transport sont aussi des éléments de grande importance dans l'histoire des modèles économiques géographiques. Ils servaient à décrire la manière dont les villes et les régions se sont construites, ce sont eux qui structuraient la ville. La baisse continue des prix de l'énergie couplée à l'automobile a influencé le développement des villes, passant d'un développement plutôt linéaire à des systèmes très complexes et polycentraux. La configuration des réseaux de transports est donc déterminante, car elle modifie la capacité des biens et personnes à se mouvoir. Il est très intéressant d'analyser l'impact du réseau des infrastructures de transport sur les activités de ses habitants. Ainsi, si la configuration des villes est différente, elle devrait, du moins en théorie, modifier les comportements des citoyens et les activités économiques de ses entreprises.

L'Ouest lausannois est aujourd'hui en pleine expansion et fait le fruit d'une importante réflexion quant à son développement. Lausanne et son agglomération subissent une croissance extrêmement forte depuis de nombreuses années, et de plus en plus de personnes s'installent en périphérie en raison du fort manque de logement au centre ville et de l'augmentation induite du coût de l'immobilier. Nous allons nous intéresser à deux communes qui ont ainsi vu leur population croître fortement dans les soixante dernières années, Renens, directement située à côté de Lausanne, dont la population a triplé depuis 1950, et Crissier, à l'Ouest de Renens, plus éloignée de la capitale vaudoise, où la population a tout de même subi la même augmentation dans ces cinquante dernières années. Les deux localités diffèrent d'un premier abord assez fortement l'une de l'autre, mais leur comparaison est intéressante car elles sont sujettes à des problématiques très similaires sur de nombreux points (croissance démographique, offres de commerce et de travail, mobilité...).

Nous allons nous intéresser au lien entre les offres de transport en commun et la mobilité des personnes au sein de ces deux communes. Nous commencerons par une analyse de littérature, pour cerner les enjeux de ces recherches, puis, à travers une étude de Renens, de Crissier, ainsi que de leur rapport à la ville de Lausanne, nous chercherons à analyser la centralité de chacune des communes, en étudiant leurs liens respectifs aux communes alentours et à Lausanne.

Analyse de littérature

Les systèmes de transport, des réseaux complexes

Les systèmes de transports sont une superposition de différents réseaux de mobilité. Ces réseaux de mobilité sont à la fois les transports collectifs, par exemple : l'aviation, le train, les autobus, et les transports individuels : la marche, le vélo et la voiture. Les réseaux de transports sont donc des réseaux complexes, ils possèdent des caractéristiques locales et leur niveau d'organisation sont aussi indépendants de l'échelle que l'on prend. (Derrible, 2012) Les graphes permettent de modéliser de manière mathématique ces réseaux complexes. Les graphes utilisent deux éléments très simples, des nœuds et des liens pour représenter les réseaux. Avec des deux éléments très simples, il est possible d'arriver à un réseau d'une très grande complexité. (Bocaletti et al, 2006) La manière dont les nœuds et les liens sont organisés, a un impact direct sur la manière dont les transports sont utilisés. (Derrible, 2012) Dans le transport, les nœuds exercent un rôle très important, car ils sont les points d'accès et de changement de direction du réseau. Dans le cadre du transport individuel, ils modélisent les liens entre les différents axes routiers, pour le transport en commun, les points d'arrêt et de transit. Ils permettent ainsi de changer de direction et de se déplacer dans l'espace. Les nœuds les plus importants, sont les nœuds intermodaux, car ils offrent une possibilité de transport qui est alors beaucoup plus grande. Les nœuds ne sont pas tous égaux, certains sont plus significatifs que d'autres. Ainsi, plus un nœud est connecté à plusieurs nœuds, plus il est important. On appelle cette notion de connexion entre les nœuds la centralité. Si un nœud est plus central à l'ensemble du réseau la motilité des occupants adjacents à ce nœud sera modifiée, car ils auront un accès plus diversifié aux différentes formes de transport et un accès théorique facilité à toutes les destinations. Afin de bien comprendre comment articuler et développer les réseaux de transport, il est donc nécessaire de comprendre s'il y a des relations entre les choix et la capacité de mobilité et la centralité des nœuds du réseau complexe. Les résultats obtenus peuvent être utilisés pour évaluer et planifier le développement de l'offre de transport (Derrible, 2012).

La mesure de la centralité

La mesure de la centralité est issue à l'origine de l'étude des réseaux sociaux. Elle a été utilisée afin de comprendre comment l'information voyageait dans une population. Par la suite, son application a été étendue à de multiples usages, l'un de ceux-là étant la mesure de réseaux de transport. La centralité permet de comprendre de manière théorique comment les flux d'informations, de personnes, de matériels ou d'énergie passent dans les réseaux. Elle mesure la densité et la cohésion des nœuds les uns par rapport aux autres (Borgatti et Everett, 2006). Selon Freeman, la centralité se résume à trois concepts.

Il y a plusieurs manières de calculer la centralité. Certaines voient les flux comme des éléments divisibles et d'autres indivisibles. Dans le cas du transport, comme l'on mesure des quantités de personnes, elles sont indivisibles. Deux méthodes pour mesurer la centralité des flux indivisibles ont été identifiées dans la littérature, il s'agit de la « Betweenness » et la « Closeness » de Freeman. (Borgatti, 2005). La première méthode mesure de son côté le volume médian qui passe par un nœud alors qu'avec la seconde, on mesure la longueur radiale entre les points. Ainsi, on mesure combien de trafic passe par ce point et combien de temps il met pour passer d'un nœud à l'autre (Borgatti et Everett, 2006). Dans le cadre d'une analyse temps/destination, les modèles de centralité peuvent offrir une perspective intéressante. Dans le cas présent, la valeur que l'on tente de mesurer est la facilité d'accès aux réseaux et aux destinations. Le volume de trafic théorique présente la quantité de voyages possibles à partir de ce point de manière directe pour aller à toutes les directions et départs. Plus la centralité est élevée plus l'accès devient facile aux différentes destinations. La « Betweenness », est donc la meilleure façon de

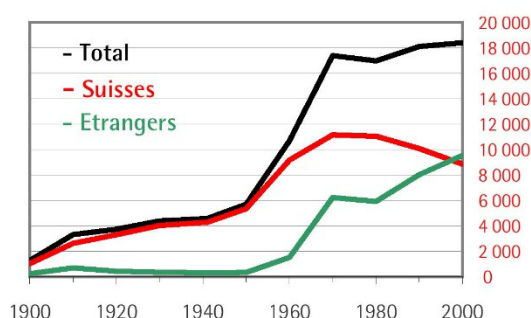
mesurer la centralité du réseau dans notre cas. Elle permet modéliser les possibilités théorique de déplacement des usagés du réseau à partir de ce nœud. La méthode consiste à mesurer toutes les solutions départ-arrivée du réseau. On compte ensuite le nombre de chemins géodésiques qui passent par le nœud k pour calculer la centralité. (Borgatti, 2005).

Il faut noter certaines limites dans la mesure de la « betweenness » pour bien l'apprécier. Tout d'abord, il s'agit essentiellement d'une approche théorique. Comme tous les points se valent, cela ne veut pas dire que c'est réellement le cas dans la réalité. On assume donc que toutes les routes ont des poids égaux aux autres (Altshuler et al., 2012). Dans le milieu du transport en commun, par exemple, on ne prend pas en compte quel type d'infrastructure est utilisé, quelle est la capacité des véhicules ou encore l'horaire de passage. Pour les transports individuels, on ne prend pas en compte la vitesse des voies publiques, le volume de transport que la voie peut supporter ou encore la topographie. De plus, il s'agit donc d'un modèle qui effectue une approximation et non un modèle qui présente la réalité. La modélisation est juste uniquement si le trafic suit les règles du « package delivery process ». (Borgatti, 2005). Il faut donc que les biens ou personnes qui se déplacent dans l'espace suivent le même comportement que des objets postaux : ils partent d'une destination vers une autre en utilisant le chemin le plus court et ils sont indivisibles. Ces nuances peuvent faire varier la validité externe des résultats de manière importante et il est nécessaire de considérer cela dans l'analyse des résultats.

Finalement, il y a certaines tendances que l'on peut déceler dans la mesure de la centralité. Pour le transport en commun, la valeur de la centralité augmente à mesure que le réseau grossit et la centralité des nœuds centraux grandit, car ils sont connectés à plus de points (Derrible, 2012). Comme les réseaux de transport en commun, tel que les métros, sont généralement axés pour transporter les gens de la périphérie au centre, ces constats semblent s'appliquer. Suivant la théorie, le point qui aura la plus grande centralité sera forcément le point central d'un réseau en étoile (Freeman, 1979). Cependant, dans la réalité, des éléments naturels ou du bâti humain peuvent modifier la centralité d'une zone, même centrale. Ainsi, une rivière ou un chemin de fer peu enclaver un quartier ou une ville et limiter sa centralité, même si elle est géographiquement positionnée au centre de la ville. La centralité permet donc de faire apparaître de telles anomalies dans notre système de transport. Un dernier point important issu de l'étude des réseaux complexes : les nœuds qui ont le plus de connections ont tendance à se lier aux autres nœuds qui ont le plus de centralité (Wanga et al, 2011). Les points centraux ont donc, par des boucles de rétroaction positives, tendance à se renforcer eux-mêmes et modifier l'activité économique de ces points.

Ainsi, avec la « Betweenness », il est pertinent de faire une analyse du réseau routier et de transport en commun d'une région. Dans ce cas-ci, nous allons nous concentrer sur deux villes de l'ouest lausannois, Renens et Crissier, et étudier leur rapport avec Lausanne. L'analyse des résultats pourra ensuite nous indiquer si la centralité des villes et des réseaux de mobilité associée influence le comportement de ces citoyens et le développement économique de la ville. Il s'agira principalement d'une analyse théorique, mais elle pourrait révéler des corrélations entre la centralité et certains éléments socio-économiques.

Renens et Crissier, étude de données



Croissance de la population à Renens depuis les années 1900
Source : SCRIS, OFS / Recensement fédéral de la population, 2000

	En tout	Actifs	Ecoliers, étudiants
Personnes entrant dans la commune	6 870	6 786	84
Personnes quittant la commune	7 370	6 316	1 054

Déplacements quotidien au sein de la commune de Renens
Source : SCRIS, OFS / Recensement fédéral de la population, 2000

Actifs résidant dans la commune

Lieu de travail	nombre	en %
Total	9 293	100
Renens	1 962	21
Hors commune	6 316	68 *
dont :		
Lausanne	2 747	30
Crissier	556	6
Ecublens	468	5
Bussigny-près-Laus	354	4
Prilly	307	3
Chavannes-p-Renens	138	1
Morges	137	1
Mont-s-Lausanne	131	1
Autres	1 478	16

* le 11 % des actifs ont une commune de travail inconnue

Lieu de travail des résidents de Renens
Source : SCRIS, OFS / Recensement fédéral de la population, 2000

Renens

Population 20 176 habitants
Superficie 2,96 km²
Densité de population 6 816 hab/km²

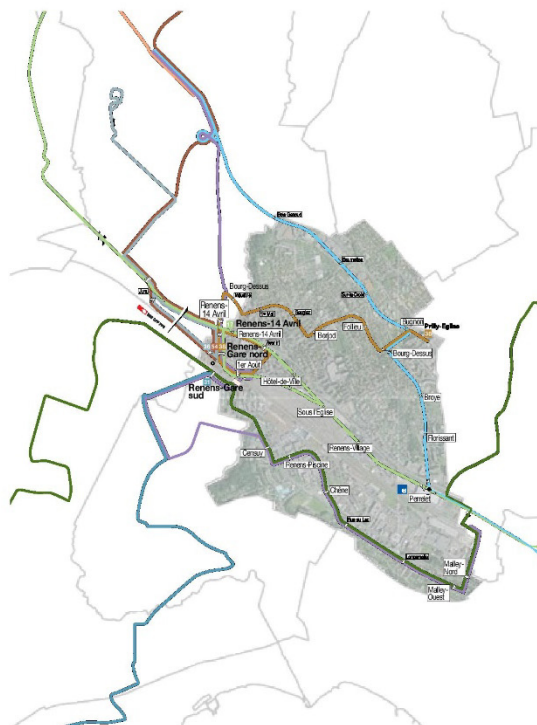
Renens est la quatrième plus grande ville du canton de Vaud. Liée à un centre économique important de Suisse, elle a subi une très forte croissance dans les cinquante dernières années. Sa proximité avec la capitale vaudoise influence fortement les habitudes de ses habitants. On remarque que la majorité des habitants de Renens (68%) ne travaillent pas directement dans la commune. Mais surtout, que 30% des habitants de Renens travaillent à Lausanne. La réciproque est également intéressante, car 78% des actifs travaillant dans la commune de Renens sont domiciliés dans d'autres communes (en tout, 19% à Lausanne, 21% dans les communes alentours, et 38% d'ailleurs). Avec ces chiffres, nous pouvons déjà appuyer le fait que Renens est le théâtre d'une mobilité journalière très importante, et il faut remarquer que ni le nombre important d'étudiants qui font le trajet chaque jour, ni les trajets liés aux loisirs ou aux achats de chacun ne sont comptés.

Transports publics

Pour répondre à ce nombre croissant de besoin de transports, la ville de Renens de mieux en mieux été reliée à Lausanne. Aujourd'hui, outre les huit lignes de bus qui desservent Renens et la relient au centre lausannois ou aux communes alentours, la commune est desservie par les chemins de fer et la ligne M1 du métro. De part sa situation et son fort lien à Lausanne, elle est devenue un second centre de la métropole lémanique et subit directement les fruits de l'expansion de la capitale. De nombreux projets, tels l'installation d'un tram reliant la place de l'Europe à la gare de Renens ou l'agrandissement de celle-ci, entre autres, visent notamment à adapter et améliorer la desserte de Renens.

Transports privés

On constate que la voiture occupe une place identique dans les foyers à Renens qu'à Lausanne. On recense 434 voitures pour 1000 habitants ⁽¹⁾, en comparaison à 400 pour 1000 à Lausanne. Bien qu'en marge de la capitale vaudoise, Renens ne semble pas être sujette à une importante utilisation de la voiture, ou en tout cas à une plus forte utilisation qu'en grande ville, ceci probablement dû au réseau de transport en commun fortement répandu. Il faut noter que la commune de Renens n'est pas considérée comme une couronne au grand centre, c'est à dire périphérie à la ville de Lausanne, mais comme un centre secondaire ⁽²⁾. Ce statut induit l'importance de la commune, et nous laisse présager que la centralité du lieu est conséquente.



Réseau de bus dans la commune

Actifs travaillant dans la commune

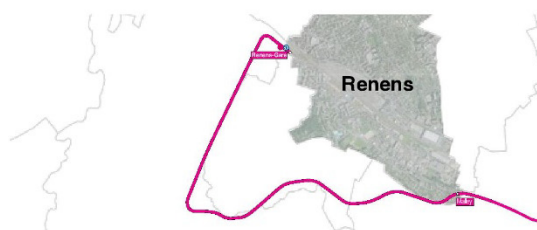
Lieu de domicile	nombre	en %
Total *	8 748	100
Renens	1 962	22
Hors commune	6 786	78
dont:		
Lausanne	1 669	19
Ecublens	393	4
Prilly	317	4
Crissier	297	3
Bussigny-près-Laus	255	3
Chavannes-p-Renens	217	2
Pully	179	2
Morges	161	2
Autres	3 298	38

* non compris les 171 frontaliers (au 31.12.2000)

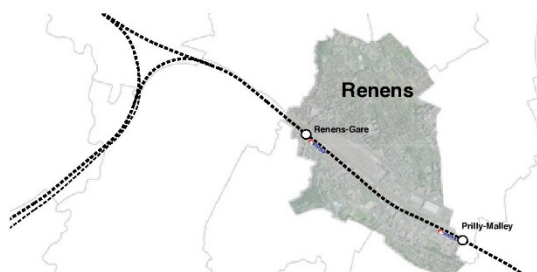
Lieu de résidence des actifs travaillant à Renens
Source : SCRIS, OFS / Recensement fédéral de la population, 2000

⁽¹⁾ Source: atlas statistique de Lausanne et agglomération, 2012, <http://www.cartostatls.vd.ch/>

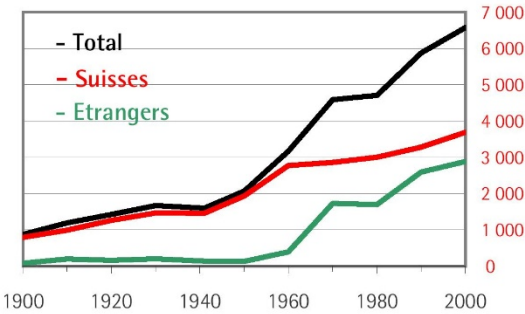
⁽²⁾ Source: typologie des communes ARE
<http://map.geo.admin.ch>



Tracé de la ligne de métro M1 Lausanne-Flon - Renens Gare



Voie ferrée, gares de Renens et de Prilly-Malley



Croissance de la population à Crissier depuis les années 1900
Source : SCRIS, OFS / Recensement fédéral de la population, 2000

	En tout	Actifs	Ecoliers, étudiants
Personnes entrant dans la commune	4 644	4 591	53
Personnes quittant la commune	2 798	2 379	419

Déplacements quotidien au sein de la commune de Renens
Source : SCRIS, OFS / Recensement fédéral de la population, 2000

Actifs résidant dans la commune

Lieu de travail	nombre	en %
Total	3 336	100
Crissier	690	21
Hors commune	2 379	71 *
dont :		
Lausanne	918	28
Renens	297	9
Ecublens	174	5
Bussigny-près-Laus	155	5
Prilly	127	4
Morges	53	2
Le Mont-s-Lausanne	49	1
Genève (GE)	42	1
Autres	564	17

* le 8 % des actifs ont une commune de travail inconnue

Lieu de travail des résidents de Renens
Source : SCRIS, OFS / Recensement fédéral de la population, 2000

Crissier

Population 7 288 habitants
Superficie 5,51 km²
Densité de population 1 323 hab/km² (1)

La commune de Crissier est juxtaposée à la commune de Renens. Malgré sa population cinq fois inférieure à celle de sa voisine et sa plus grande distance à Lausanne, une comparaison entre les deux communes est intéressante. L'expansion de la capitale vaudoise dans l'Ouest du canton est un thème crucial, et, si d'apparence nous pouvons penser que Crissier n'en subit actuellement pas encore les conséquences comme Renens, les chiffres montrent que les problématiques qui sont en phase de résolution à Renens (augmentation de l'offre des transports publics, nouveaux axes de transport, etc) devraient être également étudiées à Crissier.

D'ailleurs, il faut prendre en compte que Crissier, qui a une densité nettement inférieure à celle de Renens, n'est occupée qu'à 44% de son territoire par du bâti (OFS-1992/97). Le nord de la commune est encore presque entièrement occupé par des surfaces agricoles ou boisées. Ainsi, la superficie des terrains construits est relativement équivalente à celle de Renens (92% de terrains bâti), et une comparaison entre Renens et Crissier-Sud prend son sens.

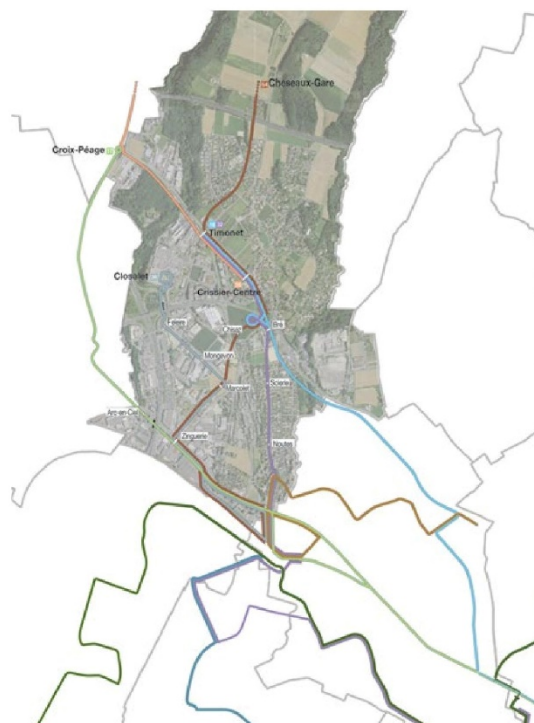
Effectivement, si nous nous concentrons sur la question de la mobilité liée à l'emploi, nous constatons une forte ressemblance entre les chiffres concernant Renens et ceux de Crissier. Là aussi, seuls 21% des habitants de Crissier y travaillent. 28% se déplace jusqu'à Lausanne, contre 9% à Renens, qui est pourtant plus proche et plus accessible. La réciproque montre le même résultat qu'à Renens: 87% des actifs travaillant à Crissier viennent de l'extérieur de la commune.

Transports publics

En corrélation avec la classification des zones, le réseau de transports en commun ne dessert pratiquement que le sud de Crissier. Cette zone est reliée à Renens, Lausanne, ou aux environs, mais la faible offre de transports publics (nous comptons sept lignes de bus qui desservent la commune, dont seulement quatre la relie à Lausanne et Renens) n'est pas en accord avec la croissance de population ni la mobilité des personnes.

Transports privés

La commune est marquée par l'accès direct à l'autoroute et aucun autre transport en commun. Il est logique, en constatant ces faits, d'observer un plus fort taux de possession de véhicules que dans des communes plus denses et mieux desservies. Ainsi, pour 400 voitures pour 1 000 habitants à Lausanne, Crissier en compte 650 pour 1 000 habitants ⁽²⁾.



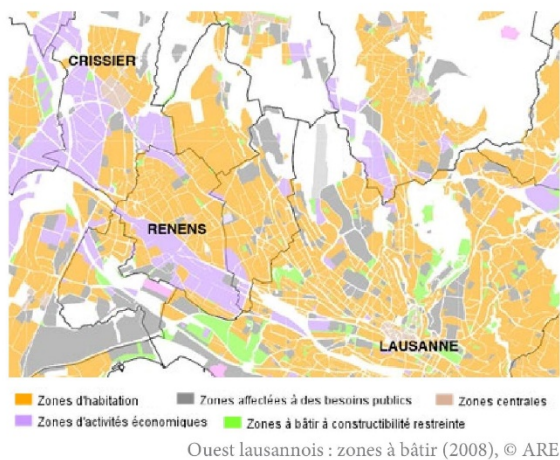
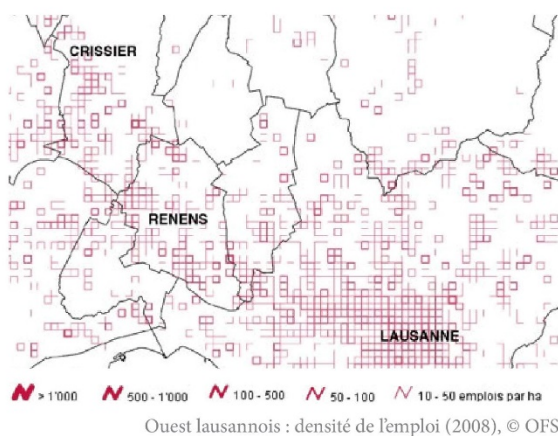
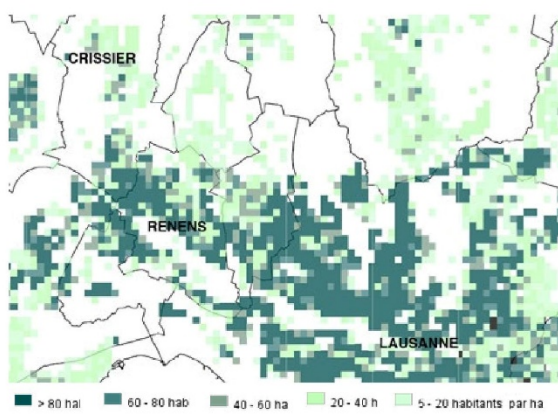
Réseau de bus dans la commune

Actifs travaillant dans la commune

Lieu de domicile	nombre	en %
Total *	5 281	100
Crissier	690	13
Hors commune	4 591	87
dont:		
Lausanne	874	17
Renens	556	11
Ecublens	256	5
Bussigny-près-Laus	213	4
Chavannes-p-Renens	160	3
Prilly	143	3
Morges	98	2
Pully	93	2
Autres	2 198	42

* non compris les 176 frontaliers (au 31.12.2000)

Lieu de résidence des actifs travaillant à Crissier
Source : SCRIS, OFS / Recensement fédéral de la population,
2000



⁽¹⁾ Recensement du 31.12.11

⁽²⁾ Source: atlas statistique de Lausanne et agglomération, 2012, <http://www.cartostatls.vd.ch/>

⁽³⁾ Source: SCRIS, OFS / Recensement fédéral de la population

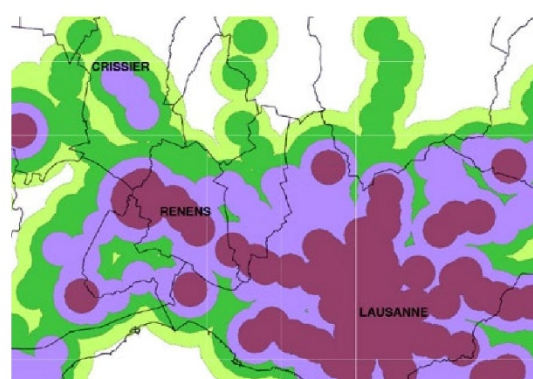
L'agglomération lausannoise

Après avoir étudié les données générales de chaque commune, qui nous ont aidées à avoir une meilleure vision d'ensemble sur leurs caractéristiques, l'étude de quelques cartes nous confirme les interprétations que nous tirions de l'analyse propre à chaque commune. Effectivement, nous observons une corrélation entre les données mentionnées plus haut et leur manière de réagir dans le tissu urbain.

Nous précisons de nouveau qu'il est nécessaire de ne pas généraliser la commune de Crissier, mais de comparer uniquement sa partie Sud, afin de cerner les mêmes problématiques. En effet, le sud de Crissier fait partie intégrante de la métropole lémanique tandis que le nord a conservé son caractère rural.

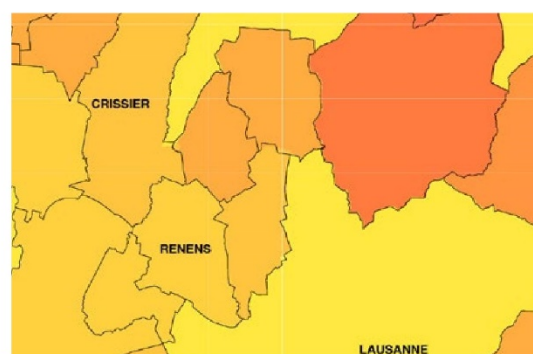
En observant les statistiques de population, d'emploi, et de zones à bâtir de Lausanne et de l'ouest lausannois, nous remarquons qu'entre Renens et Crissier-Sud, bien que les densités de population diffèrent (plus les localités sont proches de Lausanne plus elles sont peuplées), la densité de l'emploi, elle, est relativement semblable. Cela peut s'expliquer, entre autres, lorsqu'on observe les zones à bâtir. La population se concentre dans les zones destinées à l'habitat, qui sont très présentes à Renens, tandis que l'emploi se concentre principalement dans les zones d'activité économiques, de plus grande superficie à Crissier qu'à Renens. Au point de vue économique, Crissier est une ville en pleine activité, et attire un grand nombre de travailleurs (5 981 au 31.12.2000⁽³⁾), dont seulement 13% habitent à Crissier même.

Ainsi, nous remarquons une équivalence entre les besoins de mobilité des personnes à Renens et à Crissier. Néanmoins, Renens est beaucoup mieux desservi, nous l'avons constaté en observant les services mis à disposition des usagers dans l'étude de Renens. Cela est confirmé lorsqu'on observe les cartes statistiques de la qualité de la desserte et du temps moyen d'une personne passé dans les transports publics.



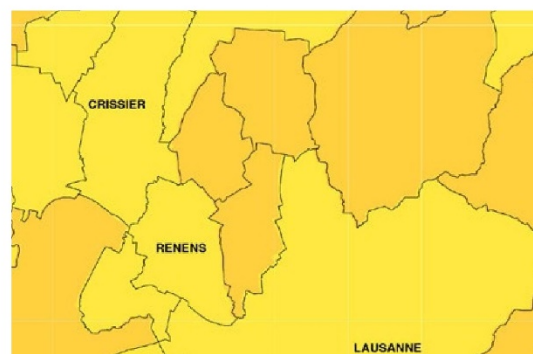
■ Classe A: très bonne ■ Classe B: bonne desserte
■ Classe C: desserte satisfaisante ■ Classe D: mauvaise desserte

Qualité de la desserte des transports en commun © swiss topo, ARE, 2007



■ 90-100 (min) ■ 80-90 (min) ■ 70-80 (min) ■ 60-70 (min) ■ 50-60 (min) ■ 40-50 (min) ■ 30-40 (min)

Temps de parcours moyen d'une personne utilisant les transports publics en 2005 (TP) © swiss topo



■ 90-100 (min) ■ 80-90 (min) ■ 70-80 (min) ■ 60-70 (min) ■ 50-60 (min) ■ 40-50 (min) ■ 30-40 (min)

Temps de parcours moyen d'une personne utilisant les transports individuels motorisés en 2005 (TIM) © swiss topo

3. Mesures de la centralité

Méthode

La mesure de la centralité d'un réseau se fait à l'aide de la théorie des graphes; pour rappel, un graphe est un ensemble de points, ou noeuds, dont certains sont reliés par un ou plusieurs liens. De nombreuses mesures sont possibles sur un graphe, mais dans le cadre de cette étude, seule la mesure du chemin le plus court nous intéresse. Il est noté d_{ij} et est défini comme le chemin le plus court à travers le graphe reliant les noeuds i et j .

A partir de cette mesure du chemin le plus court, nous pouvons définir la centralité, qui permet de caractériser l'importance relative d'un noeud par rapport à d'autres au sein du graphe. Ici, c'est à la centralité "betweenness" que nous nous intéressons; il s'agit de la mesure quantifiant le fait que plus un noeud est traversé par un chemin le plus court entre deux autres noeuds, et plus il est central. La "betweenness" se calcule donc comme ceci :

Algorithme 1

- Pour une paire de noeuds du graphe, calculer le chemin le plus court les reliant
- Pour chaque *autre* noeud du graphe, regarder si le chemin passe par celui-ci
- Compter le nombre de chemins passant par chaque noeuds
- Répéter pour toutes les autres paires de noeud du graphe

On peut donc écrire la "betweenness" C^B d'un noeud i dans un graphe dirigé comme :

$$C_i^B = \frac{1}{(N-1)(N-2)} \sum_{j=1; k=1; j \neq k \neq i}^N \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}}$$

Equation 1 : centralité

où N est le nombre de noeuds du graphe, n_{jk} est le nombre de chemins les plus courts entre les noeuds j et k , et $n_{jk}(i)$ est le nombre de chemins les plus courts entre j et k passant par le noeud i . Ceci implique aussi que si un noeud n'est pas traversé par de nombreux chemins les plus courts, mais qu'il est connecté à, ou proche d'un noeud central, alors il aura lui même une grande centralité.

Afin d'appliquer cette théorie à notre étude, nous avons extrait le réseau routier de Lausanne, ainsi que celui de ses communes proches, depuis OpenStreetMap. Ceci nous donne un graphe dont les noeuds sont les intersections des routes, et les liens sont les routes entre les intersections. Cependant, le graphe obtenu contenant environ 15'000 noeuds, nous n'avons pas les ressources informatiques nécessaires pour faire tourner l'algorithme 1. Nous avons donc importé le graphe dans ArcGIS, un logiciel professionnel de systèmes d'informations géographiques, afin d'enlever toutes les routes n'ayant que très peu d'influence sur la centralité, comme les routes résidentielles, les chemins, ou encore les rues piétonnes, et nous avons obtenu le graphe 1.

Il faut ensuite transformer ce graphe pour pouvoir appliquer l'algorithme 1: ceci se fait grâce à un programme en Python, développé par Emmanuele Strano (LASIG, EPFL). Ce programme transforme le graphe en une matrice, permettant son analyse dans Matlab. Ensuite, en utilisant les bibliothèques de calcul de centralité *matlab-bgl* développées par David Gleich (2009), nous obtenons la "betweenness" pour chaque noeud du réseau. Ces don-

nées sont ré-exportées dans ArcGIS afin de pouvoir les superposer sur une carte de Lausanne pour visualiser les résultats. La dernière étape consiste à appliquer à chaque noeud un noyau de densité, ce qui permet d'obtenir visuellement, les zones les plus centrales de Lausanne et de son agglomération.

Il faut cependant noter que cette méthode présente quelques limites. Il est pour l'instant impossible de quantifier le fait que certains liens, notamment l'autoroute, ont une plus grande capacité (vitesse maximum, nombre de voies) et donc permettent de relier des noeuds plus rapidement, même si la distance euclidienne est plus grande que celle d'un autre chemin. Ainsi, la centralité des noeuds situés à proximité de tels liens, comme ceux du Nord Lausannois, est sous-estimée. De plus, certaines caractéristiques du réseau, comme le fait que le trafic au centre-ville est souvent saturé, ne sont pas prises en compte; seul le réseau lui-même est considéré.



Figure 1 : Graph1, réseau routier

Réseau routier

Nous obtenons, pour le réseau routier, prenant en compte uniquement les véhicules motorisés personnels, la carte suivante :

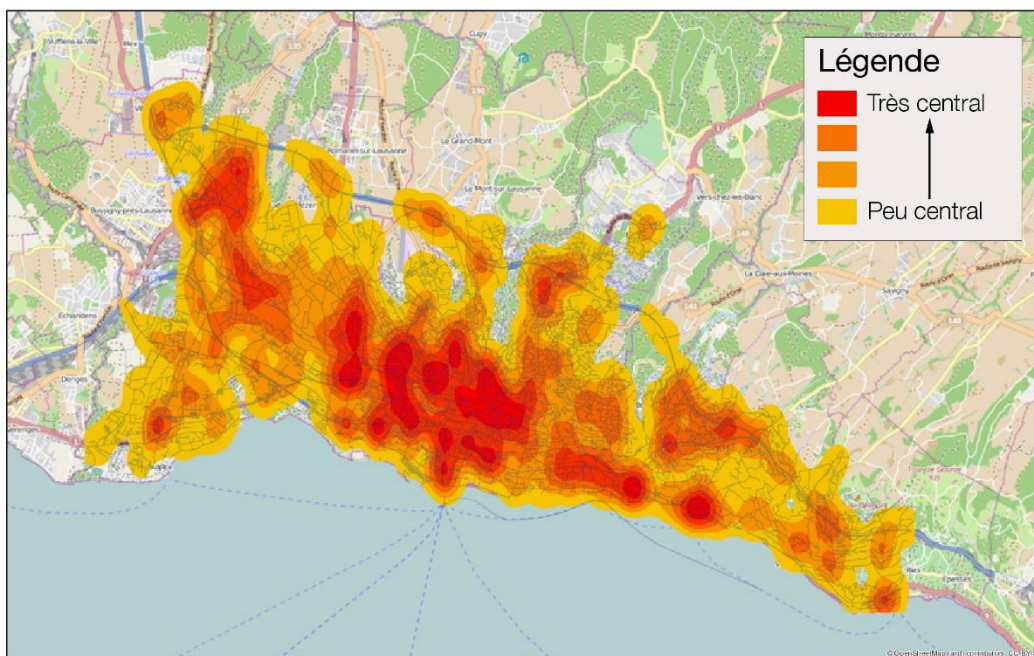


Figure 2 : Centralité du réseau routier lausannois

Nous voyons que tout le centre de Lausanne est extrêmement central lorsque l'on regarde l'ensemble du réseau, agglomération comprise. Ceci s'explique simplement par le fait qu'il contient la majorité des routes, ce qui implique que de nombreux chemins les plus courts passent par ses noeuds. Malgré les limites évoquées plus haut de la méthode, l'effet de l'autoroute située à l'ouest et au nord de Lausanne est bien modélisé; elle permet d'augmenter significativement la "betweenness" de l'ouest lausannois, notamment les zones correspondant à Crissier et Bussigny, alors que ces communes sont situées en périphérie du graphe étudié. Comme expliqué avec l'équation 1, si un noeud est connecté à d'autres noeuds très centraux, il devient central lui-même; cette connexion se fait grâce à l'autoroute, qui permet d'aller rapidement d'un bout à l'autre du réseau. Si nous avions pu modéliser les capacités des routes, cette zone aurait probablement été encore plus centrale.

On note aussi que Renens est situé dans une large zone très centrale, puisque cette commune se trouve entre Lausanne et Crissier. Son réseau routier lui permet d'attendre rapidement Malley (ce lieu lui-même connecté à Lausanne), qui est une des zones les plus centrales du réseau, mais aussi l'autoroute.

Evidemment, cette représentation du réseau routier par un graphe, et les mesures en découlant, est limitée, puisqu'elle n'est qu'une abstraction de la réalité, ne prenant pas en compte toutes les variables et les caractéristiques. Cependant, il a été montré par Kansky (1963) qu'il y a une relation non négligeable entre la géométrie d'un réseau et ses caractéristiques réelles. On peut donc affirmer, aux vues de ce résultat, que Crissier et Renens ont une centralité assez élevée, ce qui laisse supposer que les usagers disposant d'un véhicule personnel motorisé peuvent facilement atteindre les autres points du réseau, leurs conférant une bonne motilité.

Réseau de transports publics

Après avoir réalisé les calculs sur le réseau routier, nous nous sommes intéressés à ce qu'il en était pour le réseau desservi par les transports publics lausannois (TL). Pour ceci, il nous a fallu modéliser le réseau en supprimant tous les liens par lesquels aucun bus ne passe, puis dessiner, sur ArcGIS, les lignes de métro M1 et M2, ainsi que les lignes CFF reliant Renens, Malley, Lausanne et Pully.

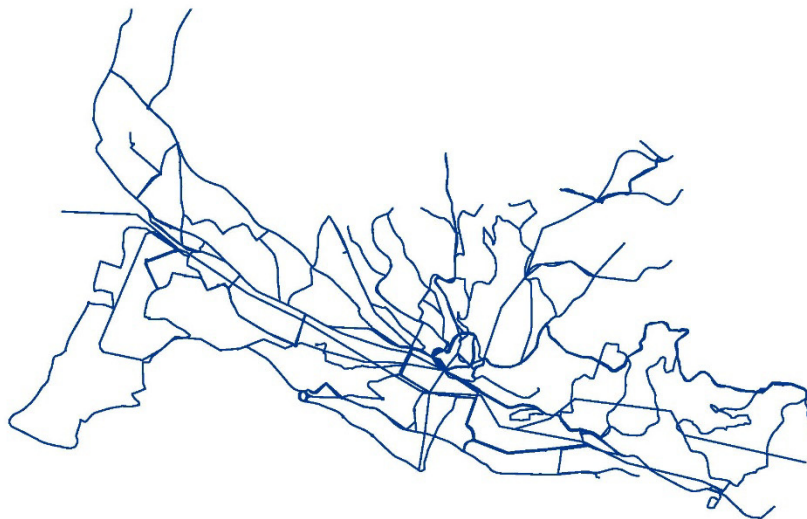


Figure 3 : graphe 2, réseau des transports publics

Là encore, nous n'avons pas pu représenter les différences en terme de capacité entre le métro et le bus, ou encore les fréquences horaires des différentes lignes, ce qui a pour conséquence de diminuer la centralité des noeuds à proximité des gares et des arrêts de métro, et d'augmenter celle des noeuds périphériques.

En réitérant la méthode appliquée au réseau routier, nous obtenons la carte suivante :

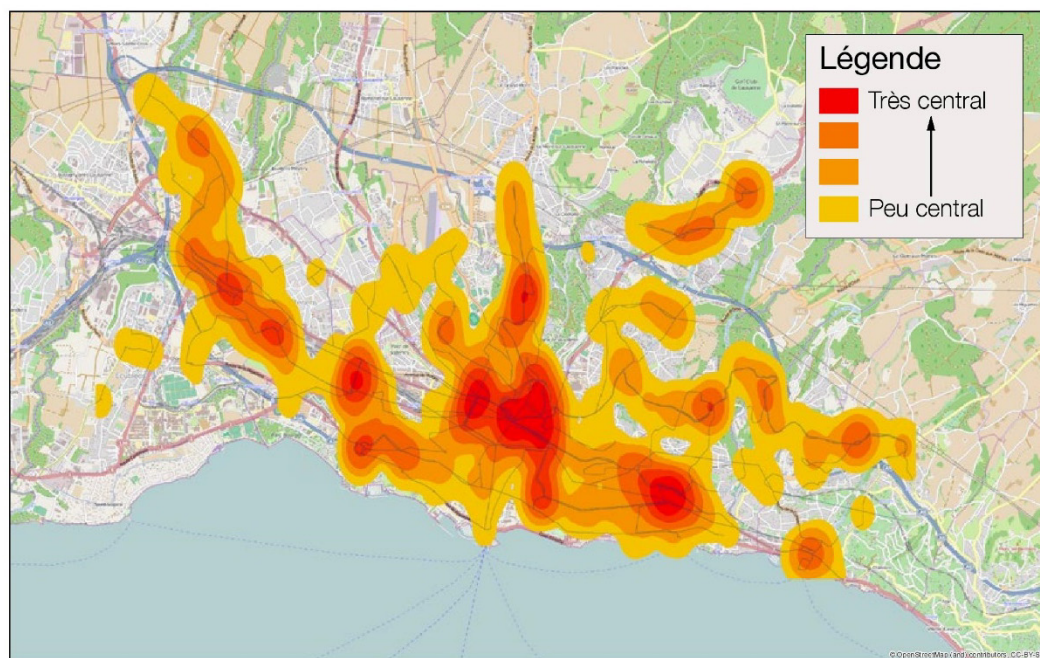


Figure 2 : Centralité du réseau de transports publics

On voit que cette carte est très différente de celle obtenue avec le réseau routier (figure 3); le centre de Lausanne reste très central, mais de façon largement moins étendue. La haute centralité est concentrée sur l'axe Ouchy-Gare-Flon-Riponne, c'est-à-dire le long du métro M2. Elle s'étend à l'ouest jusqu'à la Place Chauderon, où sept lignes de bus se croisent. Un "hotspot" de centralité se dégage aussi à l'est, à proximité de la gare de Pully. On remarque aussi que le nord lausannois, autour de la station de M2 Croisettes, est assez central, du fait qu'il soit accessible à travers le M2. Malley, avec la gare, le M1 et les lignes de bus y passant, reste une zone ayant une grande "betweenness".

La principale différence avec le réseau routier, dans le cadre de notre étude, est visible à Crissier; alors que cette commune était très centrale en considérant la voiture comme moyen de transport, on voit qu'elle est peu connectée au reste du réseau par les transports publics. Renens, quant à elle, reste une zone reliant facilement le reste du réseau. Ceci s'explique par la présence de la gare, mais aussi du terminus du M1 et de plusieurs lignes de bus.

En gardant en mémoire les limites, on peut dire qu'il y a actuellement une immense différence entre Crissier et Renens en terme d'accessibilité et de motilité par les transports publics pour les usagers ne disposant pas de moyens de transports personnels. Cependant, si le modèle permettait d'intégrer les fréquences, mais aussi les vitesses et les capacités des trains et du métro, Renens serait encore plus central, et cela aurait pour conséquence d'augmenter la "betweenness" de Crissier, dont les usagers sont quasiment obligés de passer par Renens pour atteindre Lausanne et le reste du réseau.

Références

Analyse de littérature

Yaniv Altshuler, Rami Puzis, Yuval Elovici, Shlomo Bkhor et Alex Pentland, *One the rationality and optimality of transportation network defense, a network centrality approach*, à paraître dans Securing transportation szstem, protecting critial infrastructure series, 2012

Stephen P. Borgatti, *Centrality and Network Flow*, Social Science Network, no 27, 2005, pages 55-71

Stephen B Borgatti, M.G. Everett, *A graph-theoretic perspective on centrality*, Social Networks 28, 2006, pages 466-484

Stephen Boccaletti, V. Latora, Y. Moreno, M. Chavez, D.-Ung. Hwa, *Complex networks: structure and dynamics*, Phys. Rep. 424, 2006, pages 175–308.

Jiaoe Wanga, Huihui Moa,, Fahui Wang, Fengjun Jina, *Exploring the network structure and nodal centrality of Chi-na's air transport network: A complex network approach*, Journal of Transport Geography, 19, 2011, pages 712–721

Linton C Freeman, *Centrality in networks: I. conceptual clarification*, Social Networks, 1, 1979, pages 215–239

Sybil Derrible, *Network Centrality of Metro Systems*, PLOS One, July 06 2012, 7(7): e40575. doi:10.1371/journal.pone.0040575

Mesures

D. F. Gleich. *Models and Algorithms for PageRank Sensitivity*. PhD thesis, Stanford University, September 2009. URL <http://www.stanford.edu/group/SOL/dissertations/pagerank-sensitivity-thesis-online.pdf>

Kansky, *Structure of transportation network, relation between network geometry and regional characteristics*, 1963.

Cardillo et al., *Structural properties of urban street network*, PhyRevE, 2006

Strano et al., *Urban street network: a comparative analysis of 10 European cities*, EnvPlanB

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adamides, Emmanuel D. et Yannis Mouzakis. 2009. « Industrial ecosystems as technological niches ». *Journal of Cleaner Production*, Vol. 17, n° 2, p. 172-180.
- Ahern, Jack. 2013. « Urban landscape sustainability and resilience: The promise and challenges of integrating ecology with urban planning and design ». *Landscape Ecology*, Vol. 28, n°6, p. 1203-1212.
- Ahern, Jack. 2011. « From fail-safe to safe to fail: sustainability and resilience in the new urban world ». *Landscape and Urban Planning*, Vol.100, n° 4, p. 341-343.
- AIEM, Association Industrielle de l'Est de Montréal. 2015. « L'Est de Montréal mise sur l'écologie industrielle ». Communiqué de Presse, 23 Avril.
- Alain, C et M. Cloitre. 1991. « Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets ». *Physical Review A*, Vol. 44, p. 3552– 3558.
- Allen, Peter. 1997. « Cities and regions as evolutionary complex systems ». *Geographical Systems*, Vol. 4, n° 1, p. 103-130
- Allen Robert C., 2003, « Progress and poverty in early modern Europe ». *Economic History Review*, LVI, Vol. 3, p. 403 à 443
- Puzis, Rami, Altshuler Yaniv, Elovici Yuval, Bekhor Shlomo, Yoram Shiftan et Alex S. Pentland. 2013. « Augmented betweenness centrality for environmentally aware traffic monitoring in transportation networks ». *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 17, n° 1, p. 91-105.
- Andrews, Clinton J.. 2000. « Building a micro foundation for industrial ecology ». *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 4, n° 3, p. 35-51.
- Ariza-Villaverde, Ana B., Francisco J. Jiménez-Hornero et Eduardo Gutiérrez De Ravé. 2013. « Multifractal analysis of axial maps applied to the study of urban morphology ». *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 38, p. 1-10.
- Badariotti Dominique, 2010, « Des fractales pour l'urbanisme ? Quelques pistes de réflexion à partir de l'exemple de Strasbourg-Kehl ». *Cahiers de Géographie du Québec*, Vol. 49.
- Barcellos, Anthony. 1984. « The Fractal Geometry of Mandelbrot ». *College Mathematics Journal*, Vol. 15, n° 98, p. 98-114.

- Batty, Michael, 2005, *Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent based models, and fractals*. London: MIT Press, 563 p..
- Batty, Michael. 2005. « Agents, cells, and cities: new representational models for simulating multiscale urban dynamics ». *UCL*, p.1373-1394.
- Batty Michael, et Paul A Longley. 1994. *Fractal cities: a geometry of form and function*. Academic Press», Academic Press, 394 p.
- Baynes, Timothy M.. 2009, « Complexity in Urban Development and Management: Historical Overview and Opportunities ». *Journal of Industrial Ecology*, Vol.13, n° 2 p. 214-227.
- Baynes, Timothy M. et Thomas Wiedmann. 2012. « General approaches for assessing urban environmental sustainability ». *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Vol. 4, n° 4, p. 458-464.
- Benton, Tim G, Juliet A Vickery, Jeremy D. Wilson. 2003. « Farmland biodiversity is habitat heterogeneity the key? ». *Trends in Ecology and Evolution*, Vol.18, n° 44 p. 182-188.
- Berke, Philip R. et Maria Manta Conroy. 2000, « Are we planning for Sustainable Development? ». *Journal of the American Planning Association*, Vol.66, n° 1, p. 21-33.
- Bettencourt, Luis M. A.. 2013. « The kind of problem a city is ». Santa Fe Institute Working Paper, 2013-03-008, 14 p.
- Boccaletti, Stephen, Vito Latora, Yamir Moreno ,Mario Chavez et Donguk U. Hwang. 2006. «Complex networks: Structure and dynamics ». *Physics reports*, Vol. 424, n° 4, p. 175-308.
- Borgatti, Stephen P. et Martin G. Everett. 2006. «A graph-theoretic perspective on centrality». *Social networks*, Vol. 28, n° 4, p. 466-484.
- Borgatti, Stephen P. 2005. «Centrality and network flow ». *Social networks*, Vol. 27, n° 1, p. 55-71.
- Boons, Frank A. A. et Leo W. Baas. 1997, « Types of industrial ecology: the problem of coordination ». *Journal of Cleaner Production*, Vol. 5, n° 1, p. 79-86.
- Bouwman, M. E., G. de Roo et D. Miller. 2000. « Changing mobility patterns in a compact city: environmental impacts ». *Compact cities and sustainable urban development. A critical assessment of policies and plans from an international perspective*. p. 229-240.

- Brain, David. 2005. « From Good Neighborhoods to Sustainable Cities: Social Science and the Social Agenda of the New Urbanism ». *International Regional Science Review*, Vol.28, n° 2, p. 217-238
- Bristow, David N. et Kennedy Christopher A.. 2013. « Urban Metabolism and the energy stored in cities: Implication for resilience ». *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 0, n° 0, p. 1-12.
- Brown, Mark T., et Sergio Ulgiati. 2004. « Energy quality, emergy, and transformity: HT Odum's contributions to quantifying and understanding systems ». *Ecological Modelling*, Vol. 178 n° 1, p. 201-213.
- Brown, Mark T., Howard T Odum, Jorgensen. 2004. « Energy hierarchy and transformity in the universe ». *Ecological Modelling*, Vol. 178, n° 1, p. 17-28.
- Burrough, P. A. 1981. « Fractal dimensions of landscapes and other environmental data ». *Nature*, Vol. 294 p. 240–242.
- Cadenasso, Mary, L. Pickett, T.A. Stewart et J.M. Grove. 2006. « Dimensions of ecosystem complexity: Heterogeneity, connectivity, and history ». *Ecological Complexity*, Vol 3 n° 1, p. 1-12.
- Cadenasso, Mary, L., Pickett et T.A. Stewart. 2008. « Urban Principles for Ecological Landscape Design and Management: Scientific Fundamentals ». *Cities and the Environment*, Vol 1, n° 2, p. 1-16.
- Cardinale, Bradley J., Justin P. Wright, Marc W. Cadotte, Ian. T. Carroll, Andy Hector, Diane Srivastava, Michel Loreau et Jerome J. Weis. 2007. « Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity ». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 104., n° 46, p. 18123-18128.
- Cai, Z. F., Zhang, L. X., Zhang, B., & Chen, Z. M.. 2009. « Emergy-based analysis of Beijing–Tianjin–Tangshan region in China ». *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 14, n° 12, p. 4319-4331.
- Campbell, Daniel E et Ahjond Garmestani. 2012. « An energy systems view of sustainability: Emergy evaluation of the San Luis Basin Colorado ». *Journal of Environmental Management*, Vol.95, n° 1, p. 72-97.
- Cavric, Branko I.. 2004. « Planners roles and techniques in developing sustainable eco-city: the case of Gaborone, Botswana ». *Spatium*, n° 11, p. 53-76.

- Charbonnel, Eric, Christophe Serre, Sandrine Ruitton, Jean-Georges Harmelin et Antony Jensen. 2002. « Effects of increased habitat complexity on fish assemblages associated with large artificial reef units (French Mediterranean coast) ». *ICES Journal of Marine Science*, Vol 59, p. 208-213.
- Chen, B. et Chen G.Q., 2006, « Ecological footprint accounting based on emergy—A case study of the Chinese society ». *Ecological Modelling*, Vol. 198, n°1, p. 101-114.
- Chenais, Alice, Hadrien Ricca et Pierre-Alexandre Guillemette. 2014, « Comment l'aménagement des réseaux de transport influence-t-il la motilité des personnes? ». Travail du cours Ville et Mobilité, EPFL, 20 p.
- Chertow, Marian et John Ehrenfeld. 2012. « Organizing Self-Organizing Systems ». *Journal of Industrial Ecology*, Vol 16, n°1, p. 13-27
- Chester, Mikhail, Stephanie Pincetl et Braden Allenby. 2012, « Avoiding unintended tradeoffs by integrating life-cycle impact assessment with urban metabolism ». *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Vol. 4, n° 4, p. 451-457.
- Chmiela, Jerzy, Damian Słota, Janusz Szala. 2006. « Analysis of emptiness (lacunarity) as a measure of the degree of space filling and of the internal structure of a set ». *Materials Characterization*, Vol. 56 n° 4-5, p. 421-428.
- Christaller, Walter, 1933, « Die zentralen Orte in Süddeutschland: eine ökonomisch-geographische Untersuchung über die Gesetzmässigkeit der Verbreitung und Entwicklung der Siedlungen mit städtischen Funktionen ». University Microfilms.
- Commoner, Barry. 1997. « The relation between industrial and ecological systems ». *Journal of Cleaner Production*, Vol. 5, n° 1-2, p. 125-129.
- Crissier. 2008. *Règlement communal sur l'aménagement du territoire et les constructions*. Commune de Crissier, Étudié le 14 avril 2015.
- Davis, Kingsley. 1995. « The origin and growth of urbanization in the world ». *American Journal of Sociology*, Vol.60, n° 5, p.429-437.
- Daneshpour, Abdolhadi et Amir Shakibamanesh. 2011. « Compact city; dose it create an obligatory context for urban sustainability? ». *International Journal of Architectural engineering & Urban Planning*, Vol. 2, n°2, p.110-118.
- Derrible, Sybil. 2012. « Network centrality of metro systems ». *PloS one*, Vol. 7, n° 7, e40575.
- Dessemondet Pierre, 2014, *Économie et Territoire*, notes de cours, Lausanne : Laboratoire CEAT, EPFL.

- Dijkema Gerard P. J. et Lauren Basson. 2009. « Complexity and Industrial Ecology Foundations for a Transformation from Analysis to action ». *Journal of Industrial Ecology*, Vol.13 n° 2, p. 514-164
- Dong, Pinliang. 2000. « Test of a new lacunarity estimation method for image texture analysis ». *International journal of. Remote Sensing*, Vol. 21, n° 17, p. 3369–3373.
- Dong, Pinliang. 2009. « Lacunarity analysis of raster datasets and 1D, 2D, and 3D point patterns ». *Computers & Geosciences*, Vol. 35 Issue 10 p. 2100–2110
- Dougherty. Geoffrey et Geoffrey M Henebry. 2001. « Fractal signature and lacunarity in the measurement of the texture of trabecular bone in clinical CT images ». *Medical Engineering & Physics*, Vol. 23, n° 6, p. 369–380.
- Eckelman, Matthew J. et Marian Chertow. 2009. « Quantifying life cycle environmental benefits from the reuse of industrial materials in Pennsylvania ». *Environ- mental Science and Technology*, Vol. 43, n° 7, p. 2550–2556.
- Ehrenfeld, John. 2003. « Putting a Spotlight on Metaphors and Analogies in Industrial Ecology ». *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 7, n° 1, p. 1-4.
- Ehrenfeld, John. 2004. « Industrial ecology: a new field or only a metaphor? ». *Journal of Cleaner Production*, Vol. 12, n° 8-10, p. 825-831
- Ehrenfeld, John. 2007. « Would Industrial Ecology Exist without Sustainability in the Background? ». *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 11, n° 1, p. 73-84.
- Ehrenfeld, John. 2009. « Understanding of Complexity Expands the Reach of Industrial Ecology ». *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 13, n° 2, p. 165-167.
- Ehrlich, Paul R. et Anne H. Ehrlich. 2013. « Can a collapse of global civilization be avoided? ». *Proceeding of the social society Biological sciences*, Janvier 2013, 9 p.
- Elkie, Philip C et Robert S Rempel. 2001. « Detecting scales of pattern in boreal forest landscapes ». *Forest Ecology and Management*, Vol. 147, n° 2-3, p. 253-261.
- Encarnação, Sara, Marcos Gaudiano, Francisco C Santos, Jose A. Tenedorio &. Jorge M. Pacheco. 2012. « Fractal cartography of urban areas ». *Scientific Reports*, Vol. 2, n° 524, p. 1-5.
- Erkman, Suren. 1997. « Industrial Ecology: an historical view ». *Journal of Cleaner Production*, Vol. 5, n° 1-2, p. 1-10.

- Erkman, Suren. 2004. *Vers une écologie industrielle*, 2^e. Éditions-Diffusion Charles Léopold Mayer, Paris, 256 p.
- FAST, Laboratoire Fluides, Automatique et Systèmes Thermiques. Programme de mesure de la dimension fractale, Matlab, Paris-Sud.
- Feagin, R. A.. 2003. « Relationship of second-order lacunarity, Hurst exponent, Brownian motion, and pattern organization ». *Physica A*, Vol.328, n° 3-4, p. 315–321.
- Feagin, R. A., X. B. Wu et T. Feagin. « 2007. Edge effects in lacunarity analysis ». *Ecological modelling*, Vol. 201, n° 3, p. 262-268.
- Fiala, Nathan. 2008. « Measuring sustainability: Why the ecological footprint is bad economics and bad environmental science ». *Ecological Economics*, Vol. 67, n° 4, p. 519-525.
- Fischer-Kowalski Marina, Fridolin Krausmann, Julia K. Steinberger, Robert U. Ayres. 2010. « Towards a low carbon society: Setting targets for a reduction of global resource use ». IFF Social Ecology Vienna, Vienne, Avril 2010, 115. *Social Ecology Working Paper*.
- Fleurke, N. 2009. « Sustainable Urban Design Approaches: an Overview ». The 4th international conference of the international forum on urbanism, the New urban Question-Urbanism beyond Neo-Liberalism, Amsterdam/Delft, p. 469-478. *Forum American Bar Association*.
- Frankhauser, Pierre. 1990. « Aspects fractals des structures urbaines ». *Espace géographique*, Tome 19-20, n°1, p. 45-69.
- Frankhauser, Pierre. 1998. « La formation fractale des tissus urbains ». *Cahiers de géographie du Québec*, Vol 42, n°117, p. 379-398
- Fröhling Magnus., Frank Schwaderer , Hauke Bartusch, et Frank Schultmann. 2013. « A Material Flow-based Approach to Enhance Resource Efficiency in Production and Recycling Networks ». *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 17, n°1, p. 5-19.
- Frosch, Robert A. et Nicholas E. Gallopoulos. 1989. « Strategies for Manufacturing ». *Scientific American*, Volume 261, n° 3, p. 144-152.
- Forman, Richard T.T.. 2014. *Urban ecology: science of cities*. Cambridge University Press, 478 p..
- Foroutan-Pour, K,P. Dutilleul et D.L. Smith. 1999. « Advances in the implementation of the box-counting method of fractal dimension estimation ». *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 105 n° 2-3, p. 195-210.

Geoplanet, <http://www.geoplanet.vd.ch/>, Février et Mars 2014.

Georgescu-Roegen, Nicholas. 1979. *La décroissance Entropie-Écologie-Économie*, 2e édition. Traduction 1997, UQAC, 213 p..

Gerard P. J. Dijkema et Lauren Basson. 2009. « Complexity and Industrial Ecology ». *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 13, n° 2, p. 157-164.

Giampietro Mario et Kozo Mayumi. 1997. « A dynamic model of socioeconomic systems based on hierarchy theory and its application to sustainability ». *Structural Change and Economic Dynamics*, Vol. 8, n° 4, p. 453-469.

Glaeser, Edward L. et Matthew E. Kahn. 2004. « Sprawl and urban growth ». *Handbook of regional and urban economics* Vol. 4 p. 2481-2527.

Gleich, David F.. 2009. « Models and Algorithms for PageRank Sensitivity ». Thèse de doctorat, Stanford University, 176 p..

Godard Olivier, 2004, *La pensée économique face à la question de l'environnement*, Paris, Laboratoire d'économétrie, Cahier n° 2004-025, 28 p.

Gonzato, Guido, Francesco Mulargia et Matteo Ciccotti. 2000. « Measuring the fractal dimensions of ideal and actual objects: implications for application in geology and geophysics ». *Geophysical Journal International*, Vol. 142, n° 1, p. 108-116.

Greenhill, Darrel, Lennart T. Ripke, Adrian P. Hitchman, Graeme A. Jones et Graeme G. Wilkinson. 2003. « Use of Lacunarity index to characterize sub-urban areas for land use planning using IKONOS-2 Multispectral imagery ». *Joint Workshop on "Data Fusion and Remote Sensing over Urban Areas, 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on. IEEE*, Berlin, 22-23 mai 2003, p. 294-298. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

Haase, Dagmar. 2008. « Urban ecology of shrinking cities: an unrecognized opportunity? ». *Nature and Culture*, Vol. 3, n° 1, p. 1-8.

Harvey, David. 2012. *Rebel Cities: From the right to the city to the urban revolution*, Verso, Londres, 187 p..

Halley, John. M., Stephen Hartley, Athanasios S. Kallimanis, W. E. Kunin, J. J. Lennon et S. P. Sgardelis. 2004. Uses and abuses of fractal methodology in ecology ». *Ecology Letters*, Vol. 7, n°3, p. 254-271.

Hanen, Akkari, Bhourri Imenb, Ben Abdallah Asmaa, Patrick Dubois et Bedoui Mohamed Hédi. 2009. « Multifractal modelling and 3D lacunarity analysis ». *Physics Letters A*, Vol. 373, n° 40, p. 3604-3609.

- Harper, Elizabeth M. et Thomas E. Gradel. 2004. « Industrial Ecology: a teenager's progress ». *Technology in Society*, Vol.26, n° 2-3, p. 433-445.
- Hau, Jorge L. et Bhavik R. Bakshi. 2004. « Promise and problems of emergy analysis ». *Ecological Modelling*, Vol. 178, n° 1, p. 215-225.
- Heijungs, Reinout, et Sangwon Suh. 2002. *The computational structure of life cycle assessment*. Vol. 11, Springer Science & Business Media,, 241 p.
- Henderson, Vernon J.. 1986. « Efficiency of Resource Usage and City Size ». *Journal of urban economics*, Vol.19, n° 1, p. 47-70.
- Hern, Warren M.. 2008. « Urban Malignancy: Similarity in the Fractal Dimensions of Urban Morphology and Malignant Neoplasms ». *International journal of anthropology*, Vol. 23, n° 1-2, p. 1 à 19.
- Hess, Gérald. 2010. « The Ecosystem:Model or Metaphor? ». *Journal of Industrial Ecology*, Vol.14 n° 2, p. 270-285.
- Holden, Erling. 2004. « Ecological footprints and sustainable urban form ». *Journal of Housing and the Built Environment*, Volume 19, n° 1, p. 91-109.
- Hoechstetter, Sebastian, Walz Ulrich et Nguyen Xuan Thinh. 2011. « Adapting lacunarity techniques for gradient-based analyses of landscape surfaces ». *Ecological Complexity*, Vol. 8, n° 3, p. 229-238.
- Hooker, Cliff. 2011. *Handbook of the Philosophy of Science, Volume 10: Philosophy of Complex Systems*. North Holland, Elseiver, 936 p..
- Huang, Shu-li. 1998. « Urban Ecosystems, energetic hierarchies, and ecological economics of Taipei metropolis ». *Journal of Environmental Management*, Vol. 52, n° 1, p. 39-51.
- Huang, Shu Lui, Wei-Chieh Kao et Chun-Lin Lee. 2007. « Energetic mechanism and development of an urban landscape system ». *Ecological Modelling*, Vol. 201, n° 3-4, p. 495-506.
- Hubacek, Klaus et Stefan Giljum. 2003. « Applying physical input-output analysis to estimate land appropriation (ecological footprints) of international trade activities ». *Ecological economics*, Vol. 44, n° 1, p. 137-151.
- Huggett, Richard H.. 1999. « Ecosphere, biosphere, or Gaia? What to call the global ecosystem ». *Global Ecology and Biogeography*, Vol. 8, p. 425-431.

- Hsui, Che-Yu et Chia-Chun Wang. 2013. « Synergy between fractal dimension and lacunarity index in design of artificial habitat for alternative SCUBA diving site ». *Ecological Engineering*, Vol. 53, p. 6-14.
- Isenmann, Ralf. 2003. « Further Efforts to Clarify Industrial Ecology's Hidden Philosophy of Nature ». *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 6, n° 3, p. 27-48
- ISO, Organisation internationale de normalisation. 2006. *Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Exigences et lignes directrices*, 1^{ère} édition, Genève, Organisation internationale de normalisation, 49 p.
- Jabareen, Yosef Rafeq. 2006. Sustainable Urban Forms: Their Typologies, Models, and Concepts ». *Journal of Planning Education and Research*, Vol.26, n° 1 p. 38-52.
- Jabareen, Yosef. 2015. *The Risk City: Cities Countering Climate Change: Emerging Planning Theories and Practices around the World*, Lecture Notes in Energy, Volume 29. Haifa, Springer, 204 p..
- Jacobs, Jane. 1961. *The death and life of great American cities*. New York, Vintage Books, 458 p..
- Jacobsen, Noel Brings. 2006. « Industrial Symbiosis in Kalundborg, Denmark A Quantitative Assessment of Economic and Environmental Aspects ». *Journal of Industrial Ecology*, Vol.10, n° 1-2, p. 239-255.
- Jensen, Paul D., Lauren Basson et Matthew Leach. 2011. . « Reinterpreting Industrial Ecology ». *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 15, n° 5, p. 680-692.
- Jin, X.C. et S.H. Ong. 1995. « A practical method for estimating fractal dimension ». *Pattern Recognition Letter*, Vol 16, n°5, p. 457-464
- Kay, James J., Henry A. Regier, Michelle Boyle et Francis George. 1999. « An ecosystem approach for sustainability: addressing the challenge of complexity ». *Futures*, Vol. 3, n° 7, p. 721-742.
- Kay, James J.. 2002. « On Complexity Theory, Exergy and Industrial Ecology: Some Implications for Construction Ecology». Dans : *Construction Ecology: Nature as a Basis for Green Buildings*, sous la dir. De Kibert, Charles, Jan Sendzimir, G. Bradley Guy , p.72-107. Londres: Spon Press.
- Kenkel N. C. et D. J. Walker. 1993. « Fractals and ecology ». *Ahstracta botanica*, Vol. 17 n° 1-2 p. 53-70.

- Kingsley, Davis. 1955. « The origin and growth of urbanization in the world ». *American Journal of Sociology*, Vol. 60, World Urbanism, p. 429-437.
- Kirkpatrick Lee Anne et John F. Weishampelb. 2005. « Quantifying spatial structure of volumetric neutral models ». *Ecological Modelling*, Vol. 186, n° 3, p. 312-325.
- Krugman, Paul. 1993. « First Nature, Second Nature and metropolitan location ». *Journal of Regional Science*, Vol. 33, n° 2, p. 129-144.
- Kunin, William E., Stephen Hartley et Jack J. Lennon. 2000. « Scaling down: on the challenge of estimating abundance from occurrence patterns ». *The American Naturalist*, Vol. 156, n° 5, p. 560-566.
- Lan, Chun-Hsiung, Chung-Chiang Chen et Che-Yu Hsui. 2004. « An approach to design spatial configuration of artificial reef ecosystem ». *Ecological Engineering*, Vol. 22, n° 4-5, p. 217-226.
- Lan, Chun-Hsiung et Che-Yu Hsui. 2006a. « Insight from complexity: a new approach to designing the deployment of artificial reef communities ». *Bulletin of Marine Science*, Vol. 78, n° 1, p. 21-28.
- Lan, Chun-Hsiung et Che-Yu Hsui. 2006b. « The deployment of artificial reef ecosystem: modelling, simulation and application ». *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 14, n° 5, p. 663-675.
- Lausanne. Règlement du 26 Juin 2006. *Plan d'affectation générale, direction des travaux*. Document PDF. Lausanne, Vaud, Suisse : Direction des travaux, service d'urbanisme.
- Lave, Lester B., Elisa Cobas-Flores, Christ T. Hendrickson et Francis C. McMichael. 1995. « Using input-output analysis to estimate economy-wide discharges ». *Environmental Science & Technology*, Vol. 29, n° 9, p. 420A-426A.
- Le Corbusier, Charles-Édouard, 1929. *The city of To-Morrow and its planning*, 8^e éd. New York: Dover Publications, 302 p.
- Lee, Chun-Lin, Shu-Li Huang et Shih-Liang Chan. 2009. « Synthesis and spatial dynamics of socio-economic metabolism and land use change of Taipei Metropolitan Region ». *Ecological Modelling*, Vol. 220, n° 21, p. 2940-2959.
- Lewy, Michael. 2006. « New urbanist Zoning for Dummies ». *Alabama Law Review*, Vol. 58, n° 257, p. 1 à 56.
- Li, Bai-Lian. 2000. « Fractal geometry applications in description and analysis of patch patterns and patch dynamics ». *Ecological Modelling*, Vol. 132, n° 1, p. 33-50.

- Li, Jian Li, Qian Du, Caixin Sun. 2009. « An improved box-counting method for image fractal dimension estimation ». *Pattern Recognition*, Vol. 42, n° 11, p.2460-2469.
- Li, H. et James F. Reynolds. 1995. « On Definition and Quantification of Heterogeneity ». *Oikos*, Vol. 73, n° 2, p. 280-284.
- Ligmann-Zielinska, Arika, Richard Church et Piotr Jankowski. 2008. « Spatial optimization as a generative technique for sustainable multiobjective land-use allocation ». *International Journal of geographical Information Science*, Vol. 22, n° 6, p. 601-622.
- Loiseau, Eléonore, Guillaume, Junqa, Philippe Roux et Véronique Bellon-Muarel. «Environmental assessment of a territory : an overview of existing tools and methods». *Journal of Environmental Management*, Vol. 112, p. 213-225.
- Lombardi, D. Rachel, Donald Lyons, Han Shi et Abhishek Agarwal. 2012. « Industrial Symbiosis Testing the Boundaries and Advancing Knowledge ». *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 16, n° 1, p. 2-7.
- aLotka, Alfred J. 1922.. « Natural selection as a physical principle ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 8, n° 6, p.151.
- bLotka, Alfred J.. 1922. « Contribution to the energetics of evolution ». *Proceedings of the National academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 8, n° 6, p.147.
- Lowe, Ernest A. et Laurence K. Evans. 1995. « Industrial Ecology and Industrial Ecosystems». *Journal of Cleaner Production*, Vol. 3, n° 1-2, p. 47-53.
- Yadvinder, Malhi et Rosa María Román-Cuesta. 2008. « Analysis of lacunarity and scales of spatial homogeneity in IKONOS images of Amazonian tropical forest canopies ». *Remote Sensing of Environment*, Vol. 112, n° 5, p. 2074–2087.
- Mandelbrot, Benoit. 1967. « How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension ». *New Series*, Vol. 156, n° 3775, p. 636-638.
- Mandelbrot, Benoit. 1983, *The fractal Geometry of Nature*, vol. 1. New York, W.H. Freeman and Co., 495 p..
- Mandelbrot, Benoit, 1985, « Self-affinity and fractal dimension ». *Physica Scripta*, Vol 32, n° 4, p. 257-260
- Månsson, B. Å. et J. M. McGlade. 1993. « Ecology, thermodynamics and HT Odum's conjectures ». *Oecologia*, Vol. 93, n° 4, p. 582-596.

- McIntyre, Nancy E et John A. Wiens. 2000. « A novel use of the lacunarity index to discern landscape function ». *Landscape Ecology*, Vol. 15, n° 4, p. 313-321.
- Mckay, Scott. 2015. *Pour un Québec vert et bleu : le virage vert, l'économie et la gouvernance*. Québec : Presses de l'Université Laval, 180p..
- Middletown, Guy D.. 2012. « Nothing Lasts Forever: Environmental Discourses on the Collapse of Past Societies ». *Journal of Archaeological Research*, Vol. 20, n° 3, p. 257–307.
- Miller, Ronald E., and Peter D. Blair. 2009. *Input-output analysis: foundations and extensions*, 2^e éd.. New York : Cambridge University Press, 784 p.
- Mirata, Murat. 2004. « Experiences from early stages of a national industrial symbiosis programme in the UK: determinants and coordination challenges ». *Journal of Cleaner Production*, Vol. 12, n° 8, p. 967-983.
- Montréal. 2015 Règlement d'urbanisme de l'arrondissement Arrondissement Rosemont-Petite-Patrie, À jour au 25 février 2015 2013 p.
- Montréal en Statistiques. 2013a. *Profil sociodémographique Arrondissement Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension*. Montréal : Direction de l'urbanisme et du développement économique, 21 p..
- Montréal en Statistiques. 2013b. *Profil Économique Arrondissement Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension*. Montréal : Direction de l'urbanisme et du développement économique, 30 p..
- Montréal en Statistiques. 2013c. *Profil sociodémographique Arrondissement Rivière-des-Prairies-Pointe au tremble*. Montréal : Direction de l'urbanisme et du développement économique, 21 p..
- Montréal en Statistiques. 2013d. *Profil Économique Arrondissement Rivière-des-Prairies-Pointe au tremble*. Montréal : Direction de l'urbanisme et du développement économique, 30 p..
- Moore, Jason. 2010. « The End of the Road? Agricultural Revolutions in the Capitalist World-Ecology:, 1450–2010 ». *Journal of Agrarian Change*, Vol. 10, n° 3, p. 389–413.
- Myint, Soe et Nina Win Lam. 2005. « A study of lacunarity-based texture analysis approaches to improve urban image classification ». *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol 29, n° , p. 501–523.
- Nations Unies Habitat. 2008. *State of the World's Cities 2008/2009 : Harmonious Cities, Series: State of the World's Cities Reports*. London : Earthscan, 224 p..

- Neuman, Michael. 2005. « The compact city fallacy ». *Journal of Planning Education and research*, Vol. 25, n° 1, p. 11-26.
- Newman, Peter. 1991. « Cities and oil dependence ». *Cities*, Vol. 8, n° 3, p. 170-173.
- Nichols, William F, Keith T. Killingbeck et Peter V. August. 1998. « The influence of geomorphological heterogeneity on biodiversity: A Landscape perspective ». *Conservation Biology*, Vol. 12, n° 2, p. 371-378.
- Niemela, Jari. 1999. « Ecology and urban planning ». *Biodiversity and Conservation*, Vol. 8, n°1, p. 119-131.
- Odum, Eugene P. et Gary W. Barrett. 2005. *Fundamentals of ecology*, 5e Édition, Belmont, CA: Thomson Brooks/Cole, 598 p..
- Odum, Howard T. et Nils Peterson. 1996. « Simulation and evaluation with energy systems blocks ». *Ecological Modelling*, Vol. 93, n°1, p. 155-173.
- Odum, Howard T.. 2002. « Explanations of ecological relationships with energy systems concepts ». *Ecological Modelling*, Vol. 158, n°3, p. 201-211.
- Odum, Howard T.. 2007. *Environment, power, and society for the twenty-first century: the hierarchy of energy*. New York : Columbia University Press, 418 p.
- OFS, Office Fédéral de la Statistique. 2014. « Statistiques des superficie ». En ligne, document Excel, <http://www.bfs.admin.ch/>. Consulté le 19 mai 2015
- Office for National Statistics, England and Wales United Kingdom. 2001. « Population densité UV02 ». Document Excel, <http://www.ons.gov.uk/>. Consulté le 13 mars 2014
- Ottelin, Juudit, Jukka Heinonen et Seppo Junnila. 2014. « Greenhouse gas emissions from flying can offset the gain from reduced driving in dense urban areas ». *Journal of Transport Geography*, Vol. 41, p.1-9.
- Parrot, Lael. 2010. « Measuring ecological complexity ». *Ecological Indicators*, Vol. 10, n°6, p. 1069-1076.
- Pentland, Alex P.. 1984. « Fractal-Based Description of Natural Scenes ». *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.6, n° 6, p. 661-674.
- Petric, Jasna. 2004. « Sustainability of the city and its ecological footprint ». *Spatium*, Vol. 11, p. 48-52.

- Plotnick, Roy E., Robert H. Gardner et Robert V. O'Neil. 1993. « Lacunarity indices as measures of landscape texture ». *Landscape Ecology*, Vol. 8, n° 3, p. 201-211.
- Plotnick, Roy E., R H Gardner, W. W. Hargrove, K. Prestegard et M. Perlmutter. 1996. « Lacunarity analysis: A general technique for the analysis of spatial patterns ». *Physical Review E*, Vol.53, n° 5, p. 5461-5468.
- Porta, Sergio et Vito Latora. 2008. « Centrality and cities: multiple centrality assessment as a tool for urban analysis and design », dans *New Urbanism and Beyond: Designing Cities for the Future*, sous la dir.de Tigran Haas, p. 140-145. New York: Rizzoli, 350p.
- Portugali, Juval. 2011. *Complexity, Cognition and the City: Understanding complex systems*. Londres, New York : Springer Science & Business Media, 412 p..
- Rebitzer, Gerald, Tomas Ekvall, Rolf Frischknecht, D. Hunkeler, G. Norris, T. Rydberg, W.-P. Schmidt, S. Suh, B.P. Weidema et D.W. Pennington. 2004. « Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications ». *Environment international*, Vol. 30, n° 5, p. 701-720.
- Rees William et Mathis Wackernagel. 1996. « Urban ecological footprints: why cities cannot be sustainable and why they are a key to sustainability ». *Environmental Impact Assessment Review*, n° 16, p. 223-248.
- Ridoutt, Bradley et Stephan Pfister. 2013. « Towards and Integrated Family of Footprint Indicators ». *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 17, n° 3, p. 337-339.
- Richardson, Lewis F.. 1961. « The problem of contiguity: an appenxi of statistics of deadly quarrels ». *Geneneral System Yearbook*, Vol. 6, n° 13, p. 139-187.
- Robert, K. H., B. Schmidt-Bleek, J. Aloisi de Larderel, G. Basile, J. L. Jansen, R. Kuehr, P. Price Thomas, M. Suzuki, P. Hawken et Mathis Wackernagel. 2002. « Strategic sustainable development : Selection, design and synergies of applied tools ». *Journal of Cleaner Production*, Vol. 10, n° 3, p. 197-214.
- Rockström, Johan, Will Steffen, Kevin Noone, Åsa Persson, . Stuart F. Chapin, Eric F. Lambin, Timothy M. Lenton, Marten Scheffer, Carl Folke, Hans Joachim Schellnhuber, Björn Nykvist, Cynthia A. de Wit, Terry Hughes, Sander van der Leeuw, Henning Rodhe, Sverker Sörlin Peter K. Snyder, Robert Costanza, Uno Svedin, Malin Falkenmark, Louise Karlberg, Robert W. Corell, Victoria J. Fabry, James Hansen, Brian Walker, Diana Liverman, Katherine Richardson, Paul Crutzen et Jonathan A. Foley. 2009. « A safe operating space for humanity ». *Nature*, Vol. 461, n° 7263, p. 472-475

- Rodrigue, Jean-Paul, Claude Comtois et Brian Slack. 2006. *The geography of transport systems*, Third Edition. Londres : Routledge, 416 p..
- Rotmans, Jan et Derk Loorbach. 2009. « Complexity and transition management ». *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 13, n° 2, p. 184-196.
- Roy Ankur, Edmund Perfect, William M. Dunnea, Noelle Odling, Jung-Woo Kim. 2010. «Lacunarity analysis of fracture networks: Evidence for scale-dependent clustering ». *Journal of Structural Geology*, Vol. 32, n° 10, p.1444-1449.
- Sales-Pardo, Marta, Roger Guimerà, André A. Moreira et Luis A. nunes Amara. 2007. «Extracting the hierarchical organisation of complex systems ». *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United-States*, Vol. 104, n° 39, p. 15224-15229.
- Sanders, Irene T.. 2008. *Complex systems thinking and New Urbanism, New urbanism and beyond: designing cities for the future*. New York : Rizzoli, p. 275-279.
- Saunders, Sari C., Jiquan Chen, Thomas D., Drummer, Eric J. Gustafson et Kimberley D. Brososke. 2005. « Identifying scales of pattern in ecological data: a comparison of lacunarity, spectral and wavelet analyses ». *Ecological Complexity*, Vol. 2, n° 1, p. 87-105.
- Sayed, Kinda Al et Alasdair Turner. 2012, Emergence and self-organization in urban structures. Dans *Multidisciplinary Research on International Conference on Geographic Information Science: Geographical Information in Europe and Beyond* (Avignon, 24-27 avril 2012), p. 210-215. Proceedings of the AGILE'2012.
- Seppälää, Jyri, Matti Melanen, Ilmo. Mäenpää, Sirkka Koskela, Jyrki Tenhunen, et Marja-Riitta Hiltunen. 2005. « How can the eco-efficiency of a region be measured and monitored? ». *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 9, n° 4, p. 117-130.
- Shen, Guoqiang. 2002. « Fractal Dimension and fractal growth of urbanized areas ». *International Journal Geographical Information Science*, Vol 16, n°5, p. 419-437.
- Sim, Aaron, Sophia N. Yaliraki, Mauricio Barahona et Michael P. H. Stumpf. 2015. « Great cities look small ». *Journal of The Royal Society Interface*, Vol. 12, n° 109, p.20150315.
- Smith, T. G., G. D Lange et W. B. Marks. 1996. « Fractal methods and results in cellular morphology—dimensions, lacunarity and multifractals ». *Journal of neuroscience methods*, Vol. 69, n° 2, p. 123-136.
- Statistiques Vaud, 2014, « Données du recensement ». En Ligne, document Excel. <http://www.scris.vd.ch/>. Consulté le 19 mai 2015.

- Steemers, Koen. 2003. « Energy and the city: density, buildings and transport ». *Energy and buildings*, Vol. 35, n° 1, p. 3-14.
- Su M. R., Z. F. Yang, B. Chen, et Sergio Ulgiati. 2009. « Urban ecosystem health assessment based on emergy and set pair analysis: A comparative study of typical Chinese cities ». *Ecological modelling*, Vol. 220, n° 18, p. 2341-2348.
- Sukopp, Hebert. 2002. « On the early history of urban ecology in Europe ». *Preslia*, Vol. 74, p. 373–393.
- Steiner, Frederick. 2002. *Human ecology: Following nature's lead*. Washington D.C.: Island Press, 241 p.
- SwissTopo, 2007. « Calcul ARE ». En Ligne. www.swisstopo.admin.ch. Consulté le 25 mai 2014
- Talen, Emily. 2006. « Design that enables diversity: the complications of a planning ideal ». *Journal of planning literature*, Vol. 20 Issue 3, p. 233-249
- Thomas, Isabelle, Pierre Frankhauser et Dominique Badariotti. 2010, « Comparing the fractality of European urban neighbourhoods: do national contexts matter? ». *Journal of Geographical Systems*, Vol. 14, n° 2, p. 189-208.
- Tilley, David Rogers. 2003. « Industrial ecology and ecological engineering ». *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 7, n° 2, p. 13-32.
- Tolle, Charles R., Timothy R. McJunkin et David J. Gorsich. 2008. « An efficient implementation of the gliding box lacunarity algorithm ». *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol.234, n° 3, p. 306-315.
- Trelex (Commune de). À jour, 24 Juillet 2006. *Règlement général sur l'aménagement du territoire et les constructions*. Aménagement du territoire communal, Commune de Trelex.
- Ulanowicz, Robert E.. 1996. *The propensities of evolving systems, Evolution, Order and Complexity*, Sous la dir. de Khalil Elias L. et Kenneth E. Boulding, p. 217-233. London: Routledge, 296 p..
- Ulgiati, Sergio et Mark T. Brown. 2009. « Emergy and ecosystem complexity ». *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 14, n° 1, p. 310-321.
- Valero, Antonio, Sergio Usón, César Torres et Alica Valero. 2010. « Application of thermoeconomics to industrial ecology ». *Entropy*, Vol. 12, n° 3, p. 591-612.

- Van den Bergh, Jeoren et Harmen Verbruggen. 1999. « Spatial sustainability, trade and indicators: an evaluation of the ecological footprint ». *Ecological Economics*, Vol. 29, n° 1, p. 61-72.
- Vaud, Département de l'économie, Service du développement territorial. 2011. Application du plan directeur cantonal, Dimensionnement de la zone à bâtir. Canton de Vaud, janvier 2011. 28 p.
- Véron, Jacques, 2007, « La moitié de la population mondiale vit en ville ». *Population Et Sociétés*, n° 435, p. 3-6.
- Von Thünen, H. 1826. *Der Isolierte Staat in Beziehung auf landwirtschaft und Nationaleconomie*. Hambourg.
- Hern, Warren M.. 2008. « Urban Malignancy: Similarity in the Fractal Dimensions of Urban Morphology and Malignant Neoplasms ». *International Journal of Anthropology*, Vol. 23, n° 1-2. p. 1-19.
- Wackernagel, Mathis, Larry Onisto, Patricia Bello, Alejandro Callejas Linares, Ina Susana López Falfán, Jesus Méndez García, Ana Isabel Suárez Guerrero et Ma Guadalupe Suárez Guerrero. 1999. « National natural capital accounting with the ecological footprint concept ». *Ecological economics*, Vol. 29, n° 3, p. 375-390.
- Wackernagel, Mathis, Justin Kitzes, Dan Moran, Steve Goldfinger et Mary Thomas. 2006. «The ecological footprint of cities and regions: comparing resource availability with resource demand ». *Environment and Urbanization*, Vol.18, n° 1, p. 103-112.
- Wheeler, Stephen. M. 2002. « Constructing sustainable development/safeguarding our common futur: Rethinking sustainable development ». *Journal of the American Planning Association*, 68, n° 1, p. 110-111.
- Wiens, J.A.. 2000. « The Ecological Consequences of Environmental Heterogeneity». *The 40th Symposium of the British Ecological Society*. (University of Sussex, 23-25 Mars 1999), Numéro 40, British Ecological Society Symposium, pages 23-25. Sous la dir. de Hutchings M. J., Libby A. John et Alan J. A. Stewart. Grande-Bretagne : Cambridge University Press, 434 p.
- Weisz, Helga et Faye Duchin. 2006. « Physical and monetary input–output analysis: What makes the difference? ». *Ecological Economics*, Vol. 57, n° 3, p. 534-541.
- Wu, Ben X. et Daniel Z. Sui. 2001. « An initial exploration of a lacunarity-based segregation measure ». *Environment and Planning B*, Vol. 28, n° 3, p. 433-446.

- Wu, Yegang, Naiming Wang et Ken Rutchey. 2006. « An analysis of spatial complexity of ridge and slough patterns in the Everglades ecosystem ». *Ecological Complexity*, Vol.3, n°3, p. 189-192.
- Wu, Hao , Yurong Sun, Wenzhong Shi, Xiaoling Chen et Dongjie Fu. 2013. « Examining the Satellite-Detected Urban Land Use Spatial Patterns Using Multidimensional Fractal Dimension Indices ». *Remote Sensing*, Vol. 5, n°10, p. 5152-5172.
- WWF, Alan Calcott et Jamie Bull. 2007. Ecological footprint of British city residents. CarbonPlan
- Yadav, Jaswant, K., J. S. Bagla et Nishikanta Khandai. 2010. « Fractal dimension as a measure of the scale of homogeneity ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 405, p. 2009-2015
- Zhang, Yan, Y. W. Zhao, Z. F. Yang, B. Chen et G. Q. Chen. 2009. « Measurement and evaluation of the metabolic capacity of an urban ecosystem ». *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 14 n° 4, p. 1758-1765.
- Zhang, Yan. 2013. « Urban metabolism: a review of research methodologies ». *Environmental pollution*, Vol. 178, p. 463-47.
- Zhu, L. P., H. T. Li, J. Bouldin, R. John, M. C. Yan et T. Liang. 2012. « Emergy-based environmental accounting: evaluation of Inner Mongolia Autonomous Region ». *Acta Ecologica Sinica*, Vol. 32, n° 2, p. 74-88.
- Zotic Vasile, Diana-Elena Alexandru et Viorel Puiu. 2015. « Functional Zoning of the City / Village Area and Its Contribution to the Sustainable Development of Settlements ». *Journal of Settlements and spatial planning*, Vol.1, n°2, p. 181-189.

