

Université de Nice Sophia Antipolis
UFR Lettres, Arts et Sciences Humaines
Ecole doctorale de Lettres, Sciences Humaines et Sociales
UMR 7300 ESPACE

La forme en 3D dans l'analyse spatiale des territoires urbanisés et de la durabilité urbaine

Présentée par Marie Sevenet

Sous la direction de Mme Christine Voiron-Canicio

Thèse en vue de l'obtention du grade de Docteur de l'Université de Nice Sophia Antipolis en Géographie et Aménagement.

Soutenue publiquement le 19 avril 2013 devant le jury composé de :

Monsieur Giovanni RABINO, Professeur, Politecnico di Milano, Rapporteur

Monsieur Didier JOSSELIN, Directeur de Recherche, Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse, Rapporteur

Madame Catherine MERING, Professeure, Université Paris-Diderot Paris 7, Examinatrice

Monsieur Thierry JOLIVEAU, Professeur, Université Jean Monnet-Saint-Etienne, Président

Madame Christine VOIRON-CANICI, Professeure, Université Nice Sophia Antipolis, Directrice

Remerciements

Ce document n'est pas uniquement le résultat d'un travail universitaire, mais également celui d'un choix de vie. Après toutes ces années, je ne pense, malheureusement, pas me tromper en disant que ces remerciements ne seront pas exhaustifs ; tant d'amitiés et de rencontres, personnelles et professionnelles, ont marqué ce (très) long chemin.

Mme Christine Voiron, votre soutien et vos encouragements ont rendu possible l'aboutissement de ce travail. Depuis notre rencontre lors de ma deuxième année universitaire, il y a trop d'années pour pouvoir les compter, votre passion et votre enthousiasme m'ont confortée dans le choix de la recherche. Je ne le regrette toujours pas.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury, Madame Catherine Mering, Messieurs Thierry Joliveau, Didier Josselin et Giovanni Rabino, qui rendent compte de ce travail. J'en suis très honorée.

Je tiens à remercier chaleureusement l'ensemble de l'UMR ESPACE qui, depuis ma maîtrise, m'a offert un cadre de travail constructif et plus particulièrement l'équipe niçoise (ou ex). Gilles, Sandra, Karine, Véronique, Corinne, Diego, vous m'avez apporté bien plus qu'une collaboration. Vos encouragements, votre aide et votre écoute ont été très précieux. Samuel, Fabrice et Giovanni vos conseils et votre expertise ont nourri mes réflexions.

Ce travail n'aurait pu être mené à bien sans eux : les doctorants. Tout d'abord, je souhaite remercier les copains de galère des premiers jours : Pascale, Jérôme, Nicolas, Alexis et Maria. Pascale et Jérôme, cette page ne suffirait pas parce que nous avons vécu ensemble cette tranche de vie. Je tiens à également à remercier ceux des derniers jours : Floriane, Sophie, Dorian pour la convivialité et la gaieté quotidienne que vous avez apportée.

Je ne peux pas oublier toutes ces personnes proches qui m'ont encouragée, aidée et parfois subie durant ces années : tout d'abord, merci aux niçois - Salima, Didier, Julie, Alexandre, Amandine, Mohammed, Pascaline, Vincent et merci, à ceux qui sont devenus plus que des collègues : Elodie, Laetitia, Alessandra, Yoann, Elise, Sylvaine, Benjamin, Maxime, Pierre I, Pierre L, Jean-Marie, Clara, Sophie, Carolina, Ines, Monika, Benoît, Annabelle, Pascal, Lucile, David, Laetitia, Vincent, Emmanuel, Guillaume. Merci à tous pour vos encouragements, votre présence et votre patience.

Pour finir, je souhaite remercier ma famille sans qui ça ne serait jamais arrivé.

Résumé

Depuis le début XXI^{ème} siècle, les documents d'urbanisme s'attèlent à « reconstruire la ville sur la ville » et même à densifier le bâti existant. Or, non seulement les aspirations de la population ne vont pas nécessairement dans le même sens, mais encore, ce mode de construction implique une connaissance fine du volume urbain. L'attente de nouvelles méthodes d'analyse des territoires, combinant 2D et 3D, est forte dans le domaine de l'aménagement du territoire afin de densifier les espaces urbains et combler les vacuités tout en surélevant le bâti existant, et en respectant les principes d'un développement urbain durable soucieux de la qualité de vie. Cependant, les méthodes utilisées à ce jour à des fins de recherche fondamentale ou appliquée en aménagement, intègrent peu la 3D, c'est à dire la dimension verticale des éléments géographiques, naturels ou anthropiques.

Le travail de recherche envisagé dans la thèse a pour objet l'intégration de la 3D dans l'analyse spatiale à l'aide de SIG, de l'analyse d'image et de l'analyse morphologique afin de proposer des nouvelles méthodes et des outils utiles aux acteurs du territoire.

La première partie du travail vise à comprendre ce qu'est l'espace et la forme en 3D ainsi que leur pertinence pour l'analyse géographique. Les concepts, les outils et les méthodes existantes offrent une base à la réflexion et permettent de cibler le champ d'étude.

Les différentes acceptions de l'espace et les propriétés qui lui sont associées conduisent à définir l'espace comme un support, un substrat, une étendue, un cadre de référence tridimensionnel où se localisent les objets et où se déroulent nos actes. Ses dimensions sont au moins au nombre de trois (longueur, largeur et hauteur). La conceptualisation de la forme éclaire sur celle de l'espace. L'agencement des formes donne un sens à l'espace où elles se déploient. Les formes sont la matérialité de sous-espaces ; de ce fait, l'espace peut être tour à tour : forme et espace, il est donc multiscalair.

La seconde partie situe la forme urbaine dans le contexte urbanistique. La ville est constituée de formes et est façonnée par des processus qui font d'elle un espace en trois dimensions. Alors que la troisième dimension est encore très peu mobilisée dans l'explication des phénomènes qui se déploient dans l'espace urbain, la tridimensionnalité est envisagée ici, comme facteur explicatif de son évolution socio-spatiale. La recherche de la qualité de vie, désormais au cœur des débats sur la durabilité urbaine, conduit à s'interroger sur l'organisation urbaine optimale. L'optimisation des formes urbaines sous contraintes environnementales, sociales et économiques ouvre d'importantes perspectives de recherches car elle permet d'envisager la maximisation des satisfactions sociétales.

Le caractère cognitif des formes urbaines nécessite l'implication et la participation des habitants à tout processus de sa modification. La démocratisation du SIG rend accessible, aux non-spécialistes, l'information spécialisée ou thématiques, et permet de réaliser différents niveaux d'analyse, de la visualisation de données à la mise en relation d'objets spatiaux à la simulation de phénomène. La troisième dimension est utilisée, à l'heure actuelle,

principalement pour la visualisation des espaces géographiques. Les SIG intègrent désormais la 2D_{1/2} voire la 2D_{3/4} mais le manque d'opérateurs topologiques, essentiels en analyse spatiale, limite leurs capacités. Toutefois, ces limites n'ont pas empêché le développement d'applications intégrant les formes urbaines dans leurs trois dimensions. Potentiel d'installation en énergies renouvelables, simulations d'impact, analyse spatiale, toutes ces analyses tendent vers une modélisation globale des ambiances urbaines : ensoleillement, nuisances sonores, qualité de l'air, efficacité énergétique, voire production d'énergie. Même si les méthodes sous SIG restent limitées par l'absence d'opérateurs topologiques et par le coût des données à très haute résolution spatiale, les simulations et les analyses présentées permettent aux acteurs et aux scientifiques d'obtenir des réponses aux problématiques actuelles.

La troisième partie a pour objectif d'offrir des méthodes d'analyses des formes urbaines en vue de leur optimisation, au regard de leur durabilité. Les applications portent sur la Ville de Nice. Tout d'abord, une analyse de la croissance du bâti, dans sa double dimension horizontale et verticale est proposée. Les résultats montrent que la Ville de Nice tend à se densifier. En effet, l'essentiel des transformations est constitué d'opérations de renouvellement urbain regroupées spatialement. Néanmoins, ces transformations se localisent en périphérie de la ville où subsistent des réserves foncières. Afin de relier la morphologie urbaine avec la planification urbaine, une méthode de détection automatique des types morphologiques de tissus urbains est proposée. 13 classes typo-morphologiques sont décelées, à partir desquelles est évalué l'impact de la morphologie sur les aspects spatial, environnemental, morphologique et fonctionnel. Les résultats répondent aux besoins de connaître finement les espaces urbains au regard des critères de durabilité et indiquent que la typologie mise en place permet de mieux prendre en compte les différences spatiales de certaines dimensions telles que la rugosité, la végétalisation et le surpeuplement.

Abstract

Since the beginning of the 21 century the urban planning documents are focused on the “reconstruction of the city inside the recent city territory” and results in the densification of the urban structure (e.g. elevating existing buildings or increasing compactness). However, this construction mode needs a detailed understanding of the urban volume. To meet this demand, new analysis methods are strongly desired, integrating 2D and 3D in urban planning. This might allow density increase in decaying inner urban areas while respecting the social sustainable development and enhancing the quality of life.

However the currently used methods used in fundamental science or applied science rarely include the third dimension in their consideration; more detailed the vertical axis of geographical, natural or anthropogenic elements.

The here presented thesis is dedicated to the integration of the 3D methods into the urban planning by the help of analysis with applied geographic information systems (GIS). The work focuses on image and morphology analysis for developing new methodologies and tools dedicated to different decision makers in urban context.

The first section of the here presented thesis has the goal to give insight about what are space and form/shape in 3D and their relevance for geographic analysis. The existing concepts, tools and methods give a good basis for reflection and delineate the subject of research. The diverse meanings of the word space as ground, material, scope, three dimensional framework on which the objects are located and where their actions take place. Its dimensions are at least three in number (width, length and height).

The conceptualization of the form informs about the conceptualization of the space. The organization of the forms gives insight about the space where it enfolds. The forms can be understood as the materialization of subspaces; therefore space can be alternately forma and space and thus can be multiscalar.

The second section locates the urban form in the urban planning context. The city is given by its form and the underlying planning processes which make it a three dimensional space. While the third dimension is still little used for the explanation of phenomena which deploy in the urban territory, the third dimension is in this work envisage an explanatory factor for its development. The research on the life quality - momentary the core of the debates about urban sustainable development – raises questions about the optimal urban organization. The optimization of the urban form constrained by environmental, social and economical considerations offers an important research perspective, because it allows considering the maximization of societal rewards.

The cognitive character of the urban form needs the involvement and the participation of the population in all modification processes. The common application of GIS made it accessible to different research fields and types of information (non-professional, professional and/or

thematical) and allows different levels of analysis (from the visualization of data to the simulation of spatial objects and phenomena). Currently 3D is used mostly for the visualization of geographic scenes. Now GIS integrates the 2D_{1/2} and even the 2D_{3/4} but the lack of topographic operators, essential for spatial analysis, limits their ability. Still these limits could not prevent the progressing GIS application integrating the urban forms in all their three dimensions. The potential of renewable energy installations, impact simulations, spatial analysis, all these analysis lead to a global modeling of the urban environment: radiation, noise, air pollution/quality, energy efficiency, or energy production potential. Although, the use of GIS is constrained via the absence of topographic operators and the high costs for high spatial resolution, it allows obtaining the answers to current problems.

The third section is dedicated to promote methods for the urban forms and regarding the optimization in means of their sustainability. The application was undertaken for the City of Nice, France. In a first step an analysis of the development of the building stock is proposed for the two dimensions vertical and horizontal.

The obtained results show that the City of Nice is tending to densify. Indeed, the densification can be attributed to urban renewal operations and spatial aggregation. This transformations take place in the periphery on the City's remaining land reserves.

Connecting the urban morphology with the urban planning, a method using automated urban pattern (urban morphology types) detection in the urban fabric is proposed. 13 urban morphology types are detected. With these classes the impact of morphology on the socio-spatial, environmental, and functional aspects is measured

The obtained results meet the need to precisely consider the urban space in terms of sustainability criteria. Furthermore they indicate that the used typology classes allow better taking into account the different attributes roughness, vegetation and overpopulation.

Introduction générale

Suite à la conférence de Rio, en 1992, une liste de préconisations pour les collectivités locales a été constituée afin que les territoires se développent durablement. Sa traduction législative en France fût la loi Solidarité et Renouvellement Urbain qui vise, entre autres, à inciter à la reconstruction de la ville sur elle-même. Un de ses objectifs est, en effet, de maîtriser l'étalement urbain par la densification des espaces faiblement bâtis et la régénération des friches. La loi Grenelle 2 renforce ce principe au nom de la préservation des espaces naturels et agricoles, de la réduction des émissions de gaz à effet de serre et de relier desserte en transport en commun et densité.

Les espaces urbains sont soumis à une attention particulière. L'objectif du développement urbain est actuellement de faire de la densité (!) La mise en œuvre de la densification est laissée à l'appréciation de chacun. Or, une des premières difficultés est que la représentation mentale de la densité en ville est souvent associée à la verticalité – surtout dans la science fiction, qui lui rattache les notions floues de puissance, mal être ou surpopulation. Par contre, le terme de densité est moins chargé de sens. La densité sous-entend le volume, l'épaisseur. Cependant, cette notion n'a pas non plus une très bonne presse. Plusieurs facteurs agissent sur la perception de la densité et pourraient dès lors, concourir à son acceptation (IAU, 2009), telles que la diversité et la mixité des types de formes urbaines, la trame d'espace public, la dilatation de l'espace à travers la construction d'îlots ouverts, transparents et perméables ou encore, le développement de l'habitat intermédiaire couplant habitats individuel et collectif.

La question de l'application d'une telle loi est soulevée dans la mesure où les aspirations de la population ne vont pas forcément dans le sens de la loi, et que d'autre part, ce mode de construction implique une connaissance fine du volume urbain. Ces nouveaux enjeux – densité et réorganisation des formes intra-urbaines – nous ont conduit à nous intéresser à l'utilisation de la troisième dimension ou 3D dans l'analyse des espaces urbains.

Débuter un travail de thèse sur ce sujet est délicat tant il est vaste ; il ne concerne pas une thématique en particulier, les trois dimensions sont une donnée inhérente et immédiate de notre environnement, qui s'impose à nos perceptions et à notre conscience.

La « 3D » est un terme passé dans le langage commun. En donner une définition est difficile. Elle existe, il est possible de l'observer à chaque moment du quotidien tout un chacun en donne une certaine définition, comme l'attestent ces propos recueillis à ce sujet « ce qui donne du relief à notre monde ?! Ou l'épaisseur des choses » ; « le résultat de notre perception visuelle dans l'espace et la façon dont le cerveau l'interprète, et qui donne du relief aux choses *etc.* » ; « l'intervention du volume dans un système bidimensionnel, c'est-à-dire limité à des surfaces planes (???) La naissance de l'horizon, » ; « c'est une représentation en hauteur, largeur et profondeur de quelque chose *etc.* ».

La 3D, surtout ce qui concerne la représentation tridimensionnelle, a pris son essor depuis une vingtaine d'années. Les développements récents de la 3D dans le domaine technique (informatique) viennent surtout de la volonté de développer et de construire une ou des réalités virtuelles. Elle trouve ses applications dans l'animation (jeux vidéo, cinéma), dans le secteur de la défense (simulateur de vol), chez les architectes et les promoteurs immobiliers (projets) *etc.* Plus récemment, les représentations tridimensionnelles de l'espace terrestre se sont diffusées auprès du grand public notamment grâce à certains producteurs de données tels que Google ou IGN. La question de la troisième dimension se pose donc, actuellement, surtout dans des problématiques de représentation (réalité virtuelle, simulateur de vol, jeux-vidéo *etc.*).

« Haptique » est relatif au toucher.

La réalité virtuelle est une simulation informatique interactive immersive, visuelle, sonore et/ou haptique*, d'environnements réels ou imaginaires.

Par la suite, nous utiliserons plutôt le terme d'environnement virtuel, le terme d'espace sera réservé à ce qui est réel et qui fait l'objet d'une modélisation et d'une représentation virtuelle.

La représentation de l'espace virtuel* vise trois objectifs : représenter l'espace tel qu'il est (simulateur de vol ou présentation d'un site d'intérêt) ; représenter l'espace tel qu'il pourrait être (insertion d'un projet d'aménagement, proposition de scénarios) et représenter un espace imaginaire (jeux vidéo). Si « Tous les progrès de la science, au moins les progrès décisifs, sont toujours liés à de meilleures possibilités de modélisation, à une plus grande capacité de simulation interne des phénomènes » (Thom, 1999, p.66), force est de constater, aujourd'hui, le peu de questionnements sur ce qu'apporte la troisième dimension aux analyses et à la recherche.

La présente recherche s'appuie sur ces deux évolutions majeures survenues dans différents domaines de recherche qui seront entrecroisés dans cette thèse : l'apparition et l'amélioration des outils informatiques ainsi que le renouvellement des problématiques en géographie concernant plus particulièrement, l'espace urbain dans le cadre de la durabilité.

La troisième dimension est déjà partie intégrante des analyses géographiques : cartes en relief, profils topographiques, analyses paysagères *etc.* Pourtant, elle se cantonne généralement à la représentation de l'objet d'étude ou des résultats d'une analyse. Le renouvellement des problématiques en géographie nécessite son intégration comme paramètre de l'analyse.

Au regard des trois objectifs de l'espace virtuel cités ci-dessus, ce travail de thèse s'intéresse donc tout particulièrement aux deux premiers cas de figures.

- La représentation de l'espace tel qu'il est, ou en tout cas pour une partie, afin d'analyser les contraintes spatiales imposées à l'homme.
- La représentation de l'espace tel qu'il pourrait être, permet d'analyser la manière dont l'homme rétroagit et produit son espace.

Au préalable, il convient de s'interroger sur la place de la 3D comme composante de l'espace. Possède-il réellement trois dimensions ? Qu'entendons-nous par troisième dimension ? La hauteur des objets paraît évidente pour chacun de nous ; pourtant elle n'est pas toujours utilisée. Appréhender la troisième dimension comme une grandeur (hauteur) renvoie à la

forme des objets. Comment peut-on expliquer cette forme ? Permet-elle d'apporter de nouveaux éléments d'explication aux phénomènes qui lui sont liés ou ne s'agit-il que d'une amélioration de la représentation ?

Les trois dimensions caractérisent la forme d'un objet à laquelle sont associées des représentations mentales, comme nous l'avons déjà évoqué, pouvant entraîner certains comportements de rejets. Ainsi nous souhaitons d'une part, déterminer en quoi la troisième dimension est un élément clé de l'analyse de l'espace urbain et d'autre part, examiner s'il existe d'ores et déjà des méthodes permettant de mener ce type d'analyse.

Compte tenu des changements liés aux principes de durabilité des territoires, quelles sont les transformations attendues de l'espace urbain ? Quelles évolutions majeures impacteront la forme urbaine ? Une forme urbaine optimale au regard de la qualité de vie, économiquement et socialement soutenable, est-elle envisageable ? Le renouvellement des problématiques en géographie et analyse spatiale a conduit au développement de nouvelles méthodes qui intègrent notamment la troisième dimension. Parallèlement, les avancées technologiques offrent de nouvelles opportunités de recherches, De quelle manière, la troisième dimension a-t-elle été accueillie et intégrée dans ces méthodes d'analyse spatiale ? Quels sont les orientations privilégiées, ses apports et ses limites ?

Ainsi, en accord avec le point de vue de l'analyse spatiale, la problématique est de déterminer en quoi la morphologie urbaine dans ses trois dimensions, participe au fonctionnement du système urbain, intervient dans les interactions qui y ont cours, notamment en tant que facteur d'optimisation de son fonctionnement. Quel rôle joue la troisième dimension dans l'explication des dynamiques urbaines, en général, et des dynamiques urbaines durables, en particulier ? A partir de l'identification des formes urbaines, notre objectif est de caractériser leur durabilité, en ayant recours à des indices ou des indicateurs permettant de rendre compte à la fois de la morphologie et des principes de base du développement durable. Toutefois, le tissu urbain est-il réellement le volume élémentaire représentatif de la durabilité urbaine ?

Nous souhaitons tout d'abord, examiner les concepts d'espace et de forme sous l'angle de leurs dimensions. Nous faisons l'hypothèse que l'espace est tridimensionnel mais que l'ensemble des phénomènes qui s'y déroulent n'implique pas nécessairement la troisième dimension. Ce positionnement prend appui sur les travaux de recherches théoriques dans la science en général, et géographique en particulier.

Les espaces urbains sont un des principaux enjeux du développement durable de notre planète. Au regard des travaux portant sur ce type d'espace, il nous semble que la troisième dimension est une des matérialités des processus qui s'y déroulent. Elle n'en est pas seulement le résultat mais elle participe aussi à son organisation. Les évolutions qui se dessinent, attendues et souhaitées, seront appréhendées en mettant l'accent sur les phénomènes où la troisième dimension intervient de manière prégnante. De plus, les méthodes et les modèles intégrant la troisième dimension en tant que paramètre seront présentés.

Ces éléments nous permettent, enfin, de proposer des méthodes d'analyses des formes urbaines en vue de leur optimisation, au regard de leur durabilité. L'évolution urbaine actuelle conduit à la densification de la ville. Nous souhaitons développer une démarche capable de détecter les formes intra-urbaines et leur dimension pour rendre compte de ce phénomène. Au-delà de la simple analyse de la croissance du bâti, nous souhaitons que chaque type de forme de bâti soit analysé au regard de sa durabilité et de la qualité urbaine qu'il suscite auprès des citoyens qui l'habitent. Pour ce faire, des indicateurs seront proposés et testés.

Les applications portent sur la Ville de Nice. Cette ville est propice à l'analyse de la troisième dimension. Tout d'abord, elle présente une morphologie particulière tant sur son aspect physique – relief – que sur son tissu bâti. Située entre mer et montagne, son extension urbaine est limitée, par conséquent la densification semble nécessaire au-delà de la simple application de la loi. De plus, les multiples enjeux auxquels son territoire est soumis (tourisme, qualité de vie, agriculture, préservation de la qualité paysagère *etc.*) impliquent une optimisation de ses formes.

Partie 1. La 3D réalité ou fiction

Introduction de la première partie

Cette partie souhaite mettre en évidence le rôle de la 3D au sein des espaces urbains. *De facto*, il convient de s'interroger au préalable sur les dimensions de l'espace, en général, de l'espace géographique, en particulier, et de ses formes. Ces concepts posent un certain nombre de questions : la 3D est-elle une des composantes de l'espace ? Qu'entendons-nous par troisième dimension ? Tout d'abord, l'**espace** est un terme **polysémique** dont le sens dépend de la discipline qui l'utilise mais également des propriétés qui lui sont attribuées. Ce caractère polysémique explique que le nombre de dimensions d'un objet dépende des propriétés de l'espace auquel il appartient.

Traiter des dimensions de l'espace renvoie à son **aspect géométrique et mesurable**. Les travaux de recherche menés depuis quelques années soulignent l'importance de la forme pour l'analyse de l'espace. En ce sens, la forme en 3D permet-elle d'apporter de nouveaux éléments d'explication à l'analyse ou relève-t-elle simplement d'une amélioration de la représentation ?

Ainsi, le premier chapitre a pour objet de définir l'espace et ses dimensions au regard des différentes conceptions scientifiques en général, et géographiques en particulier. La dimension spatiale est l'objet d'analyse de la géographie ; par conséquent, nous analyserons les travaux réalisés traitant directement ou indirectement de la troisième dimension afin d'en extraire leurs orientations, leur intérêt et leur limite.

Le développement et la complexité des espaces urbains en font un objet de recherche particulièrement intéressant quoique complexe : ces espaces ont pu être associés de manière négative à la verticalité et à la densité, et pourtant le débat actuel porte davantage sur les problèmes liés à l'étalement urbain. Ainsi, dans un premier temps, il s'agit d'étudier en quoi l'espace urbain sera appréhendé comme un objet en 3D et l'on examinera l'intérêt d'intégrer la troisième dimension dans les problématiques le concernant. Dans un second temps, les méthodes d'analyse spatiale seront examinées afin de saisir le poids respectif accordé aux trois dimensions de cet espace.

Chapitre 1. Forme et espace : formalisation

*« Il n'existe pas qu'un seul monde, lui dis-je,
celui que vous voyez ou
que vous croyez voir ou
que vous vous imaginez voir ou
que vous voulez bien voir... »
Raymond Queneau, Extrait de « Odile »*

La volonté de représenter le monde et l'espace de manière toujours plus précise, notamment avec l'introduction de la troisième dimension, nécessite de s'intéresser aux différentes définitions du concept de l'espace. Trouver un point d'entrée pour définir l'espace n'est pas aisé. Il constitue un des concepts fondamentaux, au même titre que le temps, et sont tous deux une évidence : les choses *se situent* dans l'espace et le temps *passé* (M-C. Corcuff, 2007). Lévy et Lussault (2003) déplorent, à ce propos, le manque de conceptualisation de l'espace. La question a moins alimenté la réflexion philosophique que celle du temps. Il y a quelques décennies, la géographie en a fait son paradigme, sans que sa conceptualisation n'ait fait l'objet d'une réflexion approfondie (Dauphiné, 2003).

L'espace est un terme polysémique dont le sens dépend de la discipline qui l'utilise mais également des propriétés qui lui sont attribuées : tantôt absolu, tantôt relatif ; tantôt fini, tantôt infini, tantôt support, tantôt agent. Ce caractère polysémique explique que le nombre de dimensions d'un objet dépende des propriétés de l'espace auquel il appartient*. Ainsi, une partie de ce chapitre s'attelle à définir l'espace et ses trois dimensions au regard des différentes conceptions. L'espace est-il toujours tridimensionnel ? L'espace a-t-il une forme tridimensionnelle ? Quel espace peut faire l'objet d'une représentation 3D ?

Cf. Flatland, livre de Edwin A. Abbott, qui imagine un monde en deux dimensions.

Les dimensions d'un objet de l'espace ou de l'espace lui-même renvoient à la grandeur, à l'aspect mesurable de celui-ci : longueur, largeur, hauteur, dont sont déduits la superficie et le volume. Le caractère mesurable et donc les propriétés formelles de l'espace, nous invitent à nous intéresser aux travaux de recherche sur la morphologie. En outre, depuis quelques décennies, l'analyse de la forme connaît un regain d'intérêt grâce au développement de plusieurs théories morphologiques : Théorie des fractales de Benoît Mandelbrot (1995), Théorie des Catastrophes de René Thom (1972, 1999), Théorie des structures dissipatives d'Ilya Prigogine (1986). Ces théories s'intéressent à l'analyse des dynamiques des formes (et des forces), leur naissance et leur évolution, autrement dit la morphogénèse. Ces théories ont été à la base de nombreux travaux de géographie car elles se prêtent à la modélisation des systèmes spatiaux et à l'explication des phénomènes géographiques. Quels sont leurs apports à ce travail de recherche ? Quels sont les concepts mobilisables dans ces théories ? Les travaux issus de ces théories traitent-ils de la morphologie dans ses trois dimensions ?

L'espace est consubstantiel à la géographie. Celle-ci constitue une discipline où la représentation, l'analyse et la modélisation du monde sont essentielles. Par conséquent, il est tentant de penser que les trois dimensions sont mobilisées pour chacune de ces pratiques : est-ce que la troisième dimension est utilisée ? De quelle manière et à quelle fin ?

Ce chapitre n'a pas pour prétention d'aboutir à un consensus mais de définir les notions et les concepts mobilisés dans ce travail scientifique et de les positionner dans un cadre théorique. De manière générale, les conceptions sur l'espace s'opposent : pour certains, l'espace est une construction de la pensée et pour d'autres, un cadre qui existe en dehors de l'être et de l'esprit.

Cette citation est également tirée de l'introduction du livre de B. Bachelet, *L'espace*, 1998

Cette dualité est soulignée par Einstein dans l'introduction du livre *Concepts of space* de Max Jammer : « ces deux conceptions de l'espace diffèrent radicalement en ce que dans la conception A, l'espace désigne une qualité topologique du monde des objets matériels, alors que dans la conception B, l'espace est le réceptacle de tous les objets matériels. Dans le cas A, on ne peut concevoir d'espace sans objet matériel ; dans le cas B, un objet matériel ne peut être conçu qu'en tant qu'il existe dans l'espace »*.

L'espace est ensuite étudié au travers du concept de forme afin de saisir son utilité dans l'analyse géographique. Puis, les interactions entre formes et forces sont approfondies pour comprendre la dynamique d'apparition de la troisième dimension. Enfin, nous proposons un état de l'art des analyses et méthodes en géographie, afin de dresser un bilan sur l'utilisation de la troisième dimension.

1. La structuration de l'espace et de ses dimensions

Débuter cet ouvrage à vocation scientifique par la structuration du réel peut paraître surprenant, le lien avec la troisième dimension en analyse spatiale n'étant pas flagrant. Lors de la recherche d'une définition claire et précise de la troisième dimension, il est apparu que cette notion relevait davantage de la représentation – plus précisément de l'amélioration de la représentation – plutôt que du réel.

Pourtant, il est acquis que l'espace est en trois dimensions tandis que sa représentation ne l'est pas forcément. Avec la perspective et le volume, les méthodes de représentation du réel se sont perfectionnées au cours du temps afin d'intégrer l'observateur et de le mettre en situation. La troisième dimension serait alors une dimension supplémentaire de l'espace support. Cependant la tridimensionnalité de l'espace ne participe-t-elle pas à certains processus ? N'entre-t-elle pas en relation avec les éléments qui composent l'espace?

Cette partie vise à explorer le concept d'espace et de ses dimensions dans le cadre du positionnement disciplinaire de ce travail. La définition de l'espace renvoie tantôt à son caractère **absolu**, tantôt à son caractère **relatif**. Dans les deux cas, il constitue le cadre de nos perceptions et de nos représentations. Qu'il existe en soi ou qu'il soit le produit de la pensée, l'espace est découpé, divisé, délimité par l'intellect, afin de mieux comprendre ce qui nous entoure. Le caractère relatif, autrement dit l'existence de liens entre les objets, nécessite la localisation de ces objets, donc un **système de référence**.

1.1. Les dimensions de l'espace

La géométrie est considérée comme la première science de l'espace, en conséquence de quoi l'espace est avant tout une notion de géométrie qui désigne une étendue, abstraite ou non. Pour Descartes, les objets sont les **caractéristiques géométriques** d'une réalité unique et fournissent le fondement de cette spatialité (Bachelet, 1998)

L'espace, entendu comme un cadre de référence, implique l'existence d'un consensus sur ses propriétés et de lois qui existent indépendamment de la pensée. Par exemple, l'espace de la **géométrie** euclidienne emprunte les propriétés reconnues suivantes : il est **continu, infini, tridimensionnel, homogène** et **isotrope** (Poincaré, 1902). C'est donc un espace « neutre », un cadre réel et absolu, qui existe indépendamment des objets qui s'y trouvent ou des événements qui s'y passent. Galilée explique à propos de l'univers qu'« on ne peut le comprendre si d'abord on n'apprend pas à en comprendre la langue et à connaître les caractères dans lesquels il est écrit. Il est écrit en **langage mathématique**, et les caractères en sont des triangles, des cercles, et d'autres **figures géométriques**, sans lesquelles il est impossible d'y comprendre un mot. Dépourvu de ces moyens, on erre vainement dans un labyrinthe obscur » (M-C. Corcuff, 2007, p.4)

Pourtant, si l'espace géométrique était un cadre imposé à chacune de nos perceptions et de nos représentations individuelles, il serait impossible de se représenter une image sans ce cadre. À ce propos, Poincaré, dans l'introduction de *La science et l'hypothèse* (1902), s'interroge sur les **principes de la géométrie**. Pour lui, ils sont imposés par la logique puisqu'« un autre cadre que nous imposons au monde, c'est l'espace. D'où viennent les premiers principes de la géométrie ? Nous sont-ils imposés par la logique ? ». Ainsi, les propriétés de l'espace, édictées dans le paragraphe précédent, « ne sont que des conventions ; mais ces conventions ne sont pas arbitraires, et transportées dans un autre monde [...] nous aurions été amenés à en adopter d'autres » (Poincaré, 1902)

La géométrie euclidienne est, selon Poincaré (1902), la plus commode.

- D'abord parce qu'elle est la plus simple, de la même manière qu'« un polynôme du premier degré est plus simple, qu'un polynôme du second degré ; les formules de la trigonométrie sphérique sont plus compliquées que celles de la trigonométrie rectiligne ».
- Ensuite, parce qu'elle correspond assez bien avec les propriétés des objets naturels, notamment le corps humain, que nous utilisons comme instrument de **mesure**.

Si la géométrie euclidienne est la première à avoir formalisé le concept de troisième dimension, le terme possède aujourd'hui deux sens principaux :

- « En topologie, le point a zéro dimension, la ligne une, la surface deux, le volume trois [...]. En géographie, un lieu (point), une voie (ligne), une aire ont toujours plusieurs dimensions puisqu'ils ont plusieurs caractéristiques » (Brunet et *Alii*, 1996).
- Dans le sens courant, les dimensions de l'espace géographique sont celles de l'espace vectoriel (2D – les coordonnées x et y) auxquelles sont corrélées la ou les dimension(s) de la substance. Les outils d'analyse développés depuis plusieurs années prennent en compte la **multidimensionnalité** de l'espace, mais encore trop rarement la troisième dimension de l'espace vectoriel.

En géomatique*, ces deux définitions sont utilisées car les objets ont à la fois une composante géométrique régie par des relations topologiques et une composante attributaire multidimensionnelle. Ce dernier point est explicité par Brunet et *Alii* (1996, p.161) : « l'espace des cartes a deux dimensions, l'espace sensible a trois dimensions [...]. Mais les sciences sociales ou naturelles, dont la géographie, emploient des espaces à n dimensions, ou hyperespaces, qui ne peuvent pas se voir, et se conçoivent mal, mais dont l'utilité est grande dans la définition des espaces géographiques et des systèmes spatiaux » (Brunet et *Alii*, 1996, p.161).

Dans l'espace vectoriel, le nombre de **dimensions** est représenté par le nombre de points de **coordonnées**.

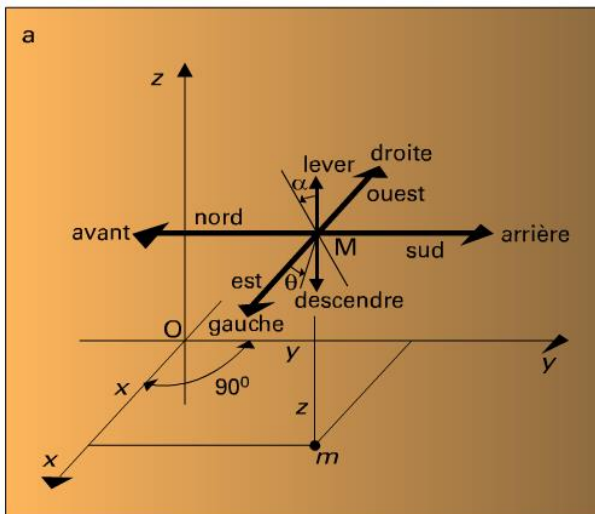


Figure 1 : L'espace à trois dimensions : coordonnées

Source : Encarta – Universalis.

- Un objet volumique constant, ou immobile, c'est-à-dire dont les propriétés sont indépendantes du temps, dans le cadre de l'étude, a trois dimensions car il faut trois nombres (x, y, z) pour décrire chacun de ses points ;
 - Un objet plan comme une feuille de papier, en négligeant l'épaisseur, a deux dimensions car il faut deux nombres (x, y) pour qualifier chacun de ses points ;
 - Un objet linéaire comme un fil, sans compter l'épaisseur, a une dimension, car il suffit d'un seul nombre x pour désigner chacun de ses points ;
 - Un objet ponctuel (comme un point), en écartant la taille, a une dimension zéro car aucun paramètre supplémentaire n'est nécessaire pour trouver le point.

La **géomatique** est le nom donné aux sciences et techniques de l'information géographique. (IGN, 2010b)

Ces concepts sont repris en modélisation informatique (objet 2D et 3D). Ainsi, le terme **dimension** prend le sens de « **grandeur** qui mesure l'étendue d'un corps ou d'un objet dans une ou plusieurs **directions** déterminées » (CNRTL, 2010).

- L'espace considéré dans ses trois dimensions est un volume déterminé soit par l'atmosphère, l'air environnant, soit un milieu libre, naturel, où l'individu peut se développer.
- L'espace considéré dans deux dimensions est une étendue, une surface déterminée (l'intérieur d'une habitation par exemple).
- L'espace considéré dans une seule dimension est un écart, un intervalle, c'est-à-dire la distance comprise entre un point et un autre, entre un lieu, un objet et un autre.

Communément, l'espace est à quatre dimensions, puisqu'un objet – situé dans cet espace – se définit par sa **position** dans l'espace (x, y, z) et l'**instant** *t* auquel cet objet, en tant qu'événement, survient. Le concept du temps, fortement lié à celui de l'espace, prend ici sa signification. Les conceptions de l'espace dépendent fortement de la conceptualisation du mouvement. F. Balibar (1994) explique que l'espace de Newton, malgré sa forte parenté géométrique, est néanmoins un espace proprement physique parce qu'il a des **propriétés dynamiques**. En effet, « dans un espace strictement géométrique, un point reste là où il est, car il n'existe pas de forces géométriques. Dans l'espace de Newton, une masse ponctuelle, même lorsqu'elle ne subit aucune force réelle, est animée d'une force d'inertie qui ne peut lui venir que de l'espace même » (Bachelet, 1998, p.49). La quatrième dimension implique les **forces** ou les **relations** qui ont prise au sein de l'espace.

Le contexte dans lequel le terme de dimension a été décrit peut être étendu à celui de l'espace vectoriel utilisé en mathématiques et en partie en physique. Dans ce cas, le nombre de dimensions d'un espace est le nombre de variables qui servent à définir un état, un événement (Poincaré 1902). Généralement, l'esprit considère un espace en trois dimensions, cependant la perception de cet espace diffère d'un individu à l'autre.

1.2. Espace absolu et espace relatif

La conscience d'être à l'intérieur de quelque chose de plus grand (l'espace) est indéniable, mais soulève la question de l'existence de cet espace indépendamment de la pensée. Nous percevons le monde en **volume**, nous pouvons nous **mouvoir** et **toucher** des objets volumiques. Ainsi, la première opposition prend appui sur la dépendance ou l'indépendance de l'espace par rapport à la pensée. L'espace existe soit indépendamment des réalités qui s'y développent, soit par la réalité elle-même et les objets qui s'y trouvent (Lévy et Lussault 2003). On retombe ici sur la distinction entre l'espace support et l'espace comme construction de la pensée. Ainsi, soit il existe un système de référence universelle, soit le système de référence prend l'homme comme point central (distance interpersonnelle).

Tout d'abord, l'espace est défini comme ce qui nous entoure et ce qui nous environne. En ce sens, il a un **caractère absolu** qui induit son **indépendance** et sa **préexistence** par rapport aux corps qui le composent (Newton, 1995). Aristote définissait déjà l'espace comme la limite première, immobile du contenant, la place absolue où sont les choses. Newton, en critique à Descartes, conclut qu'« il est nécessaire de **rapporter la détermination des lieux** [...] à quelques **êtres immobiles** tels que l'**étendue seule** ou l'**espace considéré** comme quelque chose de **réellement distinct du corps** » (Newton 1995, p.69). L'espace absolu signifie que « tout objet est relatif à l'espace dont il occupe un lieu, mais que l'espace comme tel n'est, lui, relatif à rien » (Bachelet 1998, p.105).

En effet, « l'idée d'un **espace absolu** suppose qu'il existe un **substrat intangible** dans lequel toute répartition s'inscrit et qui, dans une large mesure, la détermine » (Lévy et Lussault 2003, p.327). Dans la conception de Newton, ce substrat est un ordre intangible extérieur à la pensée. En effet, les objets sont localisés en fonction de la loi de la gravitation qui est indépendante de l'homme.

Dans l'approche positionnelle (Lévy et Lussault 2003), l'espace est défini comme un système de positions indépendant de la nature des objets concernés, qui subissent à cause de leurs caractéristiques de masse ou de forme leur localisation dans le système.

Le système de position renvoie généralement à l'**espace euclidien** en **trois dimensions**. Rappelons que la notion de **dimension** se définit en fonction du type d'espace et de la discipline considérée. Généralement, elle s'entend comme la « **grandeur** qui mesure l'étendue d'un corps ou d'un objet dans une ou plusieurs **directions** déterminées » (CNRTL, 2010).

- L'espace au sens de **grandeur** (figure 1) renvoie à l'**aspect mesurable d'un corps** ou d'un objet : sa longueur, sa largeur, sa hauteur, sa superficie, son volume *etc.*
- La **direction**, elle, renvoie à la **ligne droite** qu'un objet suit lors de son **déplacement**. Il existe communément 3 directions principales : avant - arrière, gauche – droite, haut - bas ; représentées par trois axes (figure 1).

Dans le langage courant, la troisième dimension est l'axe vertical (haut – bas) ; les deux autres dimensions constituent le plan horizontal. La grandeur se mesure à partir de ces axes. Dans ce travail de recherche, la 3D est entendue dans ce sens.

L'espace est donc considéré comme absolu en premier lieu : « un milieu idéal [...] qui contient **nos perceptions et où nous localisons** le mouvement et les corps » (CNRTL, 2010). Il constitue un espace de localisation.

Pourtant, si l'espace est le cadre de nos perceptions (Brunet et *Alii*, 1996), il « dépend, dans sa réalité même, des objets qui s'y trouvent » (Lévy and Lussault 2003), donc nécessairement de la pensée. Il a donc nécessairement un **caractère relatif**.

Malgré une conception absolue de l'espace, Newton conçoit l'espace relatif comme une perception subjective de l'espace par l'homme, autrement dit comme cette mesure ou

dimension mobile de l'espace absolu. Descartes pensait que pour qu'un objet se déplace, un autre objet devait être déplacé au préalable ; les objets sont ainsi « poussés comme des dominos successifs »*. Donc pour lui, si un corps est retiré d'un espace qu'il occupait, l'esprit est toujours conscient de la présence de l'étendue, elle est « de même grandeur, de même figure ». Ainsi, il n'y a pas de différence entre le corps et l'étendue car le corps n'est rien d'autre qu'une partie en trois dimensions de l'étendue.

Expression empruntée à H. Regnault dans son cours sur « Le concept d'espace : une approche distanciée ». Source : [1]

Pour Leibniz, l'**espace** prend son sens dans la **description** des **relations** entre les objets : « les objets spatialisés entrent, à travers leur relation, dans la construction de l'espace » (Lévy, Lussault, 2003, p.327). L'espace aristotélicien est un espace hiérarchisé, qui comporte des directions *a priori* (droite, gauche, bas, haut). Ici, ce n'est pas la hiérarchisation de l'espace qui est importante mais plutôt la manière dont Aristote – et plus généralement l'homme – le perçoit. L'individu perçoit l'espace relativement à lui-même, à Dieu et aux objets (Bachelet, 1998, Brunet, Ferras et *Alii*. 1996). Ainsi, l'espace est alors l'ensemble des étendues (finies ou non), des dimensions organisées autour de soi. De la même manière, dans sa réflexion sur l'espace, Kant (2006) explique que pour s'orienter il faut être capable de trouver tous les lieux à partir de la connaissance d'un seul (l'Orient). Pour cela, il faut nécessairement disposer d'une intuition sensible qui permette de différencier la droite et la gauche, l'Orient et l'Occident. L'espace est perçu par l'homme par un mécanisme spatialisé intuitif de mise en relation.

Ainsi, l'espace est considéré soit comme absolu, c'est-à-dire un espace support, un repère qui contient **les perceptions** humaines et **où** l'homme se **localise** lui-même ainsi que le mouvement et les corps, soit comme relatif, puisqu'il est créé par les **relations entre les objets** qui s'y trouvent que l'homme perçoit par son **mécanisme spatialisé**.

1.3. L'espace : une construction émanant de mises en relation multiples

Aucune connaissance, même perceptive, ne constitue une **simple copie du réel** parce qu'elle contient toujours un **processus d'assimilation** à des structures antérieures. Ainsi, la conception de l'espace, de ce qui nous environne, passe par ce processus. Pour Piaget (1967, p.22), « toute connaissance est liée à une action et connaître un objet ou un événement, c'est les utiliser en les assimilant à des schèmes existants ».

Tout d'abord, le processus d'**assimilation** est le **mécanisme** même de la **perception visuelle** qui correspond à une opération (ou plusieurs) de **mise en relation** (Voiron 2004). Elles interviennent à différents niveaux et interfèrent toujours les unes avec les autres. Par exemple, lorsque l'homme perçoit un objet ou phénomène inconnu, il essaie de l'associer à un objet ou à un phénomène connu pour lui, autrement dit à **des structures préalables** (figure 2).

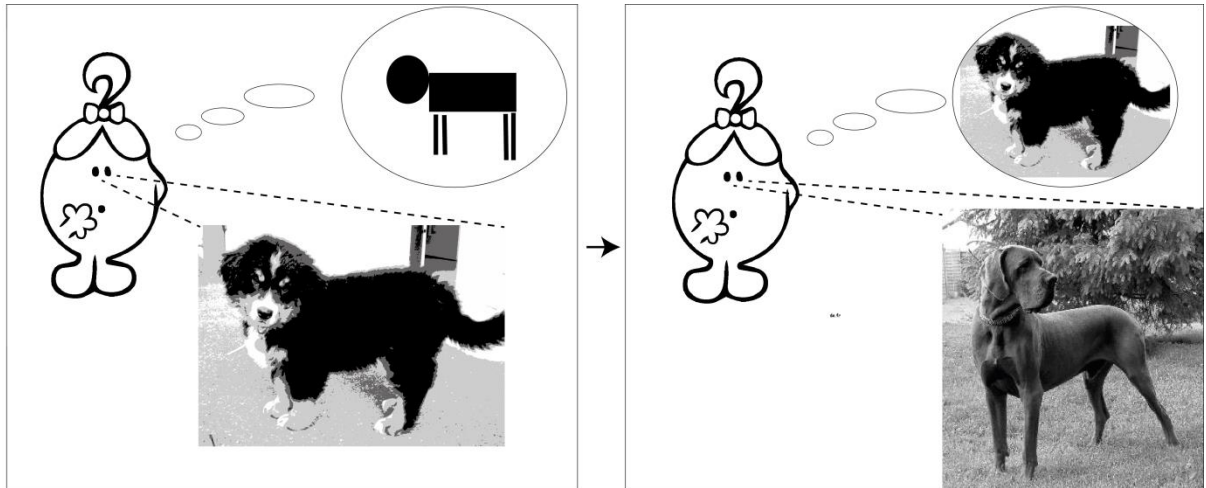


Figure 2 : Exemple d'opération de mise en relation
(Sevenet, 2013).

Trois processus majeurs de représentation du réel concourent à la structuration (Voiron, 2004) :

- les actions logico-mathématiques (la perception par la vue et le toucher – l'action, le mouvement de l'observateur),
- les structures abstraites (les formes euclidiennes simples par exemple) et
- les mentalités culturelles.

Ce processus de mise en relation avec des structures existantes est une transformation du réel, des actions exécutées mentalement.

Les trois directions principales (figure 1) relèvent de l'intuition sensible qui a permis de définir les trois dimensions de l'espace vectoriel. La notion de mouvement sous-entendue dans l'idée de direction est donc très importante pour comprendre les actions logico-mathématiques. En effet, l'ensemble des actions perceptrices (et pas seulement la vue), servent à la découverte de l'espace et de ses dimensions. Piaget (1967) a décrit la manière dont l'enfant découvre l'espace et le temps. Pour lui, l'enfant se construit par la perception, la manipulation et la réflexion : les actions de l'enfant, les opérations menées sur les objets (classification, mise en relation, comparaison, *etc.*) lui permettant d'acquérir les notions d'espace.

Même si pour Kant (2006), l'**espace** est **perçu** par l'homme par un **mécanisme spatialisé instinctif**, et l'espace est une catégorie ou une forme *a priori* de la connaissance, ce mécanisme est une **opération de mise en relation**. En effet, quand l'homme localise un objet, il effectue une opération de mise en relation d'abord par rapport à lui-même, ensuite par rapport aux autres objets et différencie sa droite et sa gauche. Cette opération est qualitative : l'objet est devant, à gauche, en haut ; puis elle est quantitative par l'**évaluation** de la **distance**. Ainsi, les mesures spatiales sont le résultat de la quantification de l'éloignement des objets. En ce sens, Bergson définit l'espace comme « l'ensemble des distances entre les points qui s'y

trouvent » (Worms, 2007). Cette mesure s'effectue généralement dans l'espace vectoriel décrit dans la partie 0.

Les images qui se forment sur notre rétine lors de cette opération ou sur une photo proviennent du monde tridimensionnel, mais le réduisent à deux dimensions, supprimant la profondeur (Poincaré 1902, Voiron 2004, M-C. Corcuff 2007). La **perception** de la **troisième dimension** n'engage pas seulement la vue. En effet, la troisième dimension est donnée par la distance relative entre les objets que l'individu évalue. Ainsi, pour percevoir la troisième dimension, le processus d'accommodation* et de convergence* des deux yeux se mettent en marche.

A ce propos, l'utilisation de la 3D dans la représentation du monde est apparue en Europe à la Renaissance. Dans la peinture, l'accommodation et la convergence apparaissent avec la naissance de la perspective. Celle-ci joue un rôle important sur l'évolution du concept d'espace. Les peintres « pensent leur espace pictural en volume, et en volume exactement semblable à la réalité »*.

Connaître, ce n'est pas copier le réel, c'est agir sur lui et le transformer pour le comprendre. (Piaget, 1967) ; « le cerveau a deux besoins irrépressibles : le besoin de voir et nous pouvons voir l'étendue continue, et le besoin de comprendre et nous ne pouvons comprendre que le fini et donc le discret » (Thom, 1991) :

- Le déplacement de l'observateur permet, par une succession de vues, de percevoir plusieurs images, plusieurs points de vue ou perspectives et ainsi de mieux appréhender la forme d'un objet [en 3D] (Voiron, 2004). Le mouvement est nécessaire.
- La nécessité de discrétiser l'espace et les phénomènes pour les comprendre (y compris la 3D). Il faut donc lui donner forme.

La notion de **saillance** (Thom, 1999) est ainsi liée à l'émergence d'une figure sur un fond. C'est dans le domaine de la perception visuelle que la notion de saillance a été explorée. D'une manière générale, l'unité à laquelle s'applique la saillance est un élément visuel distinguable par ses propriétés physiques et/ou ses aspects cognitifs mis en jeu lors de leur perception.

Les structures abstraites sont des images mentales qui reflètent des mentalités culturelles du moment. R. Thom (1999, p.154) explique qu' « une forme extérieure est **prégnante** pour un sujet [un homme], si la perception de cette même forme suscite en lui des **réactions psychophysologiques de grande ampleur**. Les réactions se caractérisent par une attraction ou, au contraire, par une répulsion permanente - à l'égard de la forme prégnante ». Les structures abstraites suggèrent aux individus une prégnance qui se traduit par une réaction.

Accommodation :
Modifications oculaires adaptatives permettant d'assurer la netteté des images pour des distances différentes de vision.

Convergence :
Mouvement des yeux permettant d'obtenir une seule image.

Régnault, 2004, Cours intitulé « *Le concept d'espace, une approche distanciée* ». Source : [1]

« Chaque mentalité culturelle crée son espace, l'homme chrétien tend au vertical. Le clocher pointait vers le ciel, c'était son expression spirituelle pendant des siècles. A partir du 14^{ème} siècle, l'homme devient plus individualiste, plus scientifique, il s'aventure vers des terres inconnues, invente la perspective. L'espace devient horizontal et nous avons vécu sur cette horizontalité jusqu'au 19^{ème} siècle. Notre temps s'oriente vers une autre direction, ou plutôt, dans les sciences comme dans les arts, nous refusons toute démarche unidirectionnelle. Nous n'acceptons ni la seule verticale, ni la seule ligne d'horizon qui sépare l'espace en deux, comme le ciel et la terre. Nous cherchons une perception d'ensemble. Nous commençons à comprendre le monde globalement, en continue évolution, toujours au bord du déséquilibre. Nous voyons les facettes de choses simultanément en rotation en translation. Il n'y a plus de haut, de bas, de gauche, de droite : si le mouvement s'arrête nous tombons. Les penseurs et les artistes, par leur savoir et leur vision ont senti l'immense richesse de l'infiniment grand et de l'infiniment petit. Notre vision s'est élargie, nous pénétrons mieux les secrets de la nature. » (Hajdu, Voiron 2004).

La signification de l'espace en 3D (ou au moins en volume) est ancienne. Pendant longtemps, la **verticalité** fut **mystifiée** car elle représentait la montée vers Dieu donc vers la perfection ou au contraire la descente en enfer. Parallèlement, la recherche des limites horizontales de l'espace s'effectue sur le terrain, par le biais des voyages.

Plus concrètement, l'évolution de l'espace urbain est un bon exemple pour illustrer le lien entre la perception de l'espace et le reflet des mentalités à chaque période de l'histoire. En position défensive, la ville se « **verticalise** », les remparts représentant une protection contre l'envahisseur.

Après l'industrialisation, la ville hygiéniste naît, l'espace urbain se transforme de manière à respecter tous les aspects d'une bonne qualité de vie. Depuis, une nouvelle forme urbaine a pris le pas sur l'ancienne : la ville « horizontale ». Elle est due à un changement des modes de vie, favorisé par l'accession à la propriété individuelle.

Il faut noter que, dans la continuité spatio-temporelle, une saillance peut devenir prégnance. « On doit donc voir la prégnance biologique comme un fluide érosif qui s'insinue dans le champ phénoménal des formes vécues (les formes saillantes) selon deux processus classiques : contagion par continuité, contagion par similarité » (Thom, 1999, p.155).

Dans l'espace tridimensionnel de référence, les corps et les objets sont localisés, ils se distinguent les uns par rapport aux autres par leur discontinuité. Ils s'organisent en un tout mobile et dynamique.

L'espace est ainsi construit par l'homme. L'espace (terrestre) constitue un système de référence en trois dimensions (minimum) que l'homme perçoit comme tel grâce à un **mécanisme spatialisé instinctif** et aux actions logico-mathématiques. Ces opérations qui renvoient à des structures abstraites et aux mentalités sociétales (saillances et prégnances) seront à présent développées dans le cadre conceptuel de la forme.

1.4. La dimension spatiale de l'espace géographique

L'espace géographique est un construit. Pourtant, il peut paraître surprenant que le concept d'espace soit peu défini en Géographie alors qu'elle en a fait son objet d'étude et qu'il existe plusieurs conceptions qui ne font pas consensus (Lévy et Lussault, 2003).

Tout d'abord, « l'espace géographique désigne un **ensemble cognitif stable**, clair, s'imposant à tous » (Lévy et Lussault, 2003, p.325). En conséquence, il ne serait donc pas nécessaire de le définir. Ce constat n'indique-t-il pas le lien évident et inaliénable de la géographie et de l'espace ?

De plus, si l'espace est l'objet de la Géographie, il est tantôt défini comme un produit socio-économique, tantôt comme un ensemble géométrique, un système, une représentation ou encore un support. N'existe-t-il pas pourtant des éléments communs qui ont permis d'asseoir notre discipline ?

Lévy et Lussault (2003) proposent un classement des différentes catégories de l'espace. Cette catégorisation s'appuie sur deux couples de conceptions qui s'affrontent (tableau 1).

	Positionnel	Relationnel
Absolu	De Platon à Newton "Géographie classique"	Berkeley "Géographie culturelle"
Relatif	Descartes "Analyse spatiale"	Leibniz "Géographique, Sciences sociales de l'espace"

Tableau 1 : La catégorie d'espace: quatre approches (Lévy et, Lussault, 2003)

La Géographie dite « classique » est typiquement ancrée dans une conception de l'espace à la fois :

- Absolu ; c'est la fonction de l'espace physique appelé « conditions géographiques » et
- Positionnel ; les « pays » ou les « régions »* sont, pour l'essentiel, sinon indépendants les uns des autres, du moins situés dans un espace, bien plus qu'ils ne le génèrent.

En tant qu'entités homogènes.

À condition de réduire l'homme à son versant culturaliste, c'est-à-dire réfractaire à l'historicité, la Géographie dite « culturelle » prend place dans le groupe suivant :

- Absolu ; à toutes les échelles, la configuration des cultures est fixe et
- Relationnel ; l'espace est construit par les relations structurales entre instances sociales.

La *New Geography* positiviste, une grande partie du courant de l'analyse spatiale ou encore les tenants des lois générales de l'espace s'établissent sur le carrefour relationnel positionnel :

- l'espace est bien relatif à des agencements variables, mais
- il s'agit d'un jeu de forces et de formes dont le contenu et la dynamique sont circonscrits à des attributs donnés au départ.

Cependant, la géographie ne se réduit pas seulement à une projection des sociétés sur un espace considéré comme passif comme la sociologie spatiale ou la cartographie sociale et la géographie (Péguy, 1996). L'espace n'est pas qu'une projection de réalités économiques, sociologiques et politiques non-spatiales. Ainsi, la *New Geography* positiviste et une grande

partie du courant de l'analyse spatiale ne considèrent pas l'espace comme un simple support mais comme un agent qui produit des agencements variables. Le jeu des formes et des forces participe au contenu et à la dynamique de la société. Ainsi, pour R. Brunet, (1996, p.193) « l'espace est à la fois environnement et partie des sociétés. A la fois « entrée » et « sortie » du système social ». L'espace est donc considéré par le courant de l'analyse spatiale comme **un agent à part entière, certes différent des agents socio-économiques car dépourvu de finalité et d'intentionnalité, mais qui ordonne l'action de ces derniers** (Charre, 2004). Cet espace-agent est en interaction avec la société, il est à la fois organisé et organisant, à la fois structure et dynamique. Resitué dans un cadre systémique, l'espace géographique possède, comme tout système, un héritage spatial qui exerce des contraintes sur les projets d'une société mais qui est aussi un potentiel que les agents socio-économiques réévaluent continuellement. En conséquence, son organisation spatiale n'est jamais figée. Par ses structures héritées, il a un potentiel de réactivité aux perturbations introduites dans le système qui émanent notamment des actions d'aménagement, ce qui peut se traduire par une « acceptation » ou au contraire aboutir à un « rejet » de la perturbation.

La Géographie a pour objet l'espace des sociétés, la dimension spatiale du social. En ce sens, l'espace est une des **composantes multidimensionnelles** de la société au même titre que le temps. Celle-ci forme un Tout systémique qui constitue un objet de recherches spécifiques aux sciences sociales. Par conséquent, elle ne peut pas être divisée en dimensions autonomes traitées séparément par chaque discipline, l'espace pour la Géographie, le social pour la Sociologie, le temps pour l'Histoire, *etc.* Comme le rappelle Ch.-P. Péguy (1996), « Le grand enseignement que le monde attend des sciences sociales est que le temps n'est jamais ponctuel et que l'espace n'est jamais instantané ».

D'après le principe hologrammatique développé par Edgar Morin (2005), le moindre point de l'image d'un hologramme physique contient la quasi-totalité de l'information de l'objet représenté. En ce sens, si l'homme constitue la plus petite unité de la société, il faut en déduire que l'ensemble de la société est présente dans l'individu. De même, la dimension spatiale, objet de la géographie, contient toutes les autres dimensions. L'espace fait partie intégrante de la société qui est elle-même présente en entier dans l'espace*. De plus, la plus petite échelle de l'espace représente une société multidimensionnelle complète (le local) qui contient elle-même l'intégralité des logiques de la dimension spatiale de la société en question. Ainsi, le géographe, dans son analyse se focalise sur de multiples échelles : des espaces individuels aux agencements spatiaux complexes.

Ceci est
transposable à
toutes les
différentes
dimensions

Parallèlement, l'affirmation d'une dimension spatiale découle d'un constat empirique : celui du rôle fondamental de l'espace dans la vie des hommes, donné par la distance entre les objets de la société. Ainsi, la définition de l'espace en Géographie est centrée sur **les rapports sociaux** résultant de **la distance**. Les situations limites telles que l'enclavement (distance infinie, car pas de relation possible avec les autres) et l'ubiquité (distance éliminée) servent

toutes deux de références aux autres. Il est important de noter que la Géographie ne doit pas seulement constater l'existence de distances mais également les mettre en évidence et les expliquer dans le contexte sociétal, par les acteurs, leurs pratiques et leurs stratégies traduites en agencements spatiaux. L'espace construit et reconstruit par les producteurs traduit leurs projets. Par conséquent, l'espace est doté d'une dimension idéale qui sert à la fois à comprendre et à justifier la position et les stratégies des individus par les représentations spatiales. Un espace, quel qu'il soit, est ainsi un agencement construit par des opérateurs et qui résulte de la configuration spécifique des échelles, des distances et des dimensions idéales.

La dimension spatiale est la transcription matérielle ou visible des composantes d'un système, de ses principes et des modalités de son organisation. Ainsi, cette dimension est assimilée à la forme, la structure et l'agencement construit. « C'est bien pourtant les agencements (spatiaux) des éléments matériels et immatériels, les configurations et la situation ainsi produits... » (Lévy et Lussault, 2003, p.988). Ainsi, le géographe qui analyse l'espace urbain doit s'intéresser à l'organisation et à la différenciation des quartiers, leurs relations, leurs flux, leurs perceptions, leur ségrégation, leurs articulations *etc.* (Brunet et Alii, 1996).

2. Du dialogue entre forces et forme(s) naît l'espace géographique

L'espace et la forme sont deux concepts difficilement différenciables car ils sont imbriqués l'un dans l'autre. Le terme de *forme* en français est polysémique tandis que l'anglais, lui, possède deux mots différents pour individualiser les deux sens : *form* est la forme et *shape*, le contour. A la fois contenu et contenant, la forme est dynamique : elle naît, grandit, évolue et parfois meurt.

La **forme** se définit d'abord comme la **configuration interne** d'un élément qui se veut **homogène** et **stable**. De cette structure « invisible » naît une forme « visible » par une discontinuité qui rompt avec son environnement. En conséquence, elle se distingue du **fond**.

Par conséquent, la question de la matérialité de la forme se pose également : « la forme est-elle inhérente à notre perception [ou a-t-elle une] existence en dehors de nous [donc] inhérente à l'objet que nous isolons. [...] La forme est-elle essentiellement perçue ou pensée ? » (Huyghe, 1971, p.78-79).

En introduction de ce chapitre, nous avons évoqué le regain d'intérêt pour les théories morphologiques qui visent notamment à comprendre la morphogénèse. Ces théories nous interrogent sur l'interaction entre les forces qui engendrent la dynamique et les formes qui en résultent. Par conséquent, le lien entre forces et formes est interrogé afin d'analyser la tridimensionnalité des formes naturelles ou anthropiques.

2.1. La forme, un contenant et un contenu

2.1.1. Ce qui nous entoure : un système où agissent des forces.

Un des points de départ théoriques de la *Gestalt** consiste à reconnaître l'**organisation naturelle** des **parties** qui s'agrègent ou se désagrègent au sein d'un « **tout** ». Le tout peut être assimilé à l'espace en tant que cadre de nos représentations et des parties, des corps qui s'y développent et se meuvent. Pour développer la théorie de la forme, Von Ehrenfels s'appuie sur un exemple (Guillaume, 1979, p.17-18).

« Soit un thème composé de n sons consécutifs, et soit un nombre égal de personnes ; faisons entendre à chacune un des sons ; ces perceptions ne contiennent rien des qualités de la mélodie elle-même, aucune des qualités structurales ou qualités complexes qui apparaissent quand tous ces sons successivement donnés à une même conscience. [...] Un de ces caractères est très remarquable : la mélodie peut être *transposée* dans un autre ton. Elle reste pour nous la même mélodie, si facile à reconnaître que parfois nous ne nous apercevons pas du changement. Cependant *tous* ses éléments sont altérés, soit que tous les sons soient nouveaux, soit que certains d'entre eux occupent d'autres places avec d'autres fonctions. Par contre, si *une seule* note de la mélodie originale est altérée, nous avons une autre mélodie, avec des qualités formelles différentes. »

La *Gestalttheorie* est née de l'esprit d'un psychologue viennois, Von Ehrenfels, à la fin du 19^{ème} siècle (Guillaume, 1975). Pour la plupart des scientifiques s'appuyant sur cette théorie, elle est « à la fois une philosophie et une psychologie »

Si une mélodie composée de n sons consécutifs est écoutée par un certain nombre de personnes, leurs perceptions se basent sur les qualités formelles de la mélodie elle-même. Par conséquent, si la mélodie est transposée à un autre ton, cette mélodie sera reconnue même si tous ses éléments ont changé; tandis que si un seul son change, l'auditoire ne percevra pas la même mélodie.

Le « tout » peut être décomposé en parties : celles-ci peuvent être brusquées par un phénomène apparemment mineur. Le tout peut en être transformé ou bien rester intact malgré un bouleversement des parties qui peut apparaître comme majeur.

En ce sens, la théorie de la forme rejoint la théorie du chaos, puisqu'elle suggère que si l'une des conditions (éléments) change, cela peut entraîner un changement local et/ou un changement global (dans la propriété de l'ensemble de la forme).

Une partie dans un tout n'est pas seulement un élément individuel et libre, elle est également partie intégrante de ce tout. Par conséquent, cette même partie ne serait pas identique dans un autre tout. Un des principes de base de la *Gestalttheorie* est édicté comme suit: *une forme est autre chose ou quelque chose de plus que la somme de ses parties*. Ainsi les formes sont des « unités organiques qui s'individualisent et se limitent dans le champ spatial et temporel de perception ou de représentation » (Guillaume, 1975, p.22). Ce dernier point rejoint la théorie des systèmes.

De ces définitions résulte un **premier constat** : la forme apparaît comme le **résultat de la** (des) **force(s)** ou comme la mise en évidence à un moment donné de la **structure interne**. Ainsi, la forme apparaît comme statique.

Par opposition, l'idée de force renvoie à la dynamique, au processus, au mouvement. Cependant, les forces faisant évoluer les formes, elles deviennent elles-mêmes changeantes et dynamiques. Elles sont alors capables de rétroagir sur les forces, mais avec des temporalités différentes, l'évolution de la forme paraissant plus lente que celle de la force. R. Huyghe (1971) fait remarquer que le binôme Forme et Force est un couple dialectique, solidaire de celui de l'Espace et du Temps. La force nécessite, en effet, une certaine durée pour agir, c'est une action du temps sur la forme. En revanche, la forme renvoie à l'espace, la rétroaction de la forme sur la force. Elle est une réponse de l'espace sur le temps, qui est plus lente car les structures et les propriétés spatiales sont plus pérennes. Des boucles de rétroactions établissent donc les relations entre forme et force.

Le deuxième constat est que **chaque partie** possède des **fonctions déterminées** et constitue, à l'intérieur de l'ensemble, des formes dites de second ordre. Cet emboîtement des échelles est très pertinent dans l'analyse des interactions entre formes et forces : d'une part, à une échelle donnée, une forme est un agencement de formes à une échelle inférieure ; d'autre part, les forces s'exercent à différentes échelles, du global au local. Ainsi, Thom explique que

paradoxalement « les problèmes locaux exigent pour leur solution des moyens non locaux - ou globaux ; alors que l'intelligibilité, elle, exige la réduction du phénomène global à des situations locales typiques, dont le caractère prégnant les rend immédiatement compréhensibles » (Boutot, 2008). Les deux notions sont multiscalaires par essence, par conséquent leurs interactions le sont également. Par exemple, les principes de Développement Durable édictés au cours de la Conférence de Rio en 1992 ont pour vocation de s'appliquer à toutes les échelles. Pour prendre un autre exemple, le phénomène d'urbanisation a conduit à l'emboîtement et à la superposition des périmètres d'actions, du quartier à la communauté d'agglomérations.

Cette réflexion sur les interactions entre forme et force conduit, du fait de l'emboîtement des échelles spatiales, à leur caractère multiscalaire. Rappelons que pour Descartes, il n'y a pas de différence entre le corps et l'étendue car le premier n'est rien d'autre qu'une partie en trois dimensions de la seconde. Dans ce sens, **l'étendue peut être tour à tour corps puis étendue à l'infini ; à chaque itération correspond une échelle** (figure 3). « La Forme, et la Forme seule peut-être, se retrouve à tous ces niveaux, constitutive de la matière comme de l'image, expressive de l'esprit, créant entre eux un lien énigmatique » (Huyghe, 1971, p.44).

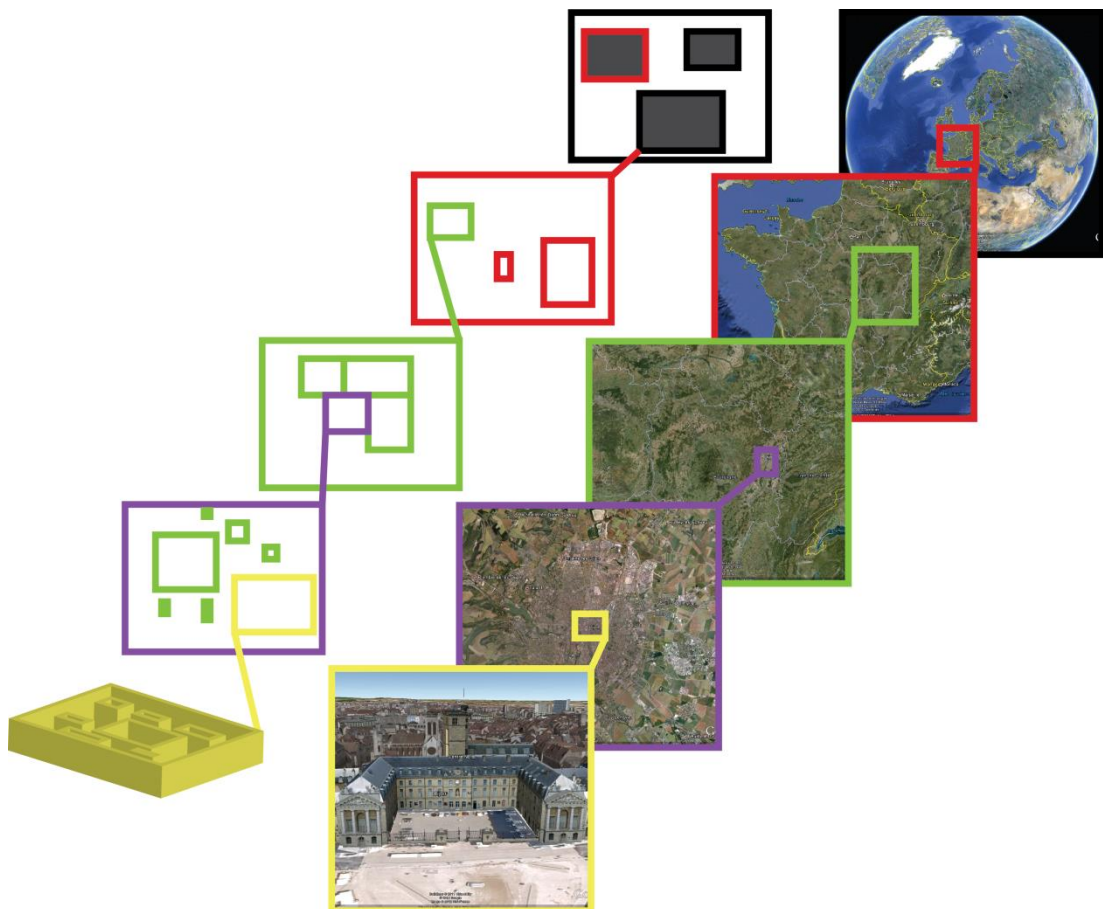


Figure 3 : L'aspect multiscalaire de la forme et échelle spatiale
(Sevenet, 2013)

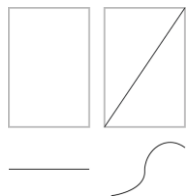
Par conséquent, pour comprendre une situation - une forme dans l'espace - il importe non seulement d'en analyser les composantes, mais surtout d'en avoir une vue synthétique, de les percevoir dans un ensemble plus vaste, celui du contexte global. « [...] L'évolution globale d'un système se présente comme une succession d'évolutions continues, séparées par des sauts brusques de nature qualitativement différente » (Thom, 1999, p.60). C'est ainsi que la théorie des Catastrophes décrit les discontinuités dans l'évolution du système.

2.1.2. Ce qui nous sépare : la discontinuité

Rappelons que pour Piaget (1967, p. 20), la perception d'un nouvel élément comme une **figure se détachant du fond** constitue le processus d'assimilation. La pensée réalise une différenciation. Les psychologues de la Gestalt ont conceptualisé cette idée. La théorie issue de ce courant s'appuie notamment sur l'opposition entre forme et fond.

Une forme naît d'un ou de plusieurs déséquilibres (absorptions/ fractures, agrégations/ désagrégations). Le concept de **discontinuité morphologique** est à la base de la **théorie des catastrophes** définies par le mathématicien français R. Thom en 1972. Une catastrophe, dans le langage courant, évoque un événement imprévu, un bouleversement dramatique. Cette définition est reprise en partie dans cette théorie puisque Thom (1999) précise qu'une catastrophe apparaît lorsqu'une variation continue des causes entraîne une variation discontinue des effets, c'est-à-dire lorsqu'il y a des effets imprévus d'un phénomène sans que cela corresponde forcément à un bouleversement dramatique. Cette théorie est fondée sur le concept mathématique de **bifurcation**, mais contribue également à la réflexion sur l'espace et surtout sur sa forme.

La bifurcation est un changement topologique dans l'espace de phase d'un système. Autrement dit, lorsqu'une fonction présente une discontinuité, c'est-à-dire que la valeur d'un point change brusquement pour une autre valeur, c'est un point dit catastrophique. Par extension, l'espace est constitué de points réguliers (zone de continuité) et de points catastrophiques (changement d'état ou discontinuité). Parallèlement, l'espace est composé de plusieurs objets/phénomènes perceptibles grâce aux « bifurcations spatiales » au sein de la zone continue. L'opposition porte donc sur la continuité (le fond) et la discontinuité (la forme).



L'analyse porte plus particulièrement sur la topologie de la forme en se basant sur le fait que la forme se déploie sur un fond. En effet, si un fond est homogène et qu'il se modifie de manière continue, il n'y a pas de forme ; tandis que si une discontinuité apparaît, une forme se dessine. Il faut donc que le substrat connaisse un changement de ses propriétés qualitatives.

« Quelle que soit la nature de la réalité, il est indéniable que notre univers n'est pas un chaos : nous y discernons des êtres, des objets, des choses que nous désignons par des mots. Ces êtres ou ces choses sont des formes, des structures données d'une certaine stabilité ; elles occupent une certaine portion de l'espace et durent un certain laps de temps... » (Thom, 1972)

La forme est marquée alors par une (des) discontinuité(s) et elle s'individualise du fond. Pour illustrer ce propos, l'exemple qui est souvent utilisé (Guillaume, 1975, Thom, 1999) est celui du trait noir tracé sur une feuille blanche qui provoque un changement de paramètre (la couleur) et marque une discontinuité. Ainsi, la forme est définie comme une **discontinuité** du milieu à l'intérieur duquel règne une certaine stabilité qui permet de l'identifier et l'isoler. « Prendre forme, c'est se constituer [...] dégager un principe d'unité qui isole de l'indéterminé... » (Hyughe, 1971, p.44). La notion de **saillance** que nous avons présentée ci-dessus renvoie à cette idée d'**émergence** d'une figure sur un fond puisqu'elle se définit comme un élément visuel distinguable par ses propriétés physiques et/ou ses aspects cognitifs mis en jeu lors de leur perception.

Tout ce qui peut être **isolable**, que ce soit par la vue ou par la pensée, possède alors sa propre **individualité** et peut être analysé en **interaction** avec son **environnement**. La **distance** n'est pas seulement une métrique, mais s'entend également dans le sens d'**espacement**, la distance socio-spatiale joue un rôle dans la relation entre les éléments (parties) dans le système (tout). Par exemple, « si on rapproche, sans les mettre en contact, deux corps isolés, la structure des charges sur chacun d'eux se modifie « par influence ». Si on les éloigne, il arrive un moment où chacun a repris sa structure propre » (Guillaume, 1975, p.29). De même que « la mélodie, disait Ehrenfels, n'existe que si les notes se succèdent « dans une même conscience » [...] à condition que les intervalles de temps entre ces notes ne soient pas trop grands » (Guillaume, 1975, p.30). A ce propos, Isnard et *Alii* (1981, p.64) expliquent que « chacun des éléments consécutifs de l'espace géographique est une réalité, un objet observable et mesurable qu'il est tentant d'isoler d'autres pour le définir par ses caractères originaux ». L'espace géographique signifie alors « intervalle », « séparation », donc est synonyme d'espacement : « l'espace ainsi entendu en son sens primitif est un écart, une distance » (Brunet et *Alii*, 1996, p.193). Ainsi, le modèle gravitaire formalise le concept de distance et d'intensité de relation (influence) entre les lieux. Par ailleurs, lorsqu'il entame l'étude d'une distribution spatiale, le géographe se fixe généralement comme premiers objectifs de découvrir les zones de structure semblable, de repérer les discontinuités et de déceler les différents niveaux de discontinuité, donc les éventuels emboîtements d'échelles. Par conséquent, une discontinuité est observable et/ou mesurable dans la mesure où elle est le résultat de variations qualitatives (Thom, 1999, INTERFACES, 2008). La variation doit être suffisamment perceptible par rapport à l'ensemble et concentrée dans l'espace pour être perçue et traduire une **idée de seuil**.

La **troisième dimension** est **essentielle** pour identifier les discontinuités. La figure 4 illustre le processus de découpage de l'espace en s'appuyant sur la **verticalité des objets**. Dans l'exemple illustré figure 4, il est possible de distinguer soit des espaces naturels cohérents (rivière, plaine, plateau ou montagne), soit des éléments urbains similaires.

Les limites des territoires*, créées par l'homme, se sont tout d'abord appuyées sur les séparations naturelles de son milieu. Cependant, la limite marque, aujourd'hui, des

discontinuités de moins en moins visibles (par exemple entre les ensembles culturels ou les espaces urbains).

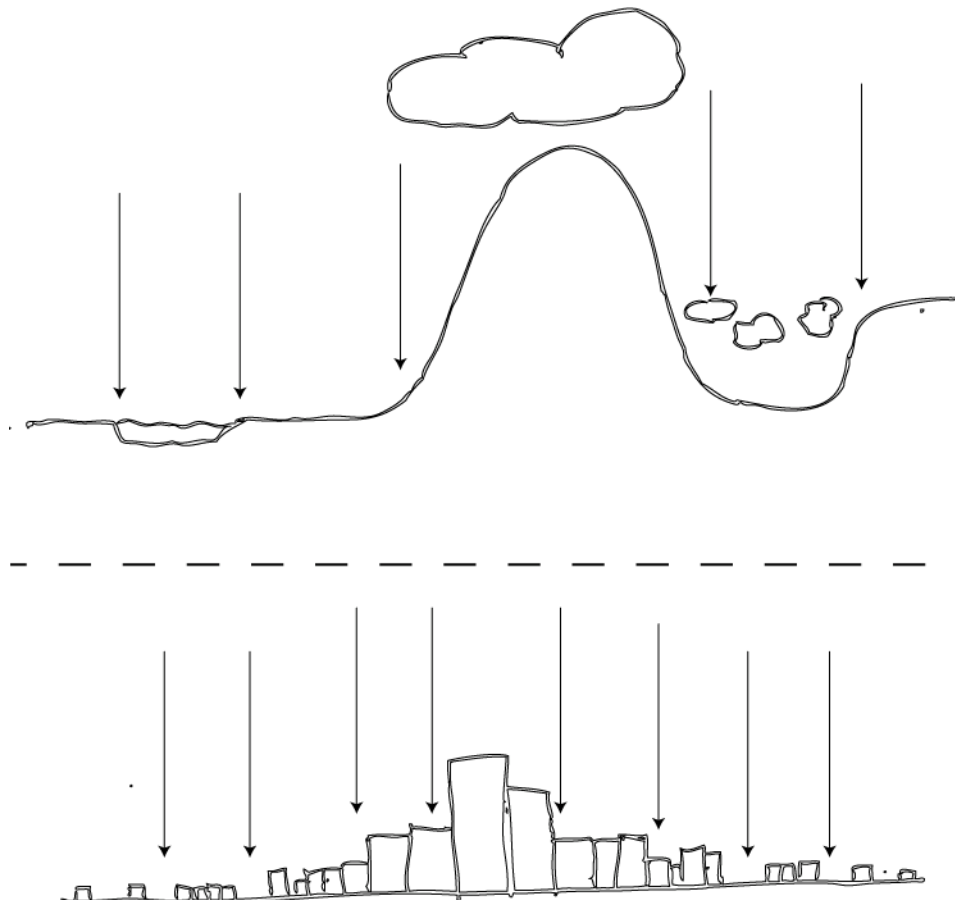


Figure 4 : Deux exemples de discontinuités observables illustrées par les flèches en s'appuyant sur la verticalité des objets (Sevenet, 2013).

Pour résumer, au sein d'un ensemble homogène s'agrègent des sous-ensembles homogènes entre eux, qui se différencient des autres sous-ensembles mais qui entrent tous en relation pour former cet ensemble. Dans ce sens, M-P. Corcuff (2007) assimile l'espace à un continu empirique dans lequel les formes (sous-espaces) introduisent des **coupures***. Cette distinction correspond à notre manière de **percevoir** le monde, « on l'a retrouvé en psychologie (en théorie de la perception) dans la distinction figure / fond, en sémantique dans la distinction **forme / contenu** et, comme on peut s'y attendre, en topologie générale, dans la distinction ouvert / fermé » (Thom, 1999, p.7)

Nous préférons le terme de discontinuité

2.2. *Forme(s) et forces : deux concepts indissociables*

Il convient de s'intéresser également à la création d'une forme et à ses déterminants. La morphogenèse s'emploie à mettre en exergue les formes par l'analyse des processus qui leur ont donné naissance, les animent et les font évoluer. Ces processus sont des **forces**. Une force

« apparaît, en effet, comme une poussée active qui s'exerce dans la durée et qui remet continuellement en question la forme » (Huyghe, 1971, p 78). La force rapportée à la surface donne la pression, laquelle se manifeste

Elle exerce une pression sur la forme qui va répondre de deux manières :

- soit par des déformations de la surface considérée, donc l'émergence d'une nouvelle forme,
- soit par sa résilience (inertie de la forme et donc stabilité de sa structure).

Forme et force ne peuvent donc pas être définies isolément car elles sont indissociables. Ainsi, les données premières de la *Gestalttheorie* sont les formes ou les structures, « pour chercher ensuite par le jeu de quelles forces extérieures à ces matériaux [formes] indifférents, ceux-ci se grouperaient et s'organiseraient » (Guillaume, 1975, p.22). Il n'y a donc pas de matière et de forme sans force. Huyghe (1971, p.9) partage ce point de vue : « La Forme joue un rôle fondamental à tous les niveaux de la réalité, concrète et spirituelle, [et] elle est indissolublement liée à un partenaire, aussi universel qu'elle : la Force. Sans lui, la Forme ne se constituerait pas et pourtant, sans répit, il lutte avec elle pour la détruire ».

2.2.1. Stabilité dynamique des formes et résilience par l'adaptation

Une forme se **modifie** car les systèmes (spatiaux) évoluent et se transforment. Seule une **discontinuité** dans les rapports de forces pourra engendrer l'**émergence** d'une nouvelle forme qui se dégage de celles qui sont en constant équilibre et qui va alors agir sur la forme. C'est à cette force « supérieure » qu'il faut porter attention pour détecter l'émergence d'une ou de nouvelles formes.

La **théorie des catastrophes** se prête aisément à la définition des interactions entre forme et force. Rappelons simplement que la catastrophe, au sens strict du terme, se produit lorsqu'une **variation continue** des causes entraîne une **variation discontinue** des conséquences. Ainsi, selon cette théorie, l'émergence d'une forme correspond à sa modification constante mais imperceptible. Celle-ci est due à des rapports de forces équilibrés qui, à un moment donné, vont engendrer une nouvelle forme par l'apparition d'une force qui se dégage de l'équilibre de forces. Celle-ci constitue une **rupture** dans la **variation constante** engendrée par une **discontinuité**.

Selon Thom (1972, 1999), le changement d'état d'un système s'opère par une **bifurcation** qui coïncide avec le passage d'un **attracteur** à un autre. Cette propriété des systèmes peut éclairer les interactions entre forme et forces. La forme est soumise aux polarisations de différents attracteurs qui se manifestent comme des pressions qui la modulent. Toute forme résulte alors d'un conflit d'attracteurs. Mais pour Thom, même si la forme est reliée à son substrat et aux forces qui l'animent, elle est aussi autonome et obéit à des règles qui lui sont propres et qui sont parfois différentes de celles des forces.

La figure 5 illustre de manière théorique le processus de transition catastrophique menant à une bifurcation dans le cadre de changements d'écosystèmes (Kéfi, 2012). L'image A présente

la transition catastrophique qui se produit lorsque deux états stables d'un écosystème (par exemple, sain et dégradé) coexistent pour une série de valeurs de la condition environnementale. Ces états stables sont séparés par un équilibre instable (ligne grise - bistabilité) qui marque la limite des deux bassins d'attraction des équilibres stables (lignes noires). L'image B présente quant à elle, les paysages de stabilité de l'écosystème à différents points (a-f) le long du gradient de conditions environnementales. Il y a deux façons de passer d'un état à l'autre et donc d'effectuer une transition catastrophique : par modification du paysage de stabilité (flèches vertes) ou par perturbation de l'état de l'écosystème (flèches oranges).

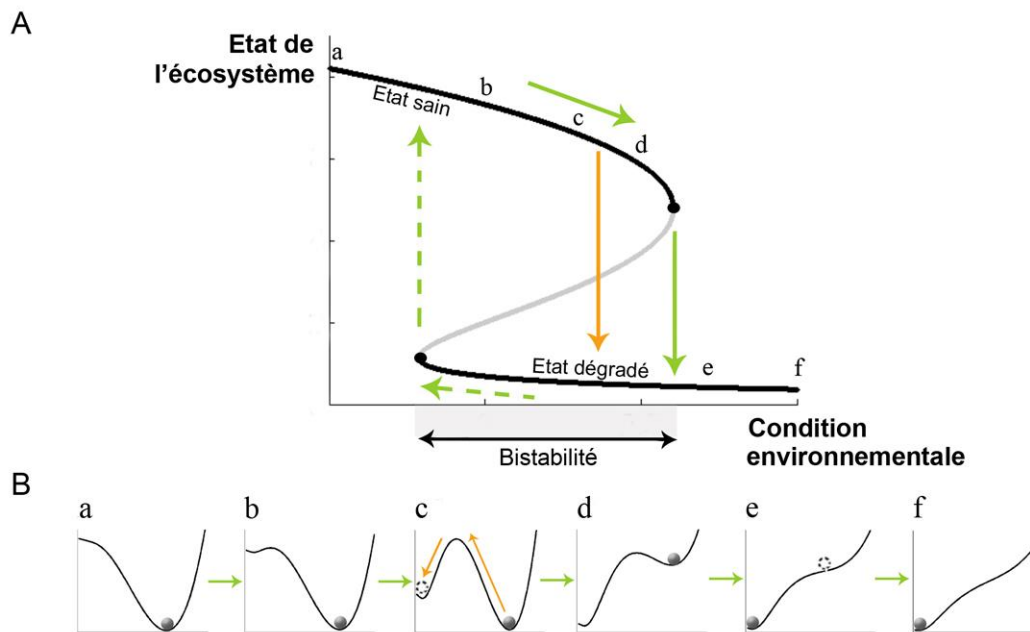


Figure 5 : Explication intuitive d'une transition catastrophique (Kéfi, 2012).

Parallèlement, ces relations produisent souvent des résultats, soit contre-intuitifs, soit antinomiques, qui confirment la propriété systémique de leur fonctionnement. Par exemple, l'interaction entre la forme urbaine et l'augmentation des vitesses de déplacement (correspondant à une force qui s'exerce sur cette forme) va produire deux résultats :

- un résultat contre-intuitif, car l'augmentation des vitesses de déplacement n'a pas permis de se déplacer plus vite mais de se déplacer plus loin ;
- un résultat contradictoire, le monde connaît une contraction de l'espace-temps (par rapprochement des lieux) et en même temps une dilution du fait urbain (par la périurbanisation).

Ce simple exemple permet de justifier la nécessité d'analyser les interactions entre la forme et la force en utilisant l'approche systémique comme une des bases méthodologiques.

Cette rétroaction entre force et forme rappelle le fonctionnement des éléments d'un système. Pour Guillaume (1975, p.24), « les termes de forme, structure, organisation appartiennent au langage biologique autant qu'au langage psychologique ». Ainsi, les principes formels des

organismes vivants ont été décrits entre autres par D'Arcy Thompson et ceux de la pensée par les psychologues de la *Gestalttheorie*. Un être vivant est un organisme, un individu séparé du milieu, malgré les échanges matériels et énergétiques qui s'opèrent entre eux ; c'est un système dont les parties, tissus et organes, dépendent du tout, et celui-ci semble déterminer leurs caractères. Cette organisation n'est pas seulement statique, mais dynamique, puisque le jeu de toutes les fonctions est solidaire [des parties] et que la vie de l'être résulte d'un **équilibre mobile** de tous les processus locaux. Le mot d'**adaptation** résume ces rapports complexes du tout et des parties. On peut donc rapprocher les **formes psychiques** et les **formes organiques** » (Guillaume, 1975, p.24).

De Rosnay (1977, p.126) appelle l'équilibre mobile, la **stabilité dynamique** et la définit par « l'équilibre dans le mouvement », c'est-à-dire que l'équilibre du système est dû à une multitude de modifications et de réadaptations des composantes du système afin qu'il garde la même forme et la même structure. Cette stabilité dynamique s'explique par « cette persistance [résilience] de la forme qu'est la stabilité dynamique » (De Rosnay, 1977, p.127). La stabilité dynamique est l'une des propriétés des systèmes spatiaux et elle leur permet de durer dans le temps sans changer de forme, grâce à une **adaptation constante** de la structure du système. L'équilibre de la forme ne signifie pas qu'aucune force n'agit sur elle pour la modifier. En réalité, le système est en dynamique constante : une multitude de forces s'affrontent et s'annulent en permanence mais restent en équilibre (De Rosnay, 1977, p.127) et assurent ainsi la persistance, ou la **résilience**, de la forme.

2.2.2. La forme tridimensionnelle comme résultante de la pression

Dans le paragraphe précédent, le principe d'évolution et de stabilité des systèmes a été expliqué. Ce cheminement amène logiquement à s'interroger sur la notion de force et plus particulièrement celle de pression.

Celle-ci se définit comme une force rapportée à la surface sur laquelle elle s'applique. Ainsi, une poussée exercée sur un sol, dans une zone donnée, se manifestera selon le type de sol et la résistance des roches par un plissement ou par une fracture (figure 6). Sur des phénomènes anthropiques, la pression s'exerce par des concentrations : l'accumulation de population ou de fonctions par exemple.

Une pression peut également combiner émergence et résilience. Par exemple, une pression peut s'effectuer dans une seule direction ou être contrainte par un obstacle ou une discontinuité : Accumulation contre l'obstacle tectonique des plaques, urbanisation touristique en front de mer (figure 7).

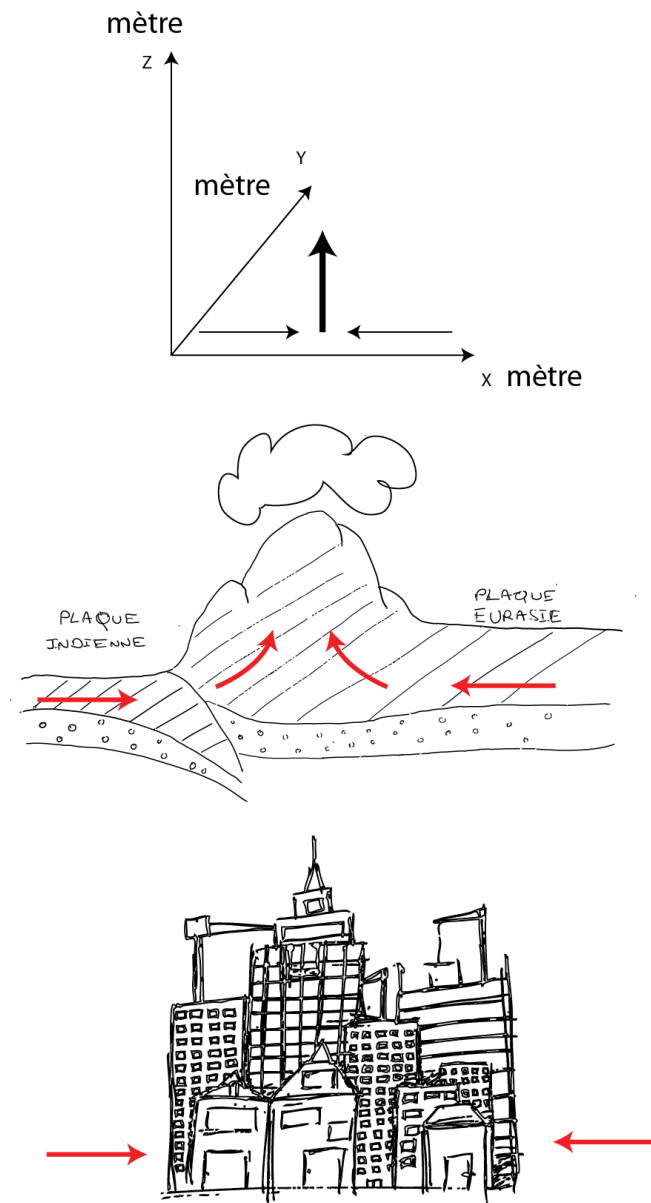
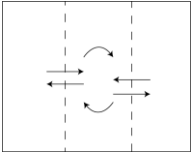


Figure 6 : Formes résultant des pressions ou des forces s'exerçant sur un espace (Sevenet, 2013).



Figure 7 : Benidorm 1960 et 2010 (source : [2] et Common Wikimedia).

Dans le cas d'une situation de contiguïté, la survie d'un espace dépend de sa capacité à exercer des pressions sur ses voisins. Ces pressions convergent et s'accroissent vers la limite commune. Se dessine alors une zone de contact aux limites floues dépendantes de la force des pressions produites*, une interface, dans laquelle il est susceptible de se produire une bifurcation. Cette dernière, qui correspond à un renversement de tendance du système spatial ou un changement qualitatif d'état, est perceptible par un nouvel agencement spatial : disparition ou croissance d'activité, émergence d'une forme ou d'une structure spatiale. Les différenciations spatiales se marquent alors par une **discontinuité**.



Par exemple, la frange périurbaine est un espace différencié entre l'urbain dense et concentré et le rural peu dense et dilaté ; mais aussi une zone d'interface entre ces deux mondes où se concentrent des enjeux sociaux et des conflits d'usage.

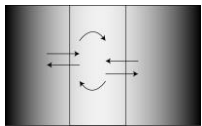
Sous l'effet des pressions qui s'exercent, la réactivité de l'espace varie selon les systèmes spatiaux et leurs **propriétés dynamiques**. Ainsi, une distinction est généralement établie entre les interfaces et les discontinuités.

Les interfaces sont appréhendées comme des systèmes particuliers, des lieux d'interactions entre les espaces et les sociétés, qui combinent, additionnent, transforment les flux entre les deux systèmes interfacés*. L'interface est en effet perçue comme jouant le rôle de régulateur entre les interactions socio-spatiales et les transformations spatiales ; elle parvient ainsi à concilier des échanges et des fonctionnements apparemment contradictoires ; par exemple, le point de passage à une frontière entre deux pays en conflits.

L'**interface** possède une **stabilité** et une **capacité à résister** aux perturbations puisqu'elle maintient l'équilibre global entre les déséquilibres partiels nés de la différenciation spatiale (INTERFACES, 2008). De la différenciation naît l'interface qui va elle-même en produire. Elle met en relation des lieux mais de ce fait en exclut d'autres (INTERFACES, 2008). Les interfaces sont souvent **soumises à des pressions** de natures diverses car elles sont convoitées. De plus, les interactions entre forme et force peuvent produire des résultats antagonistes, les interfaces seraient alors des espaces contradictoires, dans lesquels se concentrent des logiques opposées. Elles subissent alors d'importants conflits d'intérêt.

Ces espaces sont donc soumis à des forces qui font émerger ou perdurer des enjeux. La frange périurbaine est un espace d'interface car elle est soumise à différentes forces : pression de l'urbanisation (saturation de la ville), pression exercée par les comportements humains (absence d'éléments naturels, volonté d'accéder à une maison individuelle, *etc.*), pression exercée par les éléments d'ordre physique (hostilité du relief, protection des espaces naturels *etc.*). En ce sens, ce type d'espace possède une structure stable (faible volume bâti, présence d'espace vert *etc.*) mais se déplace au sein du système urbain ; en effet, il existe toujours en frange des zones denses mais s'éloigne au fur à mesure que le front d'urbanisation avance.

Ainsi, la formalisation des interactions entre la forme et la force fait appel à des concepts clés. Ces derniers permettent de définir et de comprendre la dynamique de l'espace géographique.



Cette première étape de formalisation des concepts de forme et force, ainsi que de la nature de leurs interactions, permet de dresser quelques hypothèses sur la démarche méthodologique permettant de détecter formes et forces :

- Il ne faut pas chercher à isoler la forme de la force mais analyser l'ensemble du système car la somme des parties n'est pas égale au Tout. L'analyse régionale doit **repérer des espaces cohérents**.
- Au-delà de la dimension visible de la forme, il faut s'interroger sur sa structure interne et sur la manière dont elle se distingue du cadre environnant. C'est ce qui motive la détection des **limites** et des **discontinuités**.
- Une attention particulière doit être portée aux discontinuités car ce sont des lieux de tensions et de rupture où s'affrontent la forme et la force. D'où l'intérêt de rechercher des **interfaces** entre systèmes sociaux et spatiaux contigus et/ou interreliés.

3. La formalisation de la forme en 2D et 3D dans les analyses géographiques

3.1. Communiquer par la carte une information spatialisable

Depuis longtemps, le géographe a cherché à représenter l'information spatiale recueillie sur le terrain. Faire une carte, quelle qu'elle soit, relève d'une démarche scientifique spécifique : communiquer par l'image une information « spatialisable ». La carte est une représentation de l'espace qui fixe la matière et constitue en elle-même un espace propre, support d'usage spécifique. Dans les années 60, Jacques Bertin (géographe et cartographe) introduit la sémiologie graphique en géographie. Il s'inscrit dans une démarche très différente et extrêmement innovante compte tenu des travaux de l'époque. Cette méthode offre la possibilité de créer un point d'appui langagier pour la production et la diffusion des connaissances scientifiques sur l'espace (Lévy et Lussault, 2003).

En effet, pour que cette démarche soit efficace et la plus objective possible, il faut passer par l'application d'un certain nombre de principes et par l'apprentissage d'un langage graphique : la sémiologie. Il y a en effet nécessité de construire un langage spatial commun, en parallèle de la réflexion conduite sur la communication et de l'expansion de la sémiotique*.

Dans ce contexte, l'objectif de la sémiologie graphique est de créer des cartes « à lire » plutôt que des cartes « à déchiffrer ». Cette discipline propose une série de règles qui encadrent la pratique graphique (système graphique de signes) de manière à la rendre plus compréhensible. Les bases du langage de la sémiologie s'appuient sur **des éléments** graphiques, c'est-à-dire des formes d'éléments **géométriques simples** (point, trait et tâche) et sur **leur implantation**, c'est-à-dire leur **localisation**. Ces éléments sont décrits par des variables visuelles qui varient en termes de taille, forme, couleur, valeur (ou intensité ou dégradé), texture-structure (trame), grain et orientation.

La nécessité d'un langage commun se justifie d'autant plus aujourd'hui dans la mesure où la cartographie (surtout automatique) est utilisée dans de nombreux domaines autres que la géographie (sciences économiques, sciences de la nature et de la vie, aménagement du territoire et l'urbanisme). La carte joue désormais un rôle stratégique. J-C Loubier (2004, p.77) rappelle qu'« on compte sur leur universalité et leur simplicité d'accès comme si ce mode de représentation pouvait s'affranchir des disparités de points de vues liées aux perceptions des acteurs ».

Cette réflexion soulève la question de ce que représente la carte, et de manière plus générale, toute image. M. Lussault (2003) s'inscrit en faux contre l'idée que la carte montre, en le déformant, un espace réel « objectif », existant en soi, indépendant de l'observateur et des acteurs. Mais, considérant que les réalités spatiales construites sont toujours des hybrides de matières, de pratiques et d'idées, il défend l'idée que l'image « représente ce qu'elle invente, ce qu'elle fait advenir *etc.* L'espace offert par toute image n'est pas seulement une

L'étude des signes et de leur signification. Davantage, utilisée en dehors de la France, différent de la sémiologie ou la sémiologie qui est la science des signes ou plus précisément la science qui étudie la vie des signes au sein de la vie sociale.

représentation spatiale, un double mimétique, une réplique en réduction ; c'est aussi de l'espace en propre, support de discours et de pratiques spatiales des opérateurs (élus, urbanistes, habitants, *etc.*) (Lussault, 2007).

3.2. La troisième dimension : outil descriptif et pédagogique

Dans un article de 1936, P. George témoignait déjà de l'importance des blocs diagrammes, autrement dit une représentation tridimensionnelle d'un bloc d'espace, pour enseigner la géographie. Pour lui, il est nécessaire de suppléer à l'expérience par l'initiation visuelle, par un choix d'images représentant par exemple les divers stades d'une transformation géographique. La géographie, science de l'espace, nécessite les trois dimensions, *de facto*, la carte ou la coupe topographique sont des représentations difficilement intelligibles pour les novices tandis que le bloc-diagramme permet de réaliser de manière concrète les volumes.

3.2.1. L'utilisation de la troisième dimension en géographie

Les blocs diagrammes, notamment régionaux, sont les premiers modèles tridimensionnels en géographie, principalement mobilisés en géographie physique et en géographie rurale ; R. Lebeau a, par exemple, proposé des représentations de la maison rurale (figure 8).

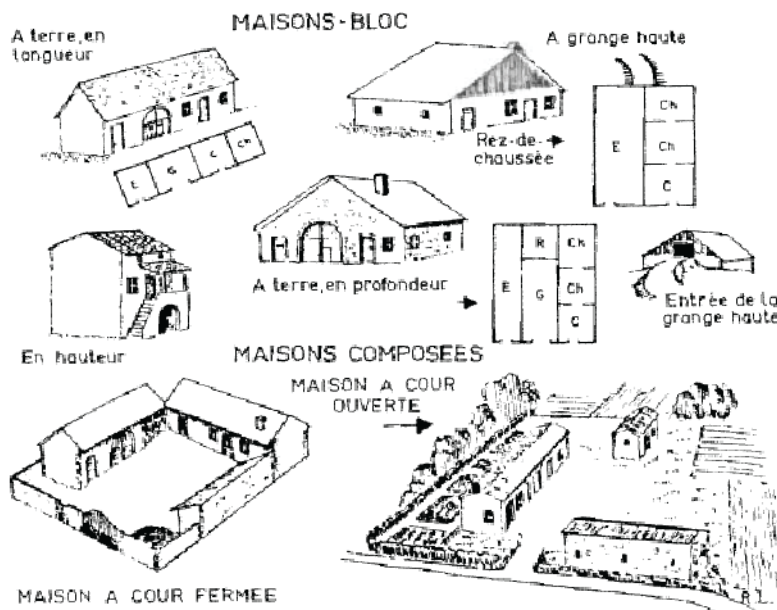


Figure 8 : Modèles de maisons rurales, deux niveaux de réduction réelle (d'après Lebeau, 2004).

Par la suite, la représentation en bloc diagramme, enrichie par la couleur, est employée pour décrire des phénomènes géographiques de dimension régionale. La vocation pédagogique de la troisième dimension s'exprime clairement dans la morphologie du relief karstique, aérien et souterrain des Grands Causses (figure 9). La carte de situation des Pyrénées (figure 10), est une carte en relief, où la dimension 3D est un élément majeur, au même titre que le réseau hydrographique, les grands centres urbains et les données administratives.

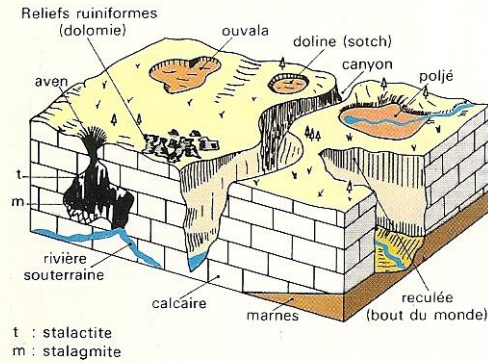


Figure 9 : Représentation des formes karstiques par bloc diagramme (Ferras, 1975).

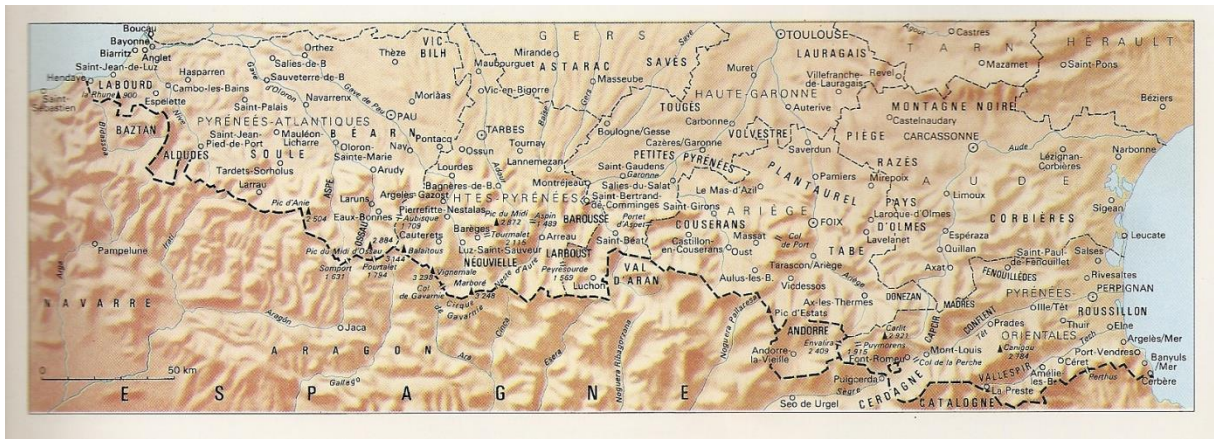


Figure 10 : Représentation de la chaîne des Pyrénées (Brunet et Bertrand, 1975).

Les premiers dessins réalisés à la main ont été depuis remplacés par l'infographie, grâce au progrès de l'informatique. L'analyse paysagère fait grand usage des blocs diagrammes pour l'étude des trajectoires de l'évolution du paysage et leur prospective (Poux, 2011), comme l'illustre la figure 11.

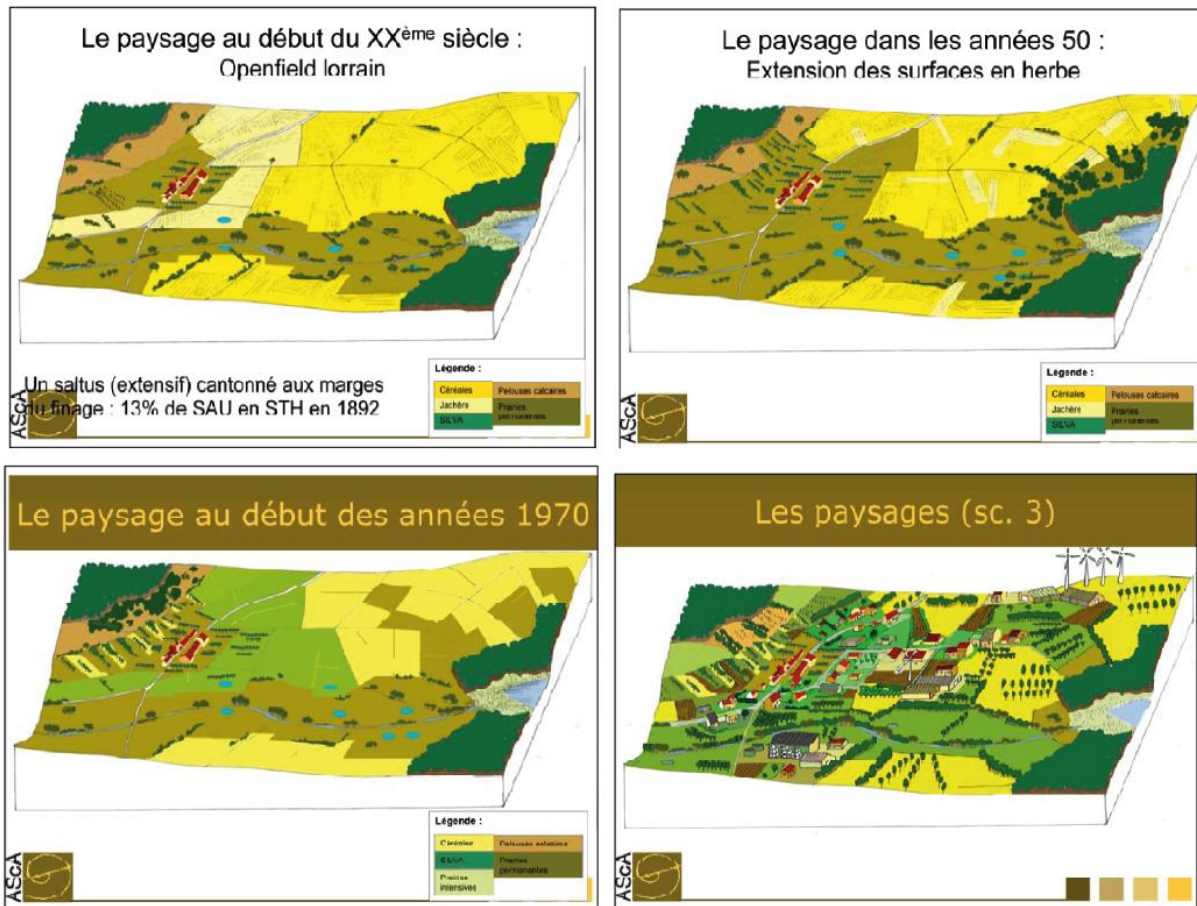


Figure 11 : Evolution paysagère du début du XX^{ème} siècle jusqu'aux années 1970 et exemple de scénario prospectif de l'évolution de ce paysage (Poux, 2011).

Aujourd'hui, les représentations 3D sont interactives et les lecteurs peuvent survoler un site ou se déplacer virtuellement dans une scène tridimensionnelle.

Les opportunités offertes par le développement de la modélisation en 3D se déclinent de l'univers des jeux-vidéo à celui de la recherche. En géographie, les premiers travaux utilisant la 3D ont surtout porté sur la modélisation du relief. Cependant, cette pratique est encore peu répandue pour les objets anthropiques. Pourtant, la verticalité définit la ville par opposition à la campagne horizontale.

L'introduction de la 3D en analyse spatiale peut donc prendre appui sur des méthodes et des modèles transférés, ceux issus de la mécanique des fluides par exemple. La modélisation tridimensionnelle développée en Dessin Assisté par Ordinateur (DAO) permet déjà de procéder à des analyses dans lesquelles la dimension verticale est importante, couplée à des modèles de mécanique des fluides (Pollution de l'air et nuisances sonores).

Jusqu'à maintenant, les supports de représentation étaient toujours bidimensionnels : le papier ou l'écran d'ordinateur. Cependant, des artifices ont été développés pour donner une impression de relief aux scènes animées (Loubier, 2004).

Les deux dimensions, utilisées dans la représentation (image) de la « réalité » diffèrent selon l'objectif et le mode :

- le dessin et la peinture offrent une représentation verticale à partir d'une vue horizontale. Ainsi ces modes représentent la hauteur et la largeur d'une scène, tandis que
- la représentation cartographique ou graphique, mode de représentation principal en Géographie, est une représentation horizontale à partir d'une vue du haut (verticale). Elles représentent ainsi la largeur et les longueurs d'une scène.

L'**ombrage et la perspective** ont été les toutes premières techniques, inventées à la Renaissance, pour rendre compte de la troisième dimension. Rappelons qu'avec la perspective, les peintres ont commencé à penser leur espace (pictural) en volume de manière semblable à la réalité.

Plus récemment, l'**effet stéréoscopique** naturel de notre vision a été exploité pour rendre une visualisation tridimensionnelle à partir d'affichage bidimensionnel de deux images de la même scène, prises d'endroits différents. Cette technique est notamment utilisée dans la télédétection.

Le problème de cette technique est qu'elle nécessite un équipement particulier et peu accessible. En conjuguant perspective, ombrage et mouvement, il est possible de restituer un effet tridimensionnel de manière efficace (Loubier, 2004).

Actuellement, la notion de **mouvement** est utilisée pour renforcer le réalisme d'une scène tridimensionnelle. Rappelons que le déplacement permet de faire prendre conscience à un observateur son espace par une succession de vues et par plusieurs points de vues ou perspectives. Ainsi, le **déplacement en temps réel** au sein d'un environnement 3D permet de multiplier les angles de vue de la même manière que si l'observateur se déplaçait dans son quotidien*.

La « réalité virtuelle » offre même de nouvelles opportunités grâce à la représentation d'objets qui sont normalement cachés.

Les développements des jeux vidéo, et plus généralement de la réalité virtuelle, ont permis de grandes avancées en infographie et dans le Dessin Assisté par Ordinateur et la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) de la modélisation tridimensionnelle. Un modèle géométrique 3D est une représentation tridimensionnelle d'une partie de la réalité, le plus souvent dans un environnement informatique. La modélisation géométrique sous-entend être en mesure de réaliser la construction et l'assemblage de formes élémentaires pour créer des objets de plus en plus complexes en respectant des contraintes topologiques (GTMG, 2010).

Cette modélisation est purement géométrique, ainsi le problème majeur rencontré dans l'intégration de la 3D dans les Systèmes d'Informations Géographiques vient de sa composante « Base de données ».

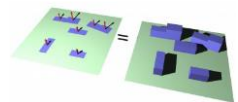
Le principal problème identifié pour la construction de modèles géométriques 3D est la structure de stockage pour la reconstruction de solides. Celle-ci dépend du niveau de précision du modèle mais également du volume de données. Ces structures peuvent être classées en deux catégories : matricielle et vectorielle (PSIG 1994, Foley et *Alii*, 1995, De La Losa 2000, Lachance et al. 2004) :

De La Losa (2000) puis Ramos (2003) proposent une classification des types de modélisations géométriques 3D (tableau 2). Certaines de ces méthodes sont expliquées brièvement, dans la mesure où elles présentent un intérêt dans l'intégration de la 3D dans les SIG. Pour plus de détails, il convient de se reporter aux auteurs cités précédemment.

Modèles 3D										
Modèles par balayage				Modèles volumiques					Modèles par frontières	
Balayage simple		Balayage hybride	Balayage généralisé	Modèles descriptifs		Modèles constructifs			Fil de fer	Boundary Representation
Transitionnel	Rotationnel			Voxel	Octree	CSG	Primitive instancing	Décomposition en cellules		

Tableau 2 : Les différentes catégories de modèles 3D (d'après De La Losa, 2000)

La modélisation géométrique la plus simple, appelée « Méthode par balayage » ou « par extrusion », équivaut à déplacer une surface le long d'une trajectoire afin de créer un volume. Cette méthode est celle qui a longtemps été employée dans le SIG afin de produire une visualisation tridimensionnelle des bâtiments où l'emprise au sol constitue la base qui est extrudée en fonction d'une hauteur attributive. Cette méthode présente l'avantage d'être simple, mais elle limite les possibilités de représentation d'objets ayant une forme complexe et irrégulière.



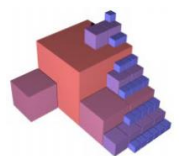
Modèle par balayage (De La Losa, 2000)

La méthode par balayage hybride utilise de plus des opérateurs booléens simples (union avec intersection vide) pour construire des objets plus complexes. Cette méthode a été utilisée pour produire les données tridimensionnelles TRAPU* à partir de la BD TOPO® et elle a également été reprise par le logiciel 3D Analyst® d'ESRI.

La base de données TRAPU (Tracés de Perspectives Urbains) a été la 1^{ère} base de données 3D produites par l'IGN.

Une structure matricielle peut également être utilisée, et correspond à une représentation volumique formée par combinaison de primitives volumiques. Il existe deux types de méthodes de modélisation, les descriptives et les constructives.

Les modèles descriptifs construisent un objet par sa décomposition en une collection de solides contigus et qui ne s'intersectent pas. Le plus simple est le modèle voxel qui est l'équivalent volumique du pixel (raster), donc la taille des éléments constitutifs est fixe. Les problèmes de ce type de modèle sont proches de ceux d'une structure raster. En effet la qualité des modèles dépend de la résolution du voxel, le volume des données peut-être très important si elles ne sont pas compressées et l'analyse spatiale est limitée dans la mesure où l'analyse topologique s'appuie uniquement sur l'adjacence des voxels. La structuration par octree répond au problème de la taille du volume de données car elle se



Modèle Octree (De La Losa, 2000)

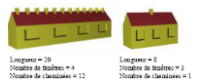
base sur une taille d'élément variable et certains voxels appartenant à un même objet peuvent être regroupés.



Modélisation par CSG
(Jarroush et Even-Tzur, 2004)

Les modèles constructifs se basent, quant à eux, sur la construction d'objet par assemblages d'éléments (primitives) ayant des formes simples comme le cube ou le cylindre (le modèle *Constructive Solid Geometry*). L'assemblage se fait grâce à des opérations booléennes plus complexes que celles utilisées dans les modèles par balayage (translation, rotation et facteurs d'échelle ; union, intersection et différence). La réalisation de ces modèles est assez simple grâce à l'utilisation de primitives simple. La qualité de représentation des formes est, ainsi, améliorée mais reste encore très simplifiée par rapport aux formes réelles.

La méthode par *Primitive Instancing* modélise et représente des objets plus complexes grâce à des « primitives paramétrables ». Ces primitives sont stockées dans une bibliothèque d'objets et sont recomposées en fonction de la scène 3D à modéliser. Le problème majeur de cette méthode est que plus le niveau de complexité est élevé, plus le nombre de la primitive « générique » est important. Ainsi, le caractère générique du modèle perd de son sens puisqu'il pourrait exister une primitive par éléments constitutifs.



Modélisation d'un bâtiment
En fonction de paramètres
(De la Losa, 2000)

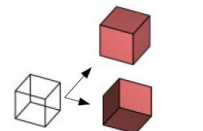
Les modélisations présentées ci-dessus sont caractérisées par l'utilisation d'objets volumiques, les modèles suivants sont, quant à eux, définis par des objets ponctuels, linéaires et surfaciques afin de reconstruire le volume des objets. Cette structure se rapproche le plus de la structure vecteur.

Le premier modèle s'appelle « fil de fer ». Il est simple et peu consommateur d'espace de stockage. Un objet est reconstruit à partir des coordonnées des points qui le composent puis des segments qui relient ces points. Ce type de modélisation pose deux problèmes. Tout d'abord, les objets sont représentés uniquement par leurs frontières, les faces sont implicites. Ensuite, l'interprétation des liens existants entre les points est difficile et ambiguë puisque l'ordre et la direction des arêtes ne sont pas explicites.

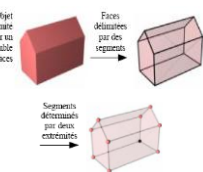
L'amélioration du modèle « Fil de fer » a conduit au développement du modèle *Boundary Representation*. Dans ce modèle, les objets sont définis par un ensemble de faces, décomposées en segments ayant deux points aux extrémités. Au niveau de complexité supérieur, l'orientation des faces (intérieur / extérieur) permet de reconstruire des volumes.

Un cas particulier du modèle BR est la décomposition des objets en simplexes où les seules faces autorisées sont les triangles. Un n -simplex est l'entité la plus simple de dimension n . Le 0-simplex est un point, le 1-simplex est un segment, le 2-simplex un triangle, le 3-simplex un tétraèdre, etc. La modélisation en simplexe est à la base du Modèle Numérique de Surface.

Les structures et les méthodes de modélisation géométrique en 3D sont de plus en plus performantes, le développement des techniques et des outils informatiques rendent possible la représentation d'objets de plus en plus complexes. Cependant, la construction de modèles géométriques en 3D par la CAO est extrêmement longue : s'il est assez aisé de mesurer des objets simples (un cube) ou de petite taille (un bâtiment), cela est beaucoup plus difficile pour des objets complexes (avec des formes irrégulières) ou de grande taille (une ville). Se posent



Modèle « fil de fer »
(De la Losa, 2000)



Modèle BR
(De la Losa, 2000)

alors deux problèmes : d'une part l'acquisition d'une information en 3D précise et modélisable et d'autre part le développement de méthodes de modélisation permettant l'automatisation des procédures.

3.2.2. Des précautions à prendre en compte

De plus, la troisième dimension est souvent associée à la mise en perspective/relief des objets. Pourtant, comme l'explique de Kerchhove (2003), « le monde de la 3D numérique ne fonctionne pas comme la perspective. La perspective c'est la translation du toucher vers la vue. » On représente ce qu'on ne peut pas toucher. « La 3D c'est la transcription de la vue vers le toucher *etc.* » puisque, par l'interactivité, il est possible de s'approcher d'objets que l'on ne peut pas toucher. « Cette sensation tactile autant que visuelle est ce qui rapproche les maquettes numériques des maquettes matérielles. » (Joliveau, 2004, p.404). Ainsi la maquette numérique offre la possibilité de saisir une nouvelle réalité et de nouvelles perceptions. « La visualisation de paysages numériques sur un écran n'a pas vocation à simuler une expérience réelle d'immersion paysagère ou à se substituer à une perception directe. Elle doit s'envisager comme une nouvelle expérience, un mode inédit de parcours d'un territoire déjà connu par la présence physique » (Joliveau, 2004, p.404).

Aujourd'hui, la représentation 3D des objets n'est plus un obstacle, grâce aux progrès de la DAO et de la CAO. Les différentes structures des modèles géométriques 3D ont été présentées ci-dessus. En fonction de la structure, le rendu d'un objet peut être bien différent lors de la visualisation. Globalement, la 3D est utilisée pour améliorer la visualisation et tendre vers une forme de réalité virtuelle dans la plupart des disciplines scientifiques (médecine notamment). Ainsi, ces dernières années ont vu la naissance et l'aboutissement de programme de recherche allant en ce sens.

Par exemple, l'équipe « Algorithmes, Architectures, Analyse et Synthèse d'images » (A3SI)*, ou l'INRIA ont développé plusieurs projets dont l'objectif est la production d'imagerie issue de modèles géométriques tridimensionnels construits à partir de données réelles (scanner, IRM, *etc.*). Le principal frein à l'utilisation des outils et des modèles développés dans ces projets est que la 3D est reconstruite grâce à la superposition d'images en 2D, prises en coupe. Outre le fait que ce type de données n'existe pas en géographie, il ne présente pas non plus beaucoup d'intérêt pour l'analyse urbaine en 3D (à part peut-être pour une analyse par étage).

Cette équipe fait partie du Laboratoire d'Informatique Gaspard Monge qui est une Unité Mixte de Recherche UPEMLV-ESIEE-ENPC-CNRS (UMR 8049)

L'intérêt porté à la construction d'environnement (urbain) virtuel est grandissant. La thèse de Perret (2006), intitulée *Modélisation d'environnements urbains virtuels* témoigne des avancées majeures dans ce pan de la recherche. Même si les progrès portent essentiellement sur des environnements virtuels, ces recherches permettent d'envisager de modéliser plus fidèlement des environnements réels. L'intérêt de ces environnements urbains numériques* est qu'ils fournissent une description très détaillée du milieu urbain. Mais ce n'est qu'une description. Il

Terme moins ambigu que virtuel

incombe donc aux sciences humaines de fournir l'analyse et la modélisation des phénomènes urbains.

La modélisation d'un environnement virtuel couplé à de l'intelligence artificielle (SMA – modèle basé agent) s'approche peu à peu de la construction d'une réalité virtuelle. En outre, des travaux (projet Bunraku, IRISA Rennes, Virtuel London) visent des simulations portant sur les mouvements de piétons et de véhicules, les mouvements de foules, le comportement des individus dans la ville.

L'un des intérêts de la visualisation en 3D concerne l'amélioration de la qualité de la communication. Par définition, la communication est la transmission d'éléments à quelqu'un (Larousse, 2010). Par extension c'est aussi informer, promouvoir et entretenir une image valorisante. Offrir une représentation fidèle des objets permet aux « spectateurs » d'être intégrés dans la scène, de se mettre en situation. Ce dernier point est majeur dans la mesure où la représentation tridimensionnelle de scènes (paysagères) offre une certaine interactivité (déplacement, zoom). D'une certaine manière, la visualisation 3D permet d'évaluer qualitativement l'impact visuel de l'insertion d'un objet dans une scène. La modélisation tridimensionnelle et la réalité virtuelle permettent ainsi d'avoir un langage commun entre professionnel et non expert (Joliveau, 2003). Selon J-C. Loubier (2003), le message spatial doit être de deux ordres : il se voit dans le réel et se conçoit dans l'esprit.

3.3. *L'apport de la troisième dimension dans l'explication*

Dans les paragraphes précédents, la dimension a été définie comme étant une caractéristique mesurable d'un objet relevant de la géométrie et/ou d'une composante attributaire. Autrement dit, le terme renvoie au nombre de variables attribuées à l'espace (ex : la densité de population, le nombre de logements *etc.*).

L'espace est façonné par le milieu physique (relief, climat *etc.*) et par l'homme (les villes, les réseaux de transport *etc.*). En effet, les forces (processus socio-économiques) qui s'exercent sur l'espace (densités de population, pressions foncières *etc.*) se concrétisent par des formes spatiales (régulières ou non, en 2D ou en 3D). La troisième dimension (la hauteur d'un objet) est une des dimensions de l'espace géographique.

En effet, certains phénomènes ne sont pas quantifiables ou appréciables sans l'**utilisation** de la **troisième dimension**. Par exemple, le choix des modes de transport est influencé par le relief (Saint-Amand, 2010). Dans le cadre de l'analyse des mobilités, la connaissance du dénivelé d'une route est un paramètre important. En effet, si celui-ci est trop fort, la route ne peut être utilisée par les poids lourds ou des cars pour cause de risques ou même par les cyclistes (amateurs) qui se laisseraient décourager par une pente trop forte*. Ainsi, la connaissance de cette information permet d'une part d'affiner l'analyse des réseaux (l'accessibilité, la

D'après l'étude réalisée par la CASA (2007) dans le cadre de son Schéma de COhérence Territoriale, une pente ne doit pas excéder 7% de dénivelé pour être empruntée par des cyclistes.

connexité, la connectivité *etc.*) et d'autre part de fournir une nouvelle donnée sur les cartes routières.

De plus, « la connaissance fine de la topographie peut être déterminante dans l'aménagement du territoire » (Bavoux, 1998, p44). Dans les pratiques d'aménagement et de génie civil, la verticalité, au sens de distance « verticale », a une importance majeure. Par exemple, un pont passant au-dessus d'un cours d'eau ou d'une route doit être calibré en fonction des crues potentielles dans le premier cas ou des engins le traversant dans le second cas. Il est nécessaire, pour évaluer les risques, de connaître la topographie du terrain et la densité de la population vulnérable. Ainsi, dans les relations de proximité, la mesure des espacements verticaux et horizontaux est essentielle pour connaître avec précision l'aléa et la vulnérabilité de certains risques naturels (inondation, avalanche, mouvement de terrain *etc.*) et les risques anthropiques (risque industriels, rupture de barrage, transport de marchandises dangereuses). En outre, dans un objectif de planification urbaine, la connaissance précise des volumes permet d'une part d'estimer les besoins en termes de logements, de lieux de production ou de commerces.

Pour résumer, l'espace des cartes a deux dimensions, tandis que l'espace sensible a trois dimensions qui forment le volume. Toutefois la géographie et d'autres sciences sociales ou naturelles emploient des espaces à n dimensions, ou hyperespaces, qui ne peuvent pas se voir, et se conçoivent mal, mais dont l'utilité est grande dans l'explication des espaces géographiques et des systèmes spatiaux.

4. L'analyse spatiale et sa relation à la forme tridimensionnelle

L'analyse spatiale, issue, dans les années 1950-60, de la *New Geography*, cherche à expliquer ce qui se passe en un lieu en fonction de ce qui existe en un autre lieu. Elle substitue l'étude des relations horizontales entre des lieux inscrits dans des structures spatiales à celles verticales, qui unissent un lieu à son milieu. (Pumain, 1998a).

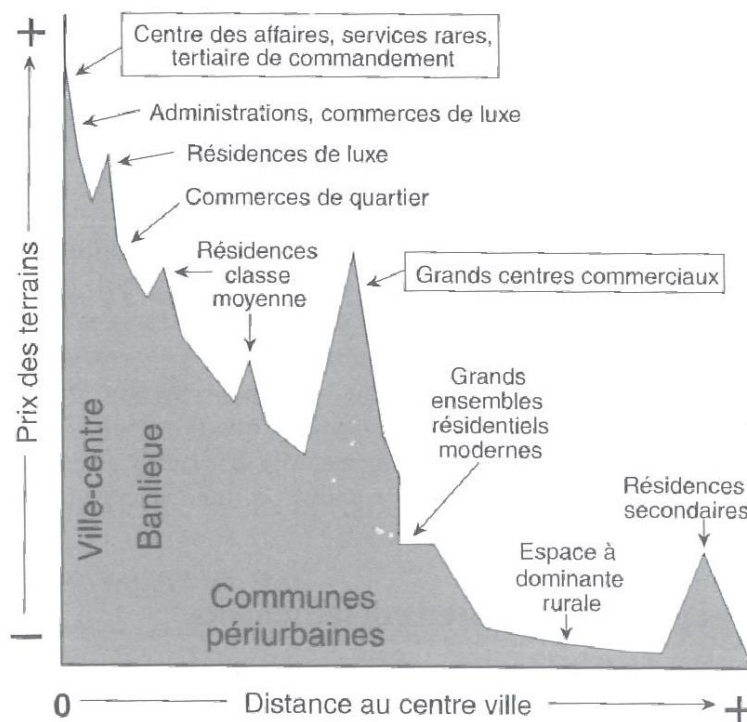
4.1. *Distance et interaction spatiale*

Les notions de **distance** et de **dépendance spatiale** sont au cœur de l'analyse géographique en général, et de l'analyse spatiale en particulier*. La distance est omniprésente dans les travaux précurseurs de von Thünen (1826) et de Weber (1909), au travers de l'**accessibilité**, des coûts qu'elle induit et qui déterminent la valeur des biens comme des lieux, de la **rente foncière** et de la recherche de la **localisation optimale**.

Von Thünen est le premier à s'être appuyé sur l'accessibilité au marché (agricole) matérialisé par les coûts de transport et à avoir proposé un modèle de cultures s'organisant en anneaux concentriques ceinturant la ville. Ce modèle repris par Weber pour expliquer la localisation des activités industrielles, montre que les entreprises cherchent à tirer le meilleur parti entre lieux de productions et offres au regard des critères de coûts de transports, accessibilité à l'emploi et économie d'agglomération. Cette théorie s'appuie sur trois types distances pour minimiser les coûts.

La représentation de **ces modèles** est toujours en **deux dimensions**. Néanmoins, la théorie de la **rente foncière** fournit une **représentation tridimensionnelle** de l'organisation spatiale. En effet, les prix du foncier déterminent la sélection de l'habitat, des fonctions et les paysages. La figure 13 illustre ce propos : le quartier des affaires (zone de bureaux tertiaires, sièges sociaux etc.) se localise dans des zones où le prix du foncier est le plus élevé. Afin de maximiser et de rentabiliser l'espace, la forme urbaine résultante est caractérisée par une hauteur et un volume important. De même les habitants des résidences « de luxe » souhaitent bénéficier des avantages de l'accessibilité et de la proximité des commerces et disposent de hauts revenus, ils peuvent ainsi, se localiser à proximité des centres et leur habitat se caractérise par des volumes plus petits. A l'inverse, les bailleurs sociaux ne disposent pas de moyens financiers importants et se doivent de loger un grand nombre de familles. Par conséquent, les grands ensembles se localisent en périphérie des centres-villes et sont caractérisés par des volumes importants.

The first Law of Geography:
"Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things"
(Tobler, 1970)



Zones issues du prix du foncier



Modèle de la ville européenne

Figure 12 : Lien entre prix du foncier, organisation spatiale et formes urbaines (D'après Paulet, 2000).

A l'échelle macro, la théorie de répartition et de hiérarchisation des villes selon leur niveau de centralité proposée par Christaller a pour objectif de trouver la localisation optimale d'une entité économique ou géographique dans un environnement donné. Il définit ainsi cinq niveaux hiérarchiques de centres dont l'importance dépend de celle des biens et des services dépendant eux-mêmes de leurs coûts de production et de la portée de leur transport et démontre que plus un bien est rare, plus il aurait tendance à se regrouper avec des biens de même niveau.

Ces différents travaux soulignent la place accordée à la distance dans la compréhension des phénomènes qui se déploient à travers l'espace. En outre, L'**espace** analysé dans une optique **fonctionnelle et économique** est l'arène de rapports de forces qui régissent les modalités des échanges. L'**espacement** et la distance permettent de définir le degré d'**interaction spatiale** entre des lieux (des objets) dont la position est relative entre eux : l'influence d'un lieu sur un autre est inversement proportionnelle à la distance. La contiguïté ou la proximité (accessibilité, opportunité de relation), l'espacement (décroissance des relations avec la distance) ou plus

généralement, l'interaction spatiale se définissent comme « l'existence de relations causales dans l'espace (ce qui se passe en un lieu exerce une influence sur ce qui passe dans les autres lieux et qui varie en fonction de leur proximité) » (Hypergéô, 2010). L'espace géographique, dans lequel ces processus ont cours, possède au moins trois dimensions ; les formes résultantes peuvent donc être en trois dimensions (figure 6).

L'interaction, qui répond à un besoin et qui est entravée par la distance, est une notion ancienne, sur laquelle se sont fondés les modèles gravitaires. La répartition des interactions dans un ensemble de lieux est considérée comme dépendante de la force d'attraction de chacun et du niveau de difficulté des communications entre eux. Les modèles gravitaires sont largement utilisés pour comprendre et prévoir les échanges, qu'il s'agisse de modèles de potentiel se fondant sur une mesure d'accessibilité des lieux et évaluant la quantité d'opportunités de relation, ou de modèles de position, déterminant les aires de marché théoriques d'un ensemble de lieux (modèles de Reilly et de Huff, par exemple).

4.2. Le point de vue spatial

La prise en compte explicite de l'espace est le point de vue de l'analyse spatiale dont le projet est de chercher en quoi les caractères de l'espace participent à l'organisation des territoires, et de déterminer le rôle de la composante spatiale dans l'évolution des phénomènes géographiques, c'est-à-dire d'examiner la manière dont certains mécanismes sont freinés, accélérés ou infléchis par des situations spatio-temporelles particulières (Voiron, 2006a).

Comme cela a été développé dans les paragraphes précédents, l'espace se définit soit en tant qu'objet matériel – une portion de l'étendue, soit en tant qu'objet immatériel – un ensemble de relations.

Cette définition correspond en tout point au postulat de l'analyse spatiale qui le considère comme un tout formé à la fois :

- **d'éléments visibles** tels que les lieux, les infrastructures et
- **d'éléments invisibles** c'est-à-dire les interrelations entre les lieux qui constituent sa structure et sa dynamique.

En ce sens, et du point de vue de l'analyse spatiale, l'espace est considéré comme un ensemble de lieux ou d'unités spatiales localisées, dans lesquels sont recherchées les relations entre la position spatiale de cet ensemble et les propriétés locales. L'analyse spatiale vise à établir des règles d'organisation et d'évolution fondées sur l'interaction spatiale. Elle considère les caractéristiques liées à la distance ou au voisinage, tant d'un point de vue structurel que fonctionnel.

Elle s'intéresse à la position des lieux, élément majeur de la structuration des relations, en privilégiant l'analyse des distances relatives - distance-coût, distance-temps – qui engendrent les processus d'interactions spatiales comme les processus d'attractivité et de répulsivité, de différenciation spatiale et de transformation territoriale.

Même si l'objet de l'analyse spatiale est de mettre en exergue le rôle de la spatialité dans les processus, il consiste à analyser la distance et les jeux d'opérateurs : « l'ensemble des relations

spatiales, sous leurs formes matérielles, immatérielles et idéelles, établies par une société » (Lévy et Lussault, 2003, p.330).

L'analyse spatiale consiste donc à étudier de quelle manière les sociétés produisent leur espace en fonction de leurs organisations et des contraintes spatiales, qu'elles soient globales et locales, et inversement comment l'espace conditionne les différents flux (économiques, sociaux et culturels) et une partie de l'action de l'homme. L'espace est façonné par le milieu physique (relief, climat...) et par l'homme (les villes et les réseaux de transport...). De ce fait, les forces qui s'exercent sur l'espace (densités de population, pressions foncières...) se concrétisent par des formes spatiales (régulières ou non).

Aujourd'hui, deux courants prédominent en analyse spatiale. Ils correspondent à deux manières d'appréhender l'espace, d'un côté l'**espace** est perçu **comme un champ de forces**. De l'autre, l'espace est perçu **comme un champ de formes**.

La première optique est celle qui est la plus ancienne et sur laquelle se fondent le plus grand nombre de travaux en analyse spatiale. Plus récemment, les géographes quantitativistes se sont intéressés aux théories morphologiques – Théorie des Catastrophes de R. Thom, Théorie des fractales de B. Mandelbrot, Théorie des Structures Dissipatives d'I. Prigogine, Théorie de la Morphologie Mathématique. Ce dernier ensemble de théories a fait évoluer l'analyse spatiale qui les intègre désormais, tant au niveau des concepts que des outils. Mais quelle place est accordée à l'analyse des formes tridimensionnelles ?

4.3. La troisième dimension a-t-elle sa place ?

Intégrer la 3D dans les méthodes d'analyse spatiale offre de nouvelles opportunités de recherche dans la mesure où l'espace géographique est tridimensionnel même si jusqu'à présent, l'organisation spatiale n'était appréhendée qu'en deux dimensions. De nombreux concepts d'analyse spatiale n'ont pour l'instant été que peu appliqués en 3D : le positionnement des lieux et la localisation, la répartition et la distribution ou encore l'espacement. Il convient donc de s'interroger sur son utilité dans la modélisation et l'explication des phénomènes en géographie et en analyse spatiale.

Le **positionnement des lieux** est un des concepts majeurs de l'analyse spatiale. La position est calculée traditionnellement en géographie par le point à l'intersection de deux lignes droites, soit les coordonnées en latitude et en longitude. Pourtant, la position d'un lieu n'implique pas nécessairement les mêmes phénomènes du fait des différences d'altitude pouvant exister. Plus précisément, une route est assimilée à un ou plusieurs segments de droite (1D voir 2D au sens de la géomatique) pourtant, elle peut être sinueuse et/ou changer d'altitude (3D).

En outre, le **regroupement** ou la **concentration** des hommes sur un espace circonscrit, comme celui d'une ville, les a conduits à se « **superposer** », ce qui a donné naissance à certains processus, directement issus de cette « **stratification** » (Roncayolo, 1990).

Jusqu'au XIX^{ème} siècle, l'organisation et la différenciation sociale s'inscrivaient verticalement.

Les populations les plus aisées occupaient les premiers étages des habitations tandis que les populations les plus défavorisées vivaient sous les toits (Béaur, 1999). Aujourd'hui, cette différenciation verticale est moins marquée mais existe toujours. Cependant, les changements culturels de la société ont inversé l'organisation spatiale : les appartements situés au rez-de-chaussée sont moins recherchés que ceux du dernier étage (Sintés, 2002, Maloutas, 2006). Par exemple, F. Olivier (2002) et S. Robert (2009) ont montré que la sélection du logement dépend de certaines variables telles que la vue ou l'ensoleillement. Ainsi le choix résidentiel résulte de caractéristiques reflétant les besoins actuels (qualité de vie, vue, éloignement par rapport à la pollution de la rue *etc.*).

Par conséquent, dans les zones d'habitats collectifs, certains logements bénéficiant d'une vue intéressante, éloignés de la voirie et de ses pollutions, ont des prix élevés (et sont donc destinés à certaines classes sociales). La formation des prix du foncier ou de l'immobilier se matérialise spatialement par une dynamique verticale. Ainsi, plus le prix du sol est élevé, plus il faut rentabiliser son coût, plus les propriétaires ont tendance à construire en hauteur. Ce processus se reproduit par contiguïté au cours de la croissance urbaine et les parcelles vont se densifier au fur et à mesure du temps.

Parallèlement, il existe également une influence de la verticalité sur le volume de « vide » (en d'autres termes la porosité ou la rugosité). En effet, l'hétérogénéité des hauteurs des objets, donc du volume de l'espace (par exemple la ville), produit une irrégularité de la forme des objets et génère donc une certaine rugosité de l'espace. Celle-ci intervient dans de nombreux phénomènes, notamment climatiques : la perturbation des champs de vent et plus généralement de l'écoulement des fluides (Péneau, 1995, Maignant, 2002). La figure 13 illustre ce dernier propos : les différentes formes urbaines représentées possèdent la même densité bien que leur configuration soit extrêmement différente et produise des effets de concentration et d'aération très variables.

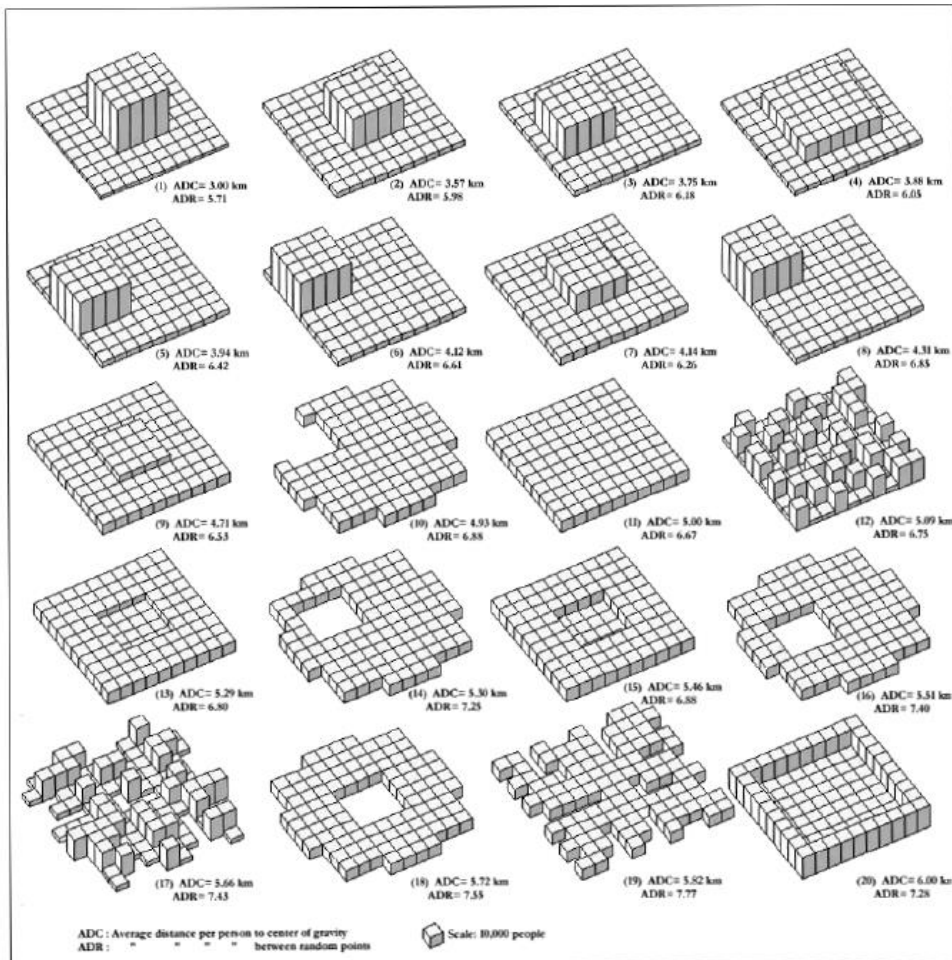


Figure 13 : Représentation schématique de différentes distributions de densité urbaine avec une densité et une superficie bâtie constante (Bertaud, 2004).

L'apport de la 3D s'est principalement manifesté dans l'analyse spatiale portant **sur des problématiques d'aménagement et d'urbanisme** (figure 14). La concentration des hommes et la constitution des espaces urbains ont souvent été analysées en géographie seulement à partir de la tâche urbaine (2D). Pourtant, le volume urbain (3D), de la même manière, n'a cessé d'augmenter et n'a pas fait l'objet de la même attention. « Deux dimensions ne suffisent plus à expliquer le territoire » (Niggeler, 2008). Pour lui, la représentation de la 3^{ème} dimension dont découlent de nouvelles informations (volumes réels, hauteur, surfaces verticales des objets) permet d'abord une meilleure intelligibilité et une représentation plus explicite, complète et transparente des informations disponibles (figure 14). Le changement d'échelle et d'unité spatiale que ce type d'analyse nécessite était, jusqu'à récemment, difficile à réaliser. Les données relatives à la hauteur des éléments sont produites depuis moins d'une dizaine d'années. La notion d'échelle et de changement d'échelle, propre à l'analyse géographique, nécessitent, l'implication de la 3D puisque, dans sa première acception, le changement d'échelle est un changement de point de vue vertical (on s'éloigne ou on se rapproche de la terre).

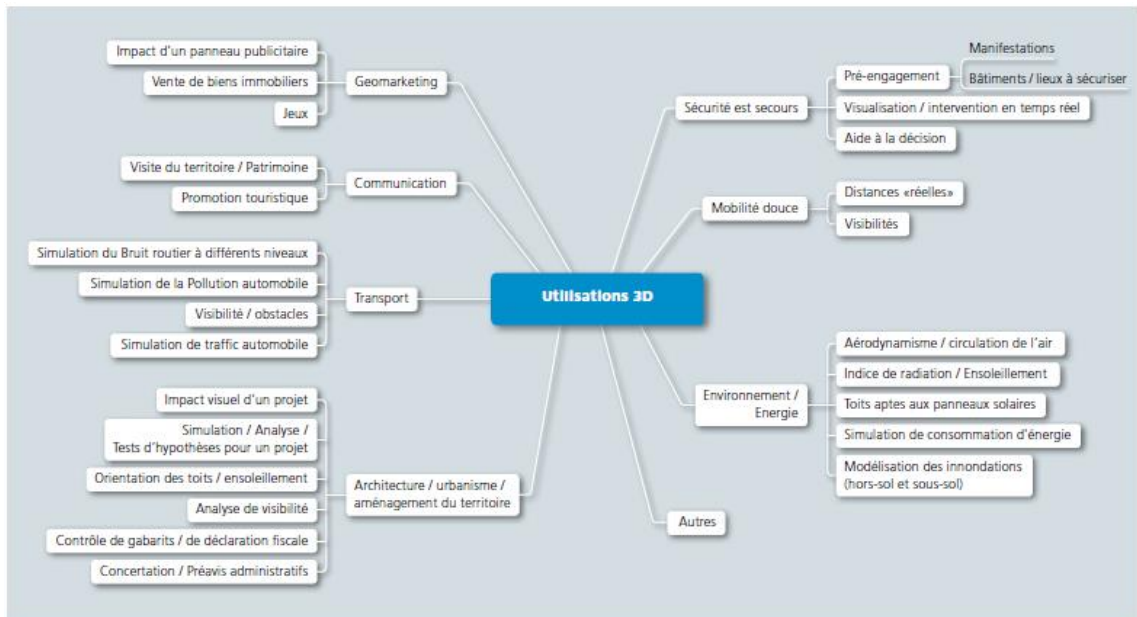


Figure 14 : Les principales utilisations de la 3D (Niggeler, 2008).

Les formes 3D traitées par l'analyse spatiale ne sont pas uniquement des formes visibles, naturelles ou anthropiques. Des développements nouveaux, croisant analyse spatiale et forme tridimensionnelle ont été réalisés depuis moins d'une vingtaine d'années. Ils portent essentiellement sur la création de **pseudo-reliefs relatifs** à des variables de population et utilisés à différents stades de l'analyse spatiale.

Tout phénomène qui s'inscrit dans l'espace par ses coordonnées x et y, et qui possède une valeur le caractérisant à un instant t, peut être appréhendé sous la forme d'un pseudo relief en trois dimensions auquel peut s'ajouter une quatrième dimension : le temps. Par exemple, la résultante des mouvements de population à travers un champ de déplacement, qu'il s'agisse de déplacements observés émanant d'enquête ou de déplacements estimés par un modèle, peut être appréciée selon une granularité temporelle et spatiale données. Chaque lieu de l'espace est alors un « réservoir » qui se vide ou se remplit au cours du temps. La représentation 3D des valeurs de chaque réservoir à un instant t permet d'appréhender les variations de la masse de population en chacun des lieux. Par exemple, la figure 15 représente le nombre de personnes présentes en un point de l'espace à 8H45 et à 11H.

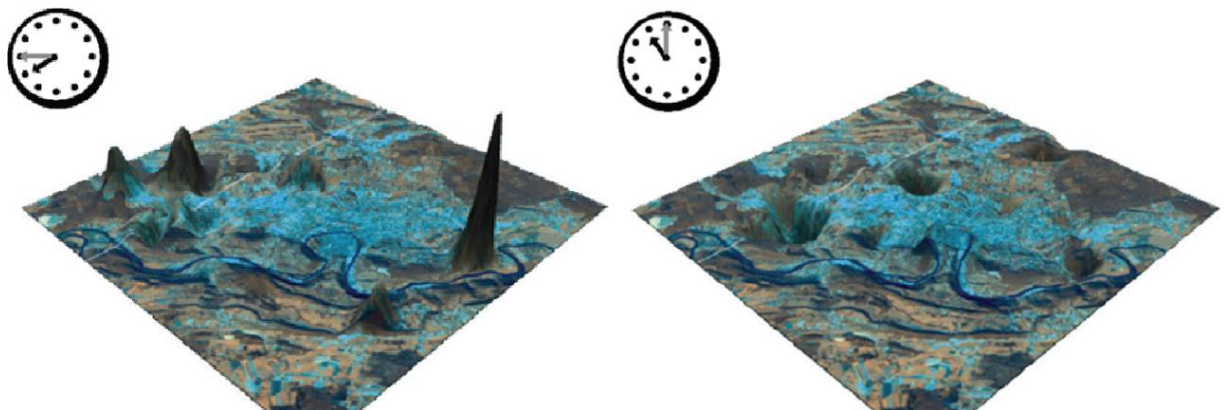


Figure 15 : Les pulsations en 3D de la ville de Besançon au cours d'une journée type (Thévenin, 2002).

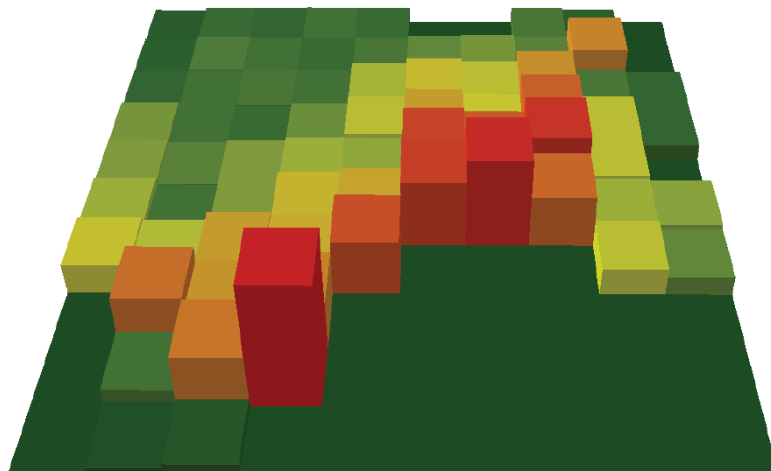
Un autre type de pseudo-relief concerne des densités de populations issues de données agrégées à un niveau administratif (la commune par exemple). Un tableau de données spatialisées est alors réalisé à partir du quadrillage du champ d'étude, avec des colonnes et des lignes correspondant aux coordonnées x et y du champ et une information sur la portion d'espace ainsi délimitée, la densité de population contenue dans chaque maille. Un exemple est expliqué par C. Voiron (1995 p.19). Les valeurs sont transformées en niveaux de gris, selon différentes méthodes possibles. La figure 16 illustre la conversion et la représentation des valeurs de gris de chaque pixel en couleur et en 3D.

A la différence du pseudo-relief précédent, les images en niveau de gris constituent le point de départ des analyses spatiales par analyse d'image. L'image des densités est définie par une fonction $f(x)$ qui représente l'amplitude du signal au point x . Elle peut être comparée à une surface topographique où les sommets correspondent aux zones de niveaux de gris élevés (figure 16C). Quand les images portent sur des densités de population, elles sont le plus souvent inversées afin que les crêtes correspondent aux faibles densités et les fonds de vallée, aux zones peuplées. Ce pseudo-relief est donc modelé par le poids de la variable densité de population en chaque point. Les zones en creux sont d'autant plus profondes que le poids des densités est grand. Les fonds de vallée sont des minima régionaux et à chacun d'eux est associé un bassin-versant. Un algorithme de traitement d'image donne la limite de chacun d'eux, la ligne de partage des eaux. Un exemple de traitement est expliqué dans le paragraphe 4 de ce chapitre.

768	1187	1105	1255	1183	0	0	1273	1053	0
1027	1390	1242	1150	1312	1645	1763	1471	7433	0
1067	1240	1307	1255	2835	4201	3376	6974	1316	1082
1779	1242	1196	1671	3344	5771	3971	12266	3351	1082
1847	1437	1898	2627	2473	14212	12361	20647	3368	0
2589	1268	1836	4521	5663	20032	35065	11774	2660	2434
4153	3324	5875	5124	13266	0	0	0	3357	1576
0	11334	6005	9209	0	0	0	0	0	0
0	1251	11152	65859	0	0	0	0	0	0
0	63	246	0	0	0	0	0	0	0

A: Tableau de valeurs

28	34	33	35	34	0	0	36	32	0
32	37	35	34	36	40	42	38	86	0
33	35	36	35	53	65	58	83	36	33
42	35	34	41	58	76	63	110	58	33
43	38	43	51	50	119	111	143	58	0
51	35	43	67	75	141	186	108	51	49
64	57	76	71	115	0	0	0	58	40
0	106	77	95	0	0	0	0	0	0
0	35	105	255	0	0	0	0	0	0
0	8	16	0	0	0	0	0	0	0

B: Valeurs converties
en niveaux de grisC: Tableau B converti en image
(représentation tridimensionnelle)**Figure 16 : Construction d'un tableau de données spatialisées (d'après Voiron, 1995).**

Lorsque l'on dispose d'une série d'images correspondant à des recensements de population à différents pas de temps, il est alors possible d'observer comment les variations de population modifient les niveaux de gris, et à travers eux, le pseudo-relief (Voiron, 1997). Ainsi, une commune qui se dépeuple voit son relief augmenter alors qu'une commune qui croît en population, pèse plus lourdement et son relief se creuse. Ces variations interreliées les unes aux autres se traduisent par des modifications du nombre et de la localisation des minimas ainsi que sur la forme du bassin-versant associé à chacun d'eux. Il peut se produire alors une

capture d'un bassin par un bassin voisin. C'est ce qui se produit quand un minimum perd de son importance relative, soit par son propre affaiblissement, soit en raison de la croissance des zones voisines (figure 17 A). Inversement, il peut se produire une croissance d'une zone, amenant la création d'un nouveau minimum et d'un bassin-versant associé (figure 17 B).

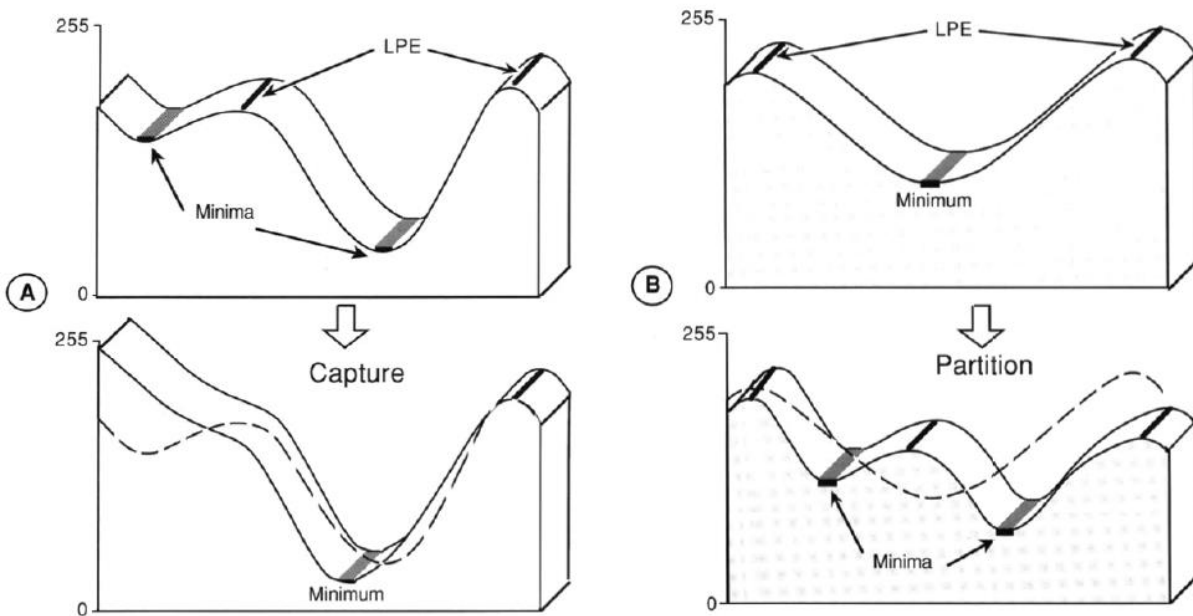


Figure 17 : Exemple de capture et de partition d'un bassin versant (Voiron, 1997)

L'analyse morphologique des bassins-versants au cours du temps renseigne sur la dynamique de population sous-jacente, des jeux de forces d'attraction et de répulsion qui s'exercent. Ces traitements sont notamment réalisés par l'analyse d'images par la morphologie mathématique dont nous allons exposer l'intérêt dans les lignes qui suivent.

4.4. L'analyse d'image par la morphologie mathématique

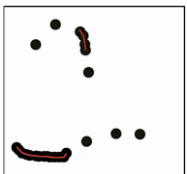
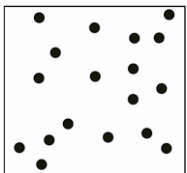
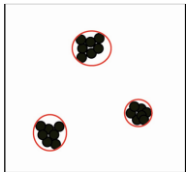
La morphologie mathématique est une théorie utilisée en particulier en analyse d'images, dont le but est l'étude des objets en fonction de leur forme, de leur taille, des relations avec leur voisinage (en particulier topologique), de leur texture et de leurs niveaux de gris ou de leur couleur. Cette théorie, créée dans le milieu des années 1960 en France, à l'École des Mines de Fontainebleau par G. Matheron et J. Serra, et les techniques qui lui sont associées, sont un domaine actif de recherche. Les champs d'applications de cette méthode sont très divers mais « ont tous en commun de présenter des éléments déployés à travers l'espace et caractérisés par une certaine variation spatiale. Cette variation est liée à des propriétés des corps que l'on désire connaître » (Voiron, 1995, p26).

Par les transformations qu'elle propose, la Morphologie Mathématique se situe à différents niveaux du traitement d'images et fournit des outils pour la reconnaissance des formes et des structures spatiales.

Thom (1999, p.6) rappelle que « l'intérêt de la recherche réside dans sa capacité à révéler une structure sous-jacente qui rende les phénomènes intelligibles ». Rendre un phénomène ou un objet intelligible, c'est l'« isoler [...] dans la morphologie donnée dans l'espace substrat, des éléments identifiables, reconnaissables, stables » (Thom, 1999, p.90). Par ailleurs, un des axes majeurs de l'analyse spatiale est de « déceler des structures invisibles et de rattacher ces formes aux processus qui leur ont donné naissance » (Voiron, 1995, p.13). Ce travail de recherche poursuit le même objectif. Au-delà de la forme visible, il s'agit de mettre en évidence la structure de l'espace, qui n'est pas intelligible immédiatement, de faire apparaître à partir d'éléments visibles, les relations invisibles tissées autour d'eux, de leur donner forme et de s'interroger sur ce que cette information apporte à la compréhension de l'objet d'étude. *De facto*, la méthode et les outils associés à la Morphologie Mathématique s'inscrivent totalement dans le principe de la recherche édicté par R. Thom et dans celui de l'analyse spatiale qui est de simplifier pour révéler ce qui est fondamental et significatif (Voiron, 1995).

4.4.1. Principes généraux

La finalité de la méthode de la Morphologie Mathématique est donc de déceler des structures spatiales et d'en interpréter les formes. Elle permet de détecter et d'organiser l'information contenue dans une image grâce à un ensemble de méthodes destinées à les caractériser, quantitativement. Concrètement, elle permet d'organiser l'information contenue dans chaque pixel, de déterminer sa composition et fournir des descriptions à la fois quantitatives et qualitatives des structures géométriques des objets étudiés. Elle prend appui sur des acquis issus de la géométrie, de la topologie, de la théorie des probabilités et de la théorie des graphes, mais surtout de la théorie des ensembles.



Reconnaissance visuelle de forme

L'analyse d'images par morphologie mathématique est une analyse morphologique équivalente à celle que fait l'œil lorsqu'une image lui apparaît (mécanisme de reconnaissance visuelle). En observant les images ci-contre*, nous distinguons instinctivement des formes particulières qui se dessinent ou pas : courbes, points, amas de points formant presque des cercles. Le traitement d'images vise à déceler les relations entre les pixels à partir d'éléments structurants (cercle, hexagone ou vecteur), sortes de sondes projetées sur l'image. Le choix d'un élément structurant dépend de l'information structurale que l'on veut extraire : taille des objets, espacement, allongement *etc.* Les traitements d'images sont donc des transformations qui épurent l'image initiale pour mettre en évidence des informations chargées de signification. Les structures obtenues à l'issue des transformations d'images sont matérialisées par des lignes, des points, des aires partitionnant l'espace en sous-régions, qui donnent forme aux structures décelées.

4.4.2. Exemples de transformations morphologiques appliquées à l'espace urbain

Les transformations morphologiques dépendent de la finalité donnée au traitement d'images. Parmi celles qui recèlent le plus de potentialités pour l'analyse spatiale des territoires urbanisés figurent deux grandes familles d'analyses, celle des distributions de tailles ou des espacements et celle des découpages spatiaux et hiérarchisés.

4.4.2.1. Analyse des distributions de taille et des espacements

Les informations structurales obtenues dépendent des caractéristiques géométriques des éléments structurants, de leur taille et de l'ordre dans lequel les transformations d'images sont réalisées.

Ainsi, les deux transformations morphologiques de base que sont l'érosion et la dilatation (Glossaire) peuvent être combinées de manière différente. Une ouverture de taille n correspond à une érosion de cette taille, suivie d'une dilatation de taille équivalente. Une ouverture réalisée à partir d'un cercle ou d'un hexagone supprime les petites composantes de l'image, comme l'illustre la figure 18

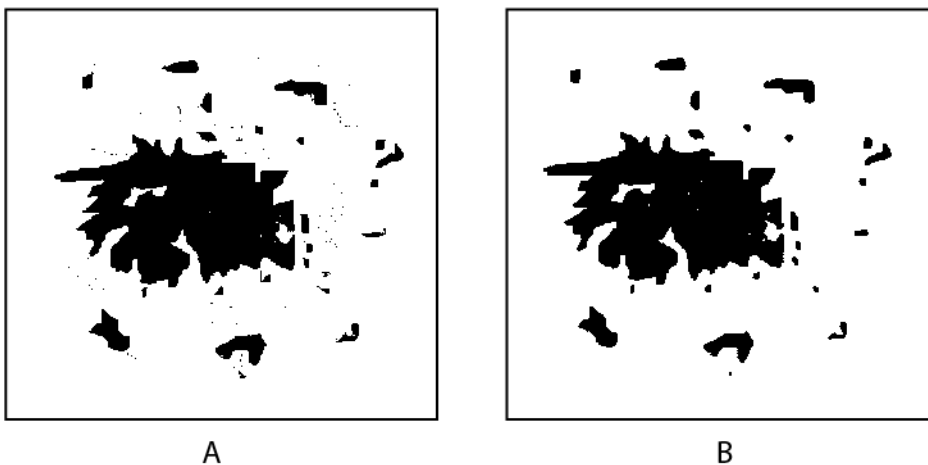


Figure 18 : Résultat d'une ouverture hexagonale de taille 1 (image B) de l'image initiale A (Voiron, 1995).

Une fermeture correspond à la séquence inverse : une dilatation suivie d'une érosion. Cette séquence permet, entre autres, de réunir les composantes proches.

Si l'on réitère la séquence de transformations choisie, avec un élément structurant de taille croissante, on obtient un tamisage des composantes. Des mesures sont généralement effectuées après chaque transformation, d'où le terme de granulométrie employé pour qualifier ce type de traitement. Une granulométrie par ouverture donne la distribution de taille des objets de l'image. Plus la taille de l'ouverture croît, plus les composantes sont éliminées jusqu'à parvenir à l'ensemble vide.

La mesure d'une distribution peut également être réalisée par le calcul du nombre de connexité. Le traitement repose sur une suite de dilatations de taille croissante. Les objets les plus proches se rejoignent tout d'abord, puis, au fur et à mesure que la taille des dilatations croît, ce sont les groupes d'objets, puis les ensembles qui se connectent, jusqu'à ce qu'il ne

reste plus qu'une seule composante. Après chaque dilatation le nombre de connexité est calculé et reporté sur une courbe. Son profil renseigne alors sur l'espacement moyen des objets.

4.4.2.2. Squelettisation et segmentation

Afin de mettre en évidence la structure interne d'un objet, il existe un opérateur morphologique nommé le squelette. Il procède par amincissement de l'objet d'étude en fonction d'un élément structurant binaire (pixel codé en 0 ou 1).

La transformation morphologique du squelette est utilisée pour la détection des lignes directrices de l'urbanisation (Voiron, 2006b). Un exemple d'application de ce traitement est par exemple la vérification d'un modèle de croissance urbaine des collines niçoises (Sevenet, 2006). Pour vérifier la validité d'un modèle de croissance du bâti collinaire fondé sur une règle de diffusion par contiguïté, le squelette du bâti simulé est comparé au squelette du bâti observé en 2005. Les deux squelettes sont cartographiés sur la figure 19.

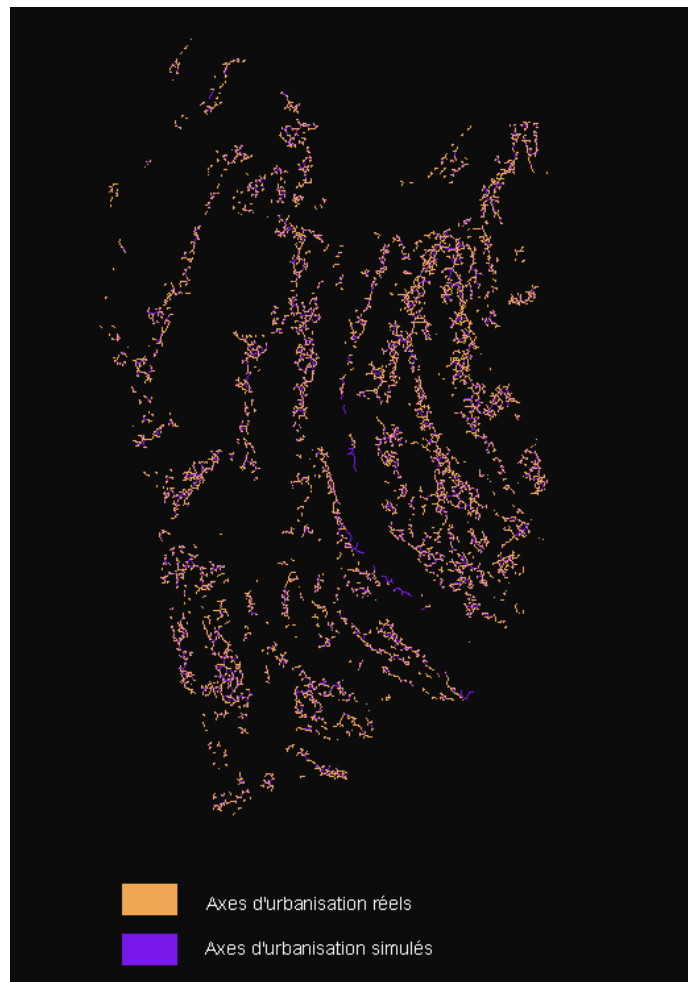


Figure 19 : Comparaison entre les squelettes simulé et réel, Cas d'application sur les collines niçoises (Sevenet, 2006).

Le squelette par zones d'influences est une variante de cette transformation, qui permet de tracer les lignes d'équidistance entre les objets de l'image. Cette squelettisation correspond au squelette du complémentaire de l'image. Le résultat obtenu est similaire à la partition de Voronoï ou à la méthode des polygones de Thiessen (Voiron, 1995). Un exemple de squelette par zones d'influences est présenté sur la figure 20. Les lignes en rouge délimitent la zone d'équidistance entre les bâtiments.

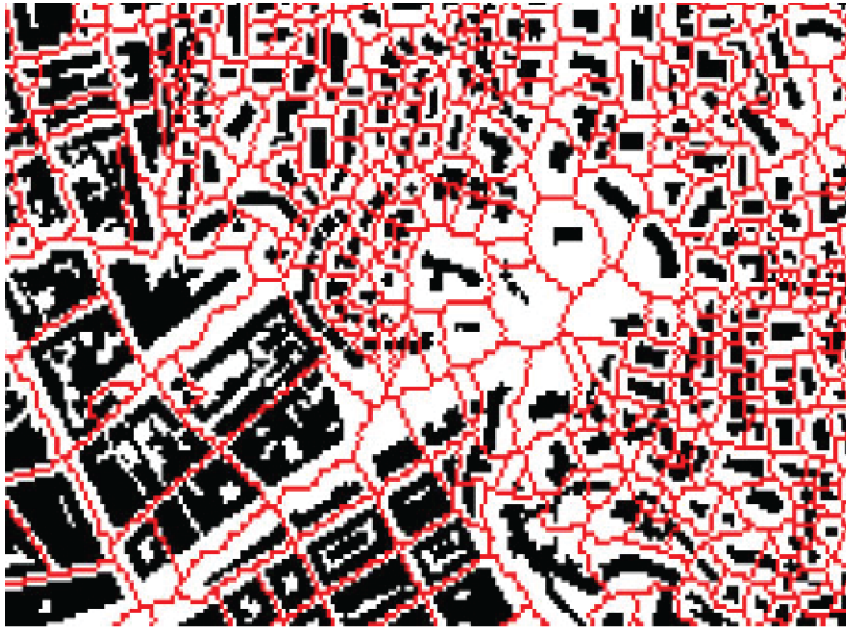


Figure 20 : Squelette par zone d'influence réalisé autour de bâtiments (Sevenet, 2013).

4.4.2.3. Régionalisation : la « ligne de partage des eaux »

Alors que les squelettes précédents étaient réalisés sur des images binaires, la « ligne de partage des eaux » (LPE) est en quelque sorte un squelette par zone d'influence appliqué aux fonctions numériques. De façon imagée, la ligne de partage des eaux correspond aux lignes de crête qui s'obtiennent lorsque l'on inonde un relief et que deux vallées se rejoignent. Cette transformation élaborée permet de délimiter les régions associées aux minimas locaux situés en fonds de vallée.

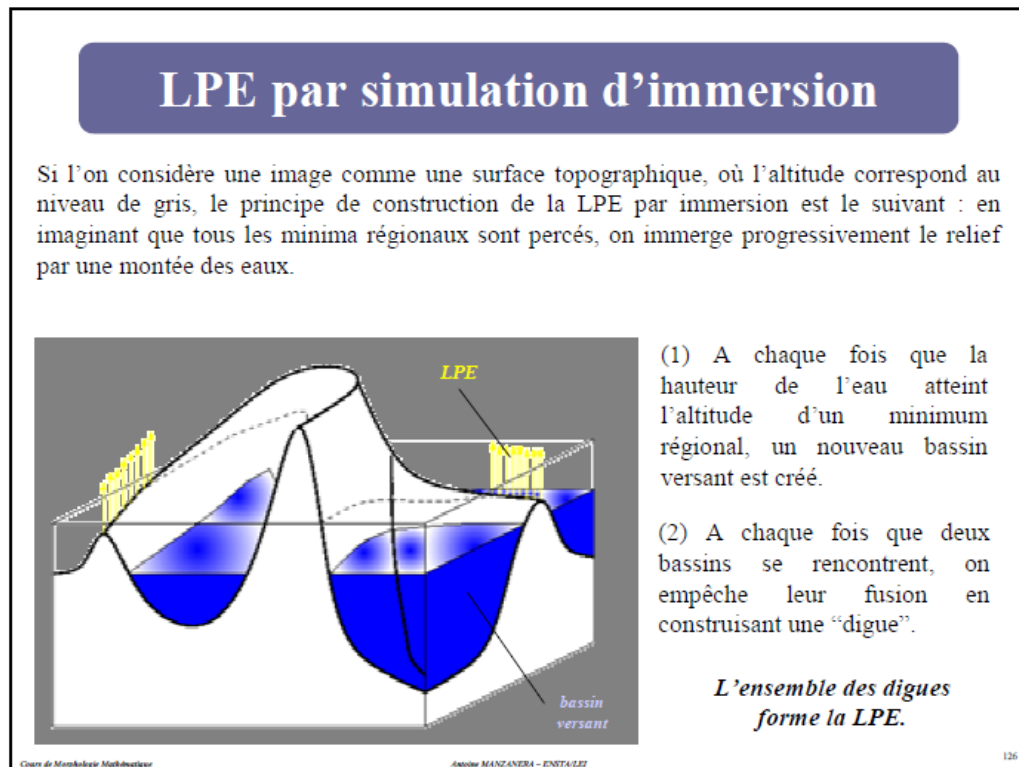


Figure 21 : Exemple de construction d'une LPE par simulation d'immersion (Manzanera, 2005).

Une image en teintes de gris inversées représentant les densités de population représente un pseudo-relief où les sommets correspondent aux zones faiblement peuplées (lignes de la figure 22) et les vallées aux zones de valeurs élevées, et dont les pentes sont d'autant plus raides que les contrastes entre les niveaux de gris sont plus marqués (Voiron, 1997).

L'intérêt de ce traitement est qu'il ne tient pas seulement compte de la valeur du pixel en tant que telle, mais également de la relation qu'entretient ce pixel avec les pixels voisins.

Le résultat est l'obtention d'un découpage de l'espace en autant de bassins-versants ou régions qu'il y a de minima locaux. Si la LPE est réalisée sur des images de densités de population à des dates différentes, la comparaison des découpages régionaux (plus précisément, les variations de taille, de forme, la disparition ou au contraire l'émergence de bassins-versants), permet de mettre en évidence les dynamiques de population internes au champ d'étude (figure 22).

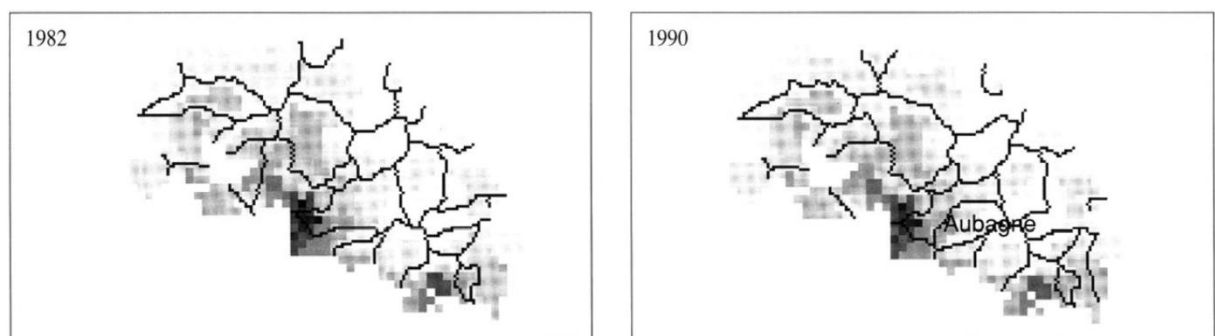


Figure 22 : Exemple d'un résultat de traitement de ligne de partage des eaux (Voiron, 1997).

4.4.2.4. LPE de l'image gradient et hiérarchisation des contours

Si la recherche porte sur la détection des contrastes de niveaux de gris, le gradient morphologique, qui quantifie les variations de contraste d'une image, sera calculé. Cette transformation met en évidence les contours des objets de l'image, correspondant aux pixels où la transition de gris est la plus forte.

Généralement, la détection des sous-régions conduit à opérer des regroupements en fonction de leur ressemblance et de leur contiguïté, puis à hiérarchiser les contours. La procédure est expliquée en ANNEXE A et résumée comme suit.

- La première étape consiste à transformer l'image en une image mosaïque, pour la simplifier tout en conservant les contours des objets intacts mais en les rendant plus apparents.
- La hiérarchisation des contours s'effectue par une séquence de transformations morphologiques : calcul du gradient mosaïque puis LPE de l'image du gradient mosaïque. La hiérarchisation des contours consiste à supprimer progressivement les contours des régions dont les contrastes sont les moins forts et à répéter la procédure jusqu'à parvenir à l'ensemble vide.

La figure 22 présente une application de la procédure de hiérarchisation du gradient mosaïque aux densités de populations communales du Gard et de l'Hérault en 1990. Douze niveaux de contrastes régionaux ont été décelés. Trois d'entre eux ont été représentés. On observe qu'après la suppression des deux premiers niveaux de contrastes, les différenciations locales demeurent nombreuses, autant dans l'arrière-pays que dans l'avant-pays. Au niveau 6, le compartimentage reste fort dans l'avant-pays alors que l'intérieur s'est uniformisé. Au niveau 12, ne persistent que les contrastes les plus forts, correspondant aux centres urbains de la plaine littorale et à quelques centres situés à l'intérieur.

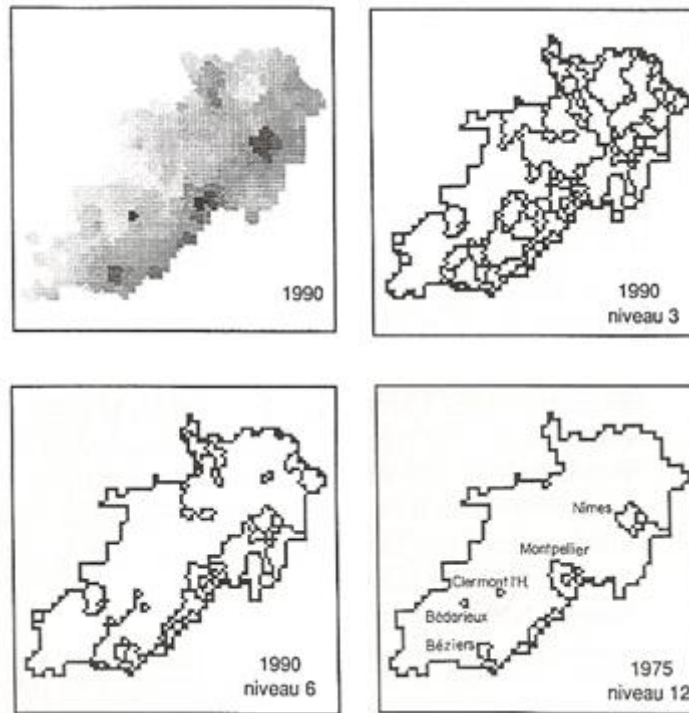


Figure 23 : Hiérarchisation du gradient des densités communales du Gard et de l'Hérault (Voiron, 1995).

Conclusion de chapitre

Raymond Queneau dans *Odile* explique qu'« il n'existe pas qu'un seul monde : ce que vous voyez, ce que vous croyez voir, ce que vous vous imaginez voir, et ce que vous voulez bien voir ». Il résume les points de vue sur la conception de l'espace qui ont guidé le déroulement de ce chapitre. L'**objectivité** sous-entendue dans la phrase « ce que vous voyez » indique que l'espace constitue notre environnement, ce qu'il y a autour de nous et indépendamment de nous. C'est l'**espace géométrique** : continu, infini, **tridimensionnel**, homogène et isotrope (Poincaré, 1902). « Ce que vous croyez voir » renvoie davantage à la **perception** du monde par l'homme. Ce que nous voyons est filtré par la pensée : couleur, mouvement, agencement ; tous ces éléments sont triés dans notre esprit. Ces éléments sont ainsi **représentés** en « ce que vous vous imaginez voir ». Le tri et le classement de l'information visuelle sont ensuite **interprétés** et constituent « ce que vous voulez bien voir ».

Les dimensions d'un objet de l'espace ou de l'espace lui-même renvoient à leur grandeur, à l'aspect mesurable de celui-ci : longueur, largeur, hauteur, dont sont déduits la superficie et le volume. Si l'on considère qu'il existe d'une part les dimensions de l'univers et d'autre part les dimensions d'un objet, celles de l'univers (l'espace géographique) sont toujours au nombre de trois tandis que celles de l'objet sont au nombre de 0, 1, 2 ou 3 (Larrivée, Bédard, Pouliot, in RIG, 2006). Par conséquent, **la troisième dimension est envisagée dans ce travail de thèse comme la verticalité des objets qui s'ajoute aux deux premières pour former le volume.**

Si l'espace réceptacle en tant que vide se résume à trois dimensions séparées du corps (Lévy, 1987) ; un corps, un objet, un sous-espace peut être considéré comme le réceptacle ou le vide * d'un autre corps. Ainsi, la forme renvoie à la fois à un contenant et à un contenu. En effet, la forme est d'abord l'enveloppe d'un objet, donc un contenant, mais elle contient aussi un espace et des objets en interaction ; elle est donc un contenu. Espace et formes sont un ensemble insécable au même titre que le Tout et les parties. L'agencement des formes donne un sens à l'espace où elles se déploient. Rappelons que pour Descartes, le corps n'est rien d'autre qu'une partie en trois dimensions de l'étendue. De ce fait, l'espace peut être considéré tour à tour : forme et espace ; il possède donc une propriété multiscalaire.

Pourtant, considérer l'espace comme un cadre de référence implique un caractère relatif. En effet, « tout objet est relatif à l'espace dont il occupe un lieu, mais que l'espace comme tel n'est, lui, relatif à rien » (Bachelet 1998, p.105). Selon Leibniz, l'espace n'existe que par les interactions des objets qui s'y trouvent. Il est le résultat de ces interactions. En effet, certains considèrent que l'espace ne peut exister indépendamment de la pensée. Ainsi, c'est parce que l'homme voit l'espace que celui-ci existe. L'homme perçoit l'espace, le construit en pensée et l'interprète. Pour se le représenter et le représenter, il l'associe à des abstractions géométriques et/ou des schèmes existants.

Ce processus d'interprétation qui consiste à découper, à trouver une unité, correspond aux principes théoriques de la forme. Ainsi, la **conceptualisation de la forme** permet d'y voir plus

clair sur la conceptualisation de l'espace. Dans le sens commun, la forme renvoie à « la figure, la configuration externe, ou à la manière sous laquelle les choses se présentent » (Brunet et Alii, 1996, p.223). La forme est donc une donnée naturelle, une limite définie et enveloppante qui isole un objet du reste. Pour d'autres (Guillaume, 1979, Thom, 1972, 1999, Dauphiné, 2003, Voiron, 2004), la forme désigne des organisations, des relations. En ce sens, elle a plutôt le sens de structure, voire de saillance (Thom, 1972) en tant que discontinuité donnant une prégnance aux propriétés internes.

Parallèlement, les **discontinuités qualitatives** et les bifurcations d'un système donnent forme aux phénomènes. La forme est une figure se détachant du fond, autrement dit un ensemble homogène séparé du fond par une rupture. Nous avons discuté au cours de ce chapitre du fait que forme et forces sont indissociables. Les **forces** sont les interactions ayant cours dans les systèmes spatiaux. La **pression** est le principal générateur de formes tridimensionnelles, le plissement des plaques tectoniques ou le processus d'urbanisation illustrent ce phénomène.

En géographie, l'analyse porte tantôt sur la manière dont les sociétés produisent leur espace et tantôt sur les **caractéristiques géométriques** de l'espace. De ce fait, l'espace est considéré comme support, c'est-à-dire une configuration unique à toutes les cultures issue de la projection de réalités économiques, sociologiques, politiques non-spatiales ; ou comme un agent à part entière, certes différent des agents socio-économiques car dépourvu de finalité et d'intentionnalité, mais qui ordonne l'action de ces derniers. L'analyse spatiale s'appuie sur cette définition de l'espace.

Par conséquent, les problématiques spatiales intègrent la troisième dimension de manière différenciée. La principale utilisation de la troisième dimension est la **représentation** pour améliorer la communication et la pédagogie sur l'espace par une description plus fine. Par ailleurs, l'intégration de la troisième dimension dans le processus de **compréhension** et d'**explication** de l'espace géographique semble nécessaire au regard de certaines problématiques, par exemple l'aménagement du territoire.

Pour l'**analyse spatiale**, l'espace est un tout formé à la fois d'éléments visibles et d'éléments invisibles dans lequel il faut établir les règles d'organisation et d'évolution fondées sur l'interaction spatiale. Intégrer la verticalité et le volume dans les méthodes d'analyse spatiale offre de **nouvelles opportunités de recherche**. Toutefois, aujourd'hui, certaines recherches utilisent la troisième dimension comme un pseudo-relief représentant une variable supplémentaire à localisation (coordonnées). Ainsi, l'**espace géographique** possède au moins trois dimensions, il est parfois **multidimensionnel** lorsque des variables supplémentaires lui sont attribuées.

Dans ce travail de recherche, l'objectif est de déterminer en quoi la morphologie en 3D et le volume participent et interagissent dans le fonctionnement du système urbain. Cette problématique renvoie à la définition en analyse spatiale de la modélisation et du modèle dans la mesure où celle-ci cherche à mettre en évidence les formes et les structures spatiales récurrentes de l'organisation de l'espace géographique.

En ce sens, la morphologie mathématique propose un ensemble d'outils et de méthodes adaptés à cette problématique. Les exemples d'applications développés dans ce chapitre serviront de point d'appui à notre analyse.

Chapitre 2. Espace et formes urbaines dans le système urbain

« Je ne cherche pas ici à faire le portrait d'une ville. Je voudrais seulement essayer de montrer - avec toute la part de gaucherie, d'inexactitude et de fiction que comporte un tel retour en arrière, - comment elle m'a formé, c'est à dire en partie incité, en partie contraint à voir le monde imaginaire, auquel je m'éveillais par mes lectures, à travers le prisme déformant qu'elle interposait entre lui et moi, et comment de mon côté, plus libre que j'étais par ma réclusion de prendre mes distances avec ses repères matériels, je l'ai remodelée selon le contour de mes rêveries intimes, je lui ai prêté chair et vie selon la loi du désir plutôt que selon celle de l'objectivité »

Gracq, 1985

L'intérêt de l'intégration de la 3D dans les méthodes d'analyse spatiale appliquées aux espaces urbanisés se situe dans la définition même de la ville. En effet, pour Brunet et Alii (1996), la ville prend une de ses racines dans le terme indo-européen *bhergh*, la hauteur.

Parallèlement, le premier chapitre a permis de montrer l'intérêt de développer des méthodes s'appuyant sur la troisième dimension notamment lorsque l'espace est soumis à des forces et des pressions.

Depuis la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, la ville connaît une croissance extensive. Selon les Nations-Unis, plus de 50% de la population mondiale est urbaine en 2011. En France, ce chiffre s'élève à 85%. En outre, entre 1999 et 2010, la surface des espaces urbains a augmenté de 19% (Clanché et Rascol, 2011). Les problèmes engendrés par l'étalement urbain ont conduit les scientifiques et les acteurs du territoire à s'intéresser aux formes urbaines (Burgel et Alii, 1998, Raynaud, 1999, Panerai et Alii, 2001). Verticalité et espace urbain sont souvent associés. En quoi la troisième dimension est-elle un élément clé de l'analyse de ce type d'espace ? Existe-t-il d'ores et déjà des méthodes permettant de réaliser ce type d'analyse ?

Appréhender l'espace urbain par la forme (urbaine) se justifie par plusieurs raisons. La ville est un système spatialisé complexe, ouvert (Allain, 2004), multiscalair et multidimensionnel (Lévy et Lussault, 2003).

Ce chapitre souhaite, alors, identifier les propriétés formelles de l'espace urbain pour, ensuite, examiner les processus de sa transformation sous l'angle des forces qui les induisent.

L'espace urbain a fait et fait toujours l'objet de nombreuses recherches. Par conséquent, ce chapitre vise à explorer les travaux existants sur l'urbain, en portant une attention particulière à ses dimensions afin de démontrer qu'une analyse morphologique et tridimensionnelle est nécessaire à sa compréhension.

1. Système spatial urbain et espace urbain

La ville, considérée comme un système spatial, est « un projet bâti par un groupe social sur une portion plus ou moins étendue de la surface terrestre pour assurer la satisfaction de ses besoins et sa reproduction. C'est l'action de ce groupe sur son territoire pour parvenir à cette fin, tout en tenant compte des relations qu'il entretient nécessairement avec d'autres systèmes spatiaux » (Le Berre, 1988). Les actions que le groupe social entretient avec l'espace urbain s'expriment :

- en termes d'appropriation et de domination, par des rapports de force avec d'autres groupes sociaux qui utilisent déjà ou convoitent la même portion d'espace ;
- en termes d'aménagement et de marquage de l'espace, dont la forme urbaine est la partie visible ;
- enfin, en termes de cohésion spatiale, c'est-à-dire de nature et d'intensité des relations tissées entre les membres du groupe et le territoire urbain.

La forme urbaine est donc constitutive de la structure spatiale de la ville, elle résulte des dynamiques urbaines et en retour, rétroagit sur ces dernières.

1.1. Analyse des formes urbaines

La forme est, nous l'avons vu, à la fois une discontinuité – un contour – et un système – un tout organisé en parties interdépendantes. De la même manière, P. Genestier (Burgel et *Alii*, 1988) décompose la forme urbaine en **contenant** et **contenu**. De même, J-P. Paulet (2000) définit la forme urbaine comme « les contours d'un objet [contenant], son tracé ou son modèle, son organisation en partie [contenu] ».

D'une part, la forme est une modalité d'existence de la matière, en conséquence la forme urbaine en tant que volume, enveloppe, aire ou contour correspond au dessin de la limite de l'espace urbain. D'autre part, la forme incarne la matière ou la structure ; de ce fait, la forme **contenue** est l'organisation interne de la ville, la répartition des bâtiments fonction de la distribution de la population et des activités. Ainsi la **forme urbaine** est un **contenant** par son **contour** (2D) ou son **volume** (3D) décomposé en quartiers, îlots et bâtiments. Pour faciliter la compréhension, nous utiliserons le terme de *forme urbaine* pour parler du contour ou de l'ensemble de la ville (tout organisé en partie) et de la *forme intra-urbaine* pour l'organisation des composantes bâties.

La notion de forme urbaine est construite « sur l'idée que la ville n'est pas une juxtaposition d'objets sans lien les uns avec les autres. [...] Des entités cohérentes existent à plusieurs échelles : de l'immeuble à la ville entière, toutes les échelles sont possibles (le quartier, la rue, l'îlot, le centre historique, les banlieues pavillonnaires *etc.*). L'identification des échelles pertinentes est un des enjeux de l'analyse des formes urbaines » (Coudroy de Lille, 1998).

1.1.1. Les éléments de l'espace urbain : quelles dimensions ?

La forme est tour à tour contenant et contenu. Chacun des éléments présentés ci-dessous constitue une forme également contenant et contenu. L'espace urbain possède certains **invariants**, en termes de formes, quelles que soient la ville et la période considérées (figure 24).

Les objets en bleus symbolisent les éléments morphologiques tandis que l'objet en vert représente les processus associés.

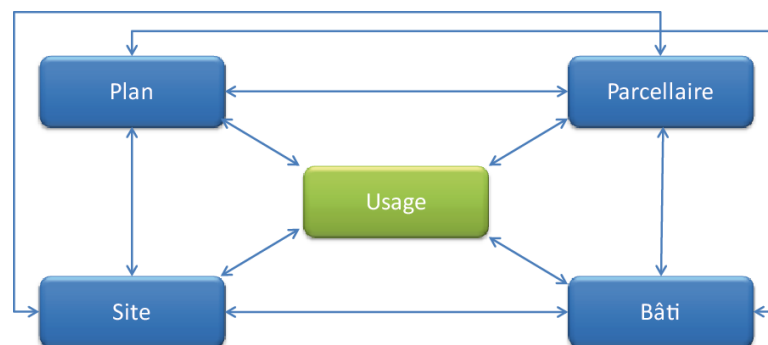


Figure 24 : Le système morphologique de la ville (d'après Allain, 2004)*.

Les objets de la figure 24 constituent les éléments morphologiques créés à différentes échelles et qui traduisent un ensemble de processus mis en jeu dans le système urbain.

Le **plan**, objet en deux dimensions, recouvre trois réalités à trois échelles différentes : la forme générale d'une ville ou la macroforme, le plan général de la ville et le plan ou maillage de détail. Il a un fort pouvoir d'inertie dans la mesure où les différents plans qui se sont succédés au cours des siècles sont encore lisibles et visibles dans l'espace urbain. De par sa composante historique, le plan peut être utilisé pour détecter les différentes périodes d'urbanisation, donc les différents types de formes urbaines (Roncayolo, 1990).

Parallèlement, le plan est l'instrument principal de la planification, la transcription des idéaux et des objectifs des décideurs et des acteurs. En conséquence, le plan découpe l'espace urbain en différents secteurs caractérisant l'utilisation du sol futur.

Le **parcellaire**, autrement dit le cadastre, objet également en deux dimensions, correspond au découpage du sol. Il est le symbole de l'appropriation de l'espace par les hommes et constitue la première étape de l'occupation du sol pour définir son utilisation. L'agencement des différentes parcelles forme un maillage particulier qui sert de support au bâti et détermine d'une certaine manière sa forme. Néanmoins, l'appropriation de l'espace et son utilisation sont largement contraintes par le plan. Tout d'abord, les plans d'urbanisme (POS ou PLU) se doivent de fournir une fonction telle que « espace naturel », « industriel », « mixte », *etc.* à des secteurs de la ville, et à laquelle se réfèrent les parcelles et les permis de construire. Ensuite, le prix du foncier est calculé à la parcelle, et de celui-ci dépend le montant d'investissement de la fonction qui veut l'occuper.

Le **site** est le support physique des autres éléments précédemment cités, il possède trois dimensions. Il contraint et façonne l'espace urbain car il l'inscrit dans un espace (système) plus global. Ainsi le site influence la macroforme, le plan et le maillage, la localisation des activités et les choix résidentiels. La morphologie du site est très importante pour la localisation des fonctions urbaines et surtout pour la localisation résidentielle. Plusieurs études (Olivier, 2002, Robert, 2009) ont montré que la localisation résidentielle n'était pas un processus aléatoire. Le choix du site fait partie des stratégies individuelles, par exemple, un logement bénéficiant de la vue sur mer est plus attractif que celui donnant à voir une voie rapide.

Le **bâti** se compose de constructions ou bâtiments caractérisés par leur âge, leur style, leur élévation, leur emprise au sol (largeur, longueur). Les combinaisons entre pleins (bâti) et vides constituent le tissu urbain. L'utilisation de la troisième dimension est, pour cet élément, essentielle car elle en est une caractéristique. Durkheim qualifie de morphologiques, les faits sociaux qui se sont cristallisés en un substrat relativement stable dans la forme d'habitation (Olivier, 2002). Le tissu urbain met donc en interrelation le bâti avec les autres éléments (le site, le plan et le parcellaire) et structure la construction et la transformation des bâtiments.

La forme urbaine est très souvent analysée en relation avec le **réseau**. En effet, la forme intra-urbaine se décompose en trois éléments matériels : le bâti, le réseau et l'espace public. Le dessin des rues et des îlots, ainsi que celui des réseaux de transport est au cœur du courant design en urbanisme (Cervero et Kockelman, 1997). La plupart des études urbaines postulent que le réseau, et par conséquent, les pratiques de mobilité, façonnent la forme urbaine. Ainsi, l'automobile est accusée d'avoir créé la ville étalée et le réseau, d'intervenir directement dans la production des formes urbaines. D'autres études ne la tiennent pas responsable de la forme urbaine et mettent davantage l'accent sur les comportements des ménages, sur la plus grande disponibilité foncière à moindre coût, sur la volonté d'accéder à la propriété, sur la recherche d'une certaine qualité de vie. Il existe donc des visions contradictoires sur le lien causal entre forme urbaine et réseau. Actuellement, la politique visant un développement durable préconise la densification du bâti et l'abandon de la voiture au profit des modes doux (transport en commun, vélo, marche à pied, *etc.*) sans pour autant hiérarchiser les deux processus. Dans ce travail de recherche, ces deux éléments sont considérés en interrelations car les deux interviennent simultanément et doivent être considérés comme les parties d'un tout indissociable.

L'ensemble de ces éléments en tant qu'objets 2D et 3D se combinent pour former l'espace urbain (figure 25). Il en résulte une nouvelle forme complexe tridimensionnelle. La représentation de ces éléments combinés n'est pas chose aisée, nous en discuterons dans le chapitre 5.

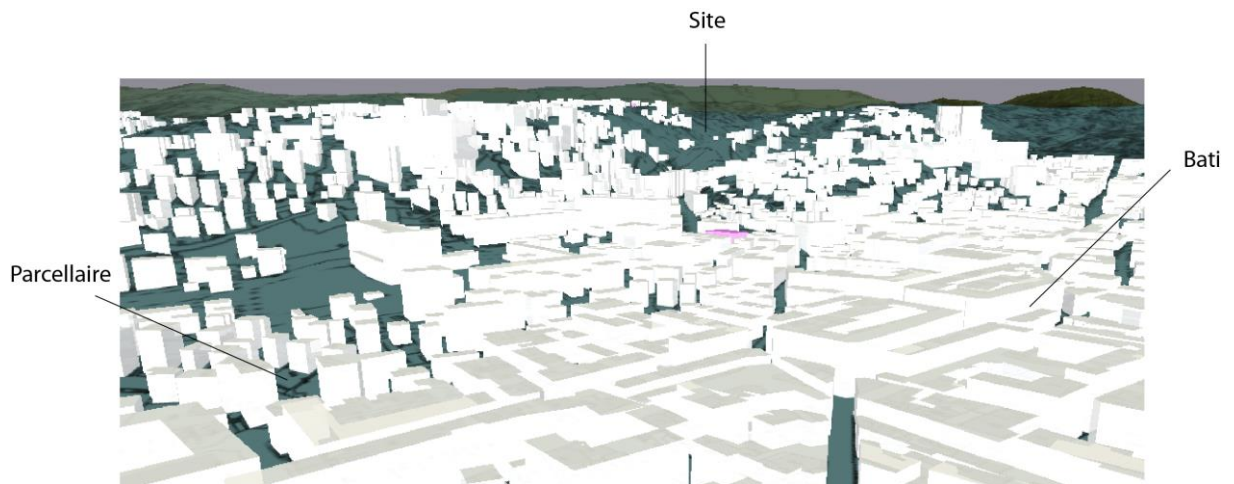


Figure 25 : Représentation de la combinaison entre plusieurs éléments urbains

Source : Géoportail de l'IGN 2013.

1.1.2. La ville est un palimpseste

L'espace urbain est un produit historique ; il est le résultat de l'inscription au sol des groupes sociaux qui s'y sont succédé. Chaque époque a remodelé la forme intra-urbaine, ajouté son façonnement architectural, viaire, culturel et social. La morphologie urbaine actuelle est l'expression de la **superposition de différentes strates sociales et culturelles**, des conceptions urbaines associées à l'héritage qui en résulte.

À l'origine, le développement des **villes grecques** se fonde sur l'association entre politique et conception religieuse, il n'y a pas de réelle **organisation socio-spatiale urbaine**. Il faut attendre Platon et Aristote pour que naisse une réelle réflexion sur l'urbanisme autour de la relation ville/environnement ou ville/qualité de vie. En effet, les villes doivent être construites en respectant un cadre agréable (climat, site, santé...).

L'aménagement urbain commence au VI^{ème} siècle avant JC par le développement de quartiers d'habitations composés d'immeubles de faibles hauteurs afin de densifier la ville originelle. Au cours du V^{ème} et du IV^{ème} siècle avant JC, le renouvellement urbain laisse place à l'expansion urbaine grâce à la mise en place des plans orthogonaux (plan de Millet). Par la suite, la ville helléniste impose aux plans orthogonaux l'idée du grandiose et du monumental en élargissant les rues. Ce dernier type de plan souhaite une harmonie entre la largeur des rues, la hauteur des bâtiments et la symétrie régissant les proportions de la ville.

La ville romaine reprend la base du plan orthogonal inscrit entre cardo et decumanus. La conception romaine est fondée sur l'optimisation de la morphologie urbaine entre largeur des rues et bâtiments : la largeur des rues doit être de 40 pieds soit 12 mètres, la séparation des bâtiments de 5 pieds soit 1.5 mètres. L'apport principal des Romains est la forte réglementation appliquée à l'urbanisme.

Pendant le **Moyen-âge**, le mode d'urbanisation est double sous un objectif unique : celui de **maximiser l'espace** pour accueillir un maximum de population intra-muros. L'effondrement de l'Empire Romain, les grandes invasions et les guerres remettent en cause le plan orthogonal romain. Cette période de troubles conduit à une contraction de l'espace urbain et impose un urbanisme défensif caractérisé par des murailles qui enserment les bâtiments. S'ensuit une période de paix et de progrès techniques agricoles qui entraînent une croissance démographique et économique. La croissance urbaine est alors essentiellement le fait de l'exode rural et se matérialise sous deux formes. Tout d'abord, s'ajoutent à la cité héritée de la période Antique des faubourgs d'artisans et de commerçants qui sont fortifiés. Parallèlement, des villes nouvelles sont créées pour une partie autour des édifices religieux ou des châteaux. Même si les objectifs sont avant tout économiques, la sécurité est également une raison du rapprochement des populations vers les villes ou les bourgs déjà fortifiés.

Cette conception de la ville (défensive) exige donc une maximisation de l'espace : des rues très étroites, le plus souvent sinueuses et des bâtiments très élevés, voire en encorbellement. L'exemple de la ville de Nice est illustré figure 26. Cette forme d'urbanisation offre un

paysage très fermé et peu propice à la circulation de l'air, et entraîne des problèmes de salubrité.



Figure 26 : Exemple de quartier issu de la période du Moyen-âge de la ville de Nice

Source : Google Map, 2013.

La **Renaissance** introduit une nouvelle conception de la ville et de la vie urbaine : la recherche d'une **forme idéale de ville** dans un souci de rationalité, de symbolique et d'esthétique. L'application de ces villes idéales sera restreinte aux villes nouvelles d'étendue limitée. L'Italie, point de départ de ce courant, est emblématique de ce nouvel élan urbanistique avec la création de plans circulaires, réticulaires ou en étoiles, et la recherche d'une certaine monumentalité. Dans les plans, la priorité est donnée aux espaces publics, aux lieux de rassemblements, de rencontres, aux rues bordées d'arcades où l'on peut se protéger également du soleil et de la chaleur.

L'influence italienne va peu à peu gagner la France et apporter des idéaux urbains prônant la construction de villes de dimension réduite, une valorisation du cadre de vie avec une volonté d'intégrer la nature dans la ville et d'améliorer la salubrité. Dans cette optique, la limitation de Paris est rendue obligatoire par diverses ordonnances royales. Les questions de salubrité sont envisagées au travers des impératifs de circulation de l'air : les rues doivent être larges et

rectilignes. Paradoxalement, la volonté de contenir la ville s'oppose à celle d'une ville aérée. En parallèle, les opérations onéreuses de rénovation des bâtiments, liées à l'élargissement des voies de communication, excluent une partie de la population qui se réfugie en périphérie.

Au XIX^{ème} siècle, les villes prennent un essor remarquable grâce aux progrès techniques et scientifiques. La mécanisation du secteur primaire et l'augmentation de la productivité du travail dans le secondaire et le tertiaire ont conduit à la révolution industrielle et à l'exode rural. Les villes et les noyaux urbains (développés autour des industries) ont dû faire face à l'arrivée massive de populations. De ce fait, il est apparu nécessaire d'organiser la ville et d'anticiper les besoins en logement. Ainsi, cette croissance urbaine a engendré une accélération de la production et de la transformation du bâti : soit par restructuration des quartiers existants, soit par extension en périphérie.

L'industrialisation de l'économie, et par conséquent du paysage, paraît dégrader la qualité de vie des urbains, l'agrégation de la population et des bâtiments, sur lesquels se greffent des activités polluantes, entraîne une concentration des nuisances. Le courant hygiéniste prend son essor à cette époque et aura pour principe d'assainir la ville. En réponse aux problèmes engendrés par la croissance urbaine et l'industrie, les urbanistes comme Cerdà ou Haussmann ont proposé des plans d'embellissement et d'amélioration de la qualité de vie. L'urbanisme reste relativement fidèle aux conceptions du XVIII^{ème} siècle, les tracés sont orthogonaux avec la percée de grands axes structurants et les perspectives monumentales. De plus, un rôle essentiel est attribué aux façades (figure 27).



Figure 27 : Exemple de quartier issu de la période Hygiéniste de la ville de Nice – en jaune sur l'image
Source : Google Map, 2013.

Ces plans marquent les prémices des **critiques de la ville industrielle**, les espaces urbains hérités de l'époque médiévale et baroque ne conviennent plus aux besoins de la ville moderne : manque de logements, surtout pour les classes ouvrières, problèmes de salubrité. Ces critiques se font plus vives avec l'apparition de nouveaux courants d'urbanisme : principalement les **progressistes** et les **culturalistes**. Cette époque voit apparaître l'urbanisme moderne, tel qu'on le connaît.

Les premiers placent l'individu au cœur de leur théorie, « l'homme est interchangeable dans le temps et dans l'espace » (Harouel, 1981, p.95). Ainsi les modèles urbanistiques doivent convenir à tous les êtres humains et s'adapter à la modernité symbolisée par les innovations technologiques (l'usine, l'automobile, l'avion). Concrètement, le bâti est vertical, entouré d'espaces verts et éloigné des voies de circulations. De même, est prônée une division de l'espace fonctionnel, c'est-à-dire entre les différents lieux de vie et les différentes temporalités de l'individu (espace de travail, espace de loisir, espace résidentiel). Malgré la densité apparente qu'offrent ces bâtiments collectifs construits en hauteur, la surface qu'occupent les espaces « vides » est prédominante. L'application de ces modèles urbains conduit à la situation que nous connaissons aujourd'hui, c'est-à-dire une dissolution de l'espace urbain. Cette pratique de « **zonage** » a morcelé l'espace urbain et ses temporalités ; en effet, la ville est découpée en différentes zones (activité/ commerce/ résidence) qui s'animent à différents moments de la journée.

Les culturalistes, quant à eux, souhaitent revenir à la **ville dense du passé**. Cette conception s'appuie sur les éléments essentiels des villes médiévales et baroques : la chaleur humaine, l'urbanité et la qualité architecturale. Ainsi, l'esthétisme et la culture sont au cœur de leur sensibilité urbanistique. Concrètement la ville des culturalistes est de taille réduite, elle est construite autour de l'espace public (places), ses rues sont sinueuses et encadrées de bâtiments de hauteurs irrégulières. Cette conception minoritaire à l'époque est aujourd'hui mise en avant.

Les réalisations urbaines issues de ces idéologies sont peu nombreuses, quelques édifices et bâtiments, un quartier tout au plus, sont construits. Par exemple, il ne reste que l'unité d'habitation de la Cité Radieuse de Le Corbusier bâtie à Marseille. Paradoxalement, la conception progressiste a été le mode d'urbanisation dominant jusqu'à l'heure actuelle, notamment avec la construction des grands ensembles. L'idée principale, qui est de faire écho à la modernité, notamment en facilitant l'usage de l'automobile, a conduit à l'étalement et au morcellement de la ville.

Cette période de l'urbanisme français laisse aujourd'hui de grandes friches dans les centres urbains. Ces bâtiments (leurs formes) ne sont plus adaptés à l'accueil de l'activité industrielle, et ce pour deux raisons : le prix du foncier et les infrastructures de transport inadaptées.

La seconde guerre mondiale met entre parenthèses l'urbanisme français, certaines villes sont même détruites. La **période d'après-guerre** est donc vouée à la reconstruction des villes et au relogement. Cette période est marquée par des conditions de logement désastreuses. Les

logements sont souvent trop petits, sous équipés, sans commodité ni hygiène. Parallèlement, la **croissance démographique** (baby boom et vague d'immigration) et la structure des ménages (diminution de la taille) ont accentué la **crise du logement**. Compte tenu de la situation économique, la seule action des pouvoirs publics a été de débloquer les loyers en 1948 pour permettre la rénovation du parc par les propriétaires. La reconstruction a donc pris du retard, conduisant à la formation de bidonvilles et de logements précaires (par exemple à Nanterre).

Ce n'est qu'en 1950 que l'Etat a pris les premières mesures. La forme la plus visible de ces politiques de construction de logements fut les **grands ensembles** (figure 28). Le Corbusier inspira de nombreux architectes de l'époque, et la plupart des grands ensembles s'appuieront sur les principes qu'il avait développés. Par rapport à la précarité des logements existants, les appartements proposés dans ces grands ensembles procurent un grand confort, tous les logements sont notamment équipés de WC et de salle d'eau.



Figure 28 : Exemple de grands ensembles de la ville de Nice
Source : Google Map, 2013.

Ce type de bâtiments a été une réponse rapide au problème urgent du logement, cependant il est à regretter que l'implantation des immeubles n'ait pas été suivie par la construction des infrastructures nécessaires. Le manque de réflexion globale sur l'urbanisme a conduit à l'exclusion des populations habitant ces quartiers. Aujourd'hui ils subissent une profonde ségrégation et une exclusion de la ville.

Cette forte croissance urbaine d'après-guerre a poussé les villes à s'étendre au-delà de leurs limites. Aujourd'hui, une très nette distinction est visible entre la compacité et les fortes densités de bâti des centres-villes ou centres historiques constitués de l'Antiquité au Moyen-âge, et l'aération produite par le mitage urbain des quartiers périphériques développés après-guerre.

L'augmentation de la mobilité (développement du réseau routier) et le recours systématique à l'automobile (beaucoup plus accessible) ont permis aux citoyens d'accéder à un mode de vie jugé plus agréable et de bénéficier de biens immobiliers à des prix plus abordables qu'en centre-ville. Certains auteurs comme Newmann, Kenworthy ont constaté une corrélation entre les formes urbaines et les systèmes de mobilité (Fusco, 2003). Ainsi le système de production du bâti est influencé par le système de mobilité. En effet, l'augmentation de la mobilité a généré une forte diffusion du bâti dans des zones périphériques, sous la forme de zones pavillonnaires et de grands ensembles de banlieues, *etc.* Le nombre de zones pavillonnaires a ainsi très fortement augmenté surtout en France et plus particulièrement dans le sud du pays. La surface bâtie augmente plus vite que la croissance de la population (figure 29). Les caractéristiques de l'identité urbaine s'effacent peu à peu et le bâti se diversifie. Le mode de vie et le lien social urbain évoluent vers une forme d'individualisme.



Figure 29 : Exemple de lotissements de la ville de Nice

Source : Google Map, 2013.

Il y a encore cinquante ans, la ville s'étendait « horizontalement » même dans les plans d'embellissement où l'habitat collectif dominait. La rénovation de l'après-guerre, menée par

une politique de destruction de l'ancien insalubre au profit de grands immeubles modernes, a entraîné la destruction d'une grande partie du patrimoine. Par exemple à Paris, lors du plan d'urbanisme de 1962, la rénovation par destruction puis reconstruction s'est opérée sur 7000 des 10000 ha concernés par le plan. L'objectif était de « reconstruire Paris sur Paris » (attribué à M. Delouvrier) selon le modèle de la charte d'Athènes. Depuis, une nouvelle forme urbaine a pris le pas : celle de la ville « horizontale ». Cette nouvelle forme est due à un changement des modes de vie, lui-même favorisé par la perte d'importance de la distance dans les choix de localisation, au profit de la durée. Le « zonage » des années 50 a morcelé l'espace urbain et ses temporalités car chaque zone s'anime à différents moments de la journée.

Plus récemment, certaines villes voient leurs activités économiques décroître et par conséquent leur population, notamment dans l'Est de l'Allemagne et les villes industrielles américaines telles que Détroit (Franz, 2004, Couch et *Alii*, 2005, Florentin et *Alii*, 2009). Ce phénomène est appelé le rétrécissement des villes, *Schrumpfung* en allemand (Florentin et *Alii*, 2009) ou *Shrinking Cities* (Pallagst et *Alii*, 2009) aux Etats-Unis, en opposition au terme d'étalement urbain utilisé précédemment. En effet, après une période de forte croissance démographique dans les espaces urbains, les crises économiques, notamment dans l'industrie, ont conduit à la migration de population vers des espaces urbains économiquement plus dynamiques, en laissant de grands pans de zones urbaines à l'abandon. En ce sens, l'espace urbain ne rétrécit pas réellement mais se perfore, dans la mesure où certaines portions se vident à l'intérieur de l'aire urbaine.

Ces deux dynamiques urbaines se combinent parfois dans l'espace urbain et rendent difficile la mise en place de politiques urbaines. D'un côté, il faut maîtriser l'étalement urbain et de l'autre renouveler ces espaces en déclin.

1.1.3. Evolution des structures spatiales et évolution des villes

Deux optiques d'analyse des évolutions des structures spatiales coexistent au travers de l'histoire. La première met l'accent sur l'inertie des structures. Il est admis que les structures spatiales perdurent plus longtemps que les structures fonctionnelles. Or, les organisations spatiales héritées sont généralement perçues comme rigides et faisant obstacle aux changements ultérieurs. « Lorsque l'on fait l'histoire de « l'inertie des structures spatiales », c'est que l'on ne reconnaît l'existence, parmi les structures susceptibles de contraindre les décisions des acteurs, que de celles dont les acteurs ont pris conscience. Dans cette optique, les villes sont volontiers considérées comme des palimpsestes que retouche chaque génération, et l'espace modelé par avance est un obstacle à surmonter, à casser ou à recomposer ». (Pumain, 1998b, p.48). La seconde, examine les structures et les formes urbaines qui les composent sous l'angle de l'adaptabilité. « Si au contraire on définit l'espace urbain comme un espace relatif, construit par les relations entre les acteurs, on insiste sur sa formidable capacité d'adaptation, qui fait que ce que l'on désigne comme la même « ville » est en fait une entité en continuelle transformation » (Pumain, 1998b, p.48). Cette optique,

moins fréquente et plus récente, est d'un grand intérêt dans le cadre de la recherche des formes urbaines durables.

Examinons à présent, les processus de transformation urbaine sous l'angle des forces qui les induisent. Ces invariants sont tout de même soumis à des forces qui participent à leur évolution, mutation, transformation tels que le changement d'usage et la croissance de la population. « La société contemporaine se transforme vite [...]. Dans le domaine de l'urbanisme, nous percevons d'autant plus difficilement les changements que le cadre bâti évolue lui-même relativement lentement et que les constructions neuves réalisées chaque année représentent moins d'un pour cent du parc existant » (Ascher, 2008).

1.2. La valeur de l'espace comme résultat de forces qui s'y déroulent

La forme urbaine est soumise à des forces – démographiques, migratoires, sociales, économiques, *etc.* – qui la créent, la modifient, la différencient. La croissance de la population et/ou le développement des activités économiques participent à la croissance et la mutation de la forme urbaine.

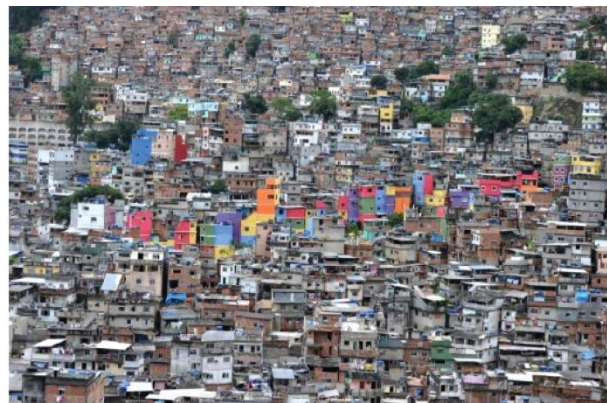
G. Desmarais relève deux types de processus susceptibles d'influencer fortement la structuration spatiale d'une agglomération urbaine (Espaces et Société, 2005) :

- la projection d'un modèle conscient, c'est-à-dire un processus planifié ; et
 - la dynamique d'auto-organisation, autrement dit un processus spontané et non planifié.
- La structure urbaine est le produit involontaire d'interactions multiples entre de très nombreux acteurs. Les structures et les dynamiques urbaines combinent des dynamiques micro, très rapides et d'apparence désordonnée, et une dynamique macro, plus lente.

Ainsi, le terme de forme urbaine est assimilé aux formes produites et souhaitées par l'homme. Cependant la construction de la ville et des formes urbaines dépasse la simple volonté des hommes et même celle des acteurs de la ville (décideurs, aménageurs, urbanistes). Ainsi, la forme urbaine est, tout d'abord, créée par la pensée de la société et des individus. Puis, elle est transcrite sur le sol soit sous sa **forme originelle – idéale** – soit sous une forme **transformée – spontanée et auto-organisée** (Chaline, 1999).



Formes organisées
Brasília



Formes spontanées
Favelas de Rio de Janeiro

Figure 30: Exemples de formes urbaines issues d'un processus de planification ou d'auto-organisation

Source : [3] et [4].

La figure 31 présente le système dans lequel les types de formes urbaines sont produits. La forme idéale dépend surtout des modes de pensée de la société et des politiques, alors que la forme spontanée tient davantage compte de paramètres appartenant à la réalité des processus socio-économiques et des comportements individuels. Les formes idéales sont exprimées par les décideurs de la ville à travers des plans d'aménagement et d'urbanisme qui indiquent les

lignes de l'urbanisation future. Les formes spontanées sont, quant à elles, l'interprétation des formes idéales et surtout de leurs déviations.

Ainsi, Piron (2003) différencie ces deux modes de mutations urbaines en insistant sur les temporalités :

- l'urbanisation progressive, parcelle par parcelle, au gré des réserves foncières et des décisions individuelles (publiques ou privées) crée des formes spontanées ;
- l'urbanisation par bond, par transformation d'un quartier ou d'un secteur d'urbanisme entier traduit des formes idéales.

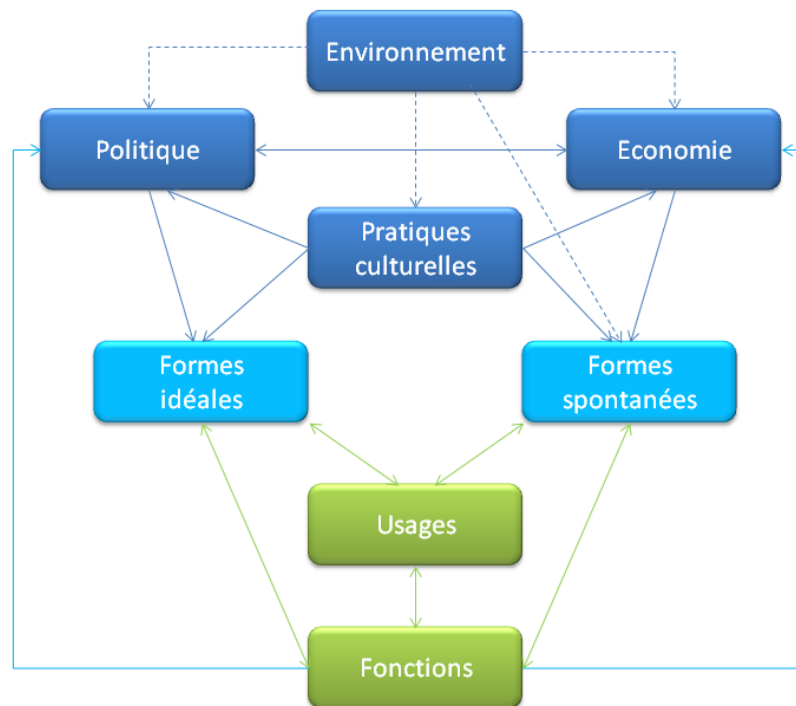


Figure 31 : Interactions des formes urbaines sur les éléments du système urbain*
(Sevenet, 2013).

Rappelons que la forme est conditionnée par le plan produit par les décideurs (politiques). Pour répondre aux besoins des citoyens, ceux-ci transcrivent un projet de développement de l'espace urbain. Par exemple, les grands ensembles construits dans les années 70, tout comme les bidonvilles, sont deux types de réponse donnés à la question du logement d'une population en forte croissance.

L'espace urbain n'est pas la seule production du pouvoir politique, il est l'enjeu de luttes qui prennent toujours une expression politique finale qui met en relation les quatre types d'acteurs (collectivités, promoteurs, constructeurs et habitants) auxquels il faut ajouter une dimension sociétale (Olivier, 2002). La **multiplicité des acteurs** complexifie les enjeux des transformations des formes intra-urbaines. Pour Lévy et Lussault (2003), l'espace urbain est

La composante
environnementale a
été ajoutée en
pointillé car elle est
relativement récente

un **système multidimensionnel** (temporel, social individuel, économique, politique et spatial).

L'appropriation de l'espace fait donc l'objet de lutte dans la mesure où lui est attribuée **une valeur**. La rente foncière et le prix du sol a déjà été discuté dans le chapitre 1. Cependant, nous souhaitons insister dans ce paragraphe sur les facteurs qui influencent cette valeur. Celle-ci dépend d'un certain nombre de critères plus ou moins subjectifs tels que la proximité d'une infrastructure de transport, la centralité ou la vue sur mer que nous avons évoquée précédemment. La valeur influence le prix du foncier qui va interagir avec la forme urbaine et l'usage. Pour illustrer cet effet, l'exemple le plus simple est l'attrait qu'apporte la centralité aux activités de bureau et aux activités commerciales. Ainsi, la valeur importante que ces activités allouent à certaines parcelles centrales, entraîne une augmentation du prix de ces parcelles qui empêche le développement de bâtiments résidentiels ou industriels. Une autre conséquence est la réponse des propriétaires au travers du bâti : pour compenser les prix élevés dans ces zones ou augmenter leurs bénéfices, les constructeurs ont tendance à bâtir en hauteur (figure 12).

La **ville** est également un **espace social** ; les individus et les groupes sociaux associent une valeur à leur espace vécu. Toute modification de cet espace vécu peut entraîner une perte de repères. Rappelons que trois éléments majeurs interviennent dans la structuration de notre environnement : les actions logico-mathématiques (la perception), les structures abstraites (les formes euclidiennes simples par exemple) et les mentalités culturelles (Voiron, 2004). Ainsi, la perception des formes urbaines et de leur évolution par les individus et les groupes sociaux est composée des caractères personnels et psychologiques liés à l'âge, l'état d'esprit au moment de l'observation, le milieu socioculturel, l'éducation et la technique.

L'espace vécu est perçu par l'individu qui se le représente et qui lui attribue une qualité, donc une valeur. L'image mentale produite peut être très différente. Arte a diffusé le 30 mai 2005* un documentaire montrant à travers un chantier le regard que portent les habitants sur leur quartier, le Barrio Chino à Barcelone, et sa rénovation. Ce documentaire illustre bien les différentes forces qui permettent ou non d'atteindre les objectifs sociaux de la rénovation. Les habitants craignent d'être rejetés de leur quartier : soit par la volonté politique pour changer l'image d'un quartier populaire délabré, soit, plus généralement, par l'augmentation du loyer. Les habitants sont donc conscients du risque que peut entraîner la rénovation d'un quartier car ce processus qui consiste à améliorer et mettre aux normes les constructions, peut entraîner une augmentation des prix du foncier et un changement social corrélatif.

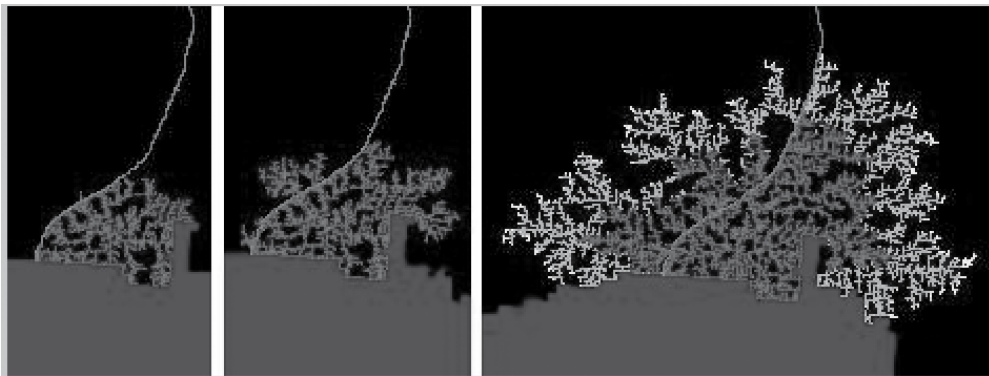
Documentaire de
Jose Luis Guerin,
EN
CONSTRUCTION,
Coproductio n :
INA, Ovideo,
ARTE France,
France/Espagne,
2001, 1h30mn

1.3. *L'espace urbain : produit du dialogue entre formes et forces*

« Le développement est perçu comme une exigence, un besoin naturel [...]. Toute ville, grande ou petite, mais aussi bourg, village ou hameau doit se développer : c'est son oxygène » (Cluzet, 2007, p26). Ainsi, un parallèle peut être fait entre le développement des espaces urbanisés comme lieu de vie des hommes et la croissance des éléments naturels*. La figure 32 illustre le processus d'assimilation (cf. chapitre 1 paragraphe 1.3) entre les formes naturelles et les formes anthropisées.

De même, F. Olivier (2002) explique que la ville est semblable à un être humain, elle se développe de manière autonome et organique. Perret (2006, p.140) compare l'évolution de la ville à l'orientation de limailles de fer dépendant d'un champ magnétique (force) : « les copeaux [les éléments de la ville] de fer s'orientent différemment en fonction de la forme des champs magnétiques présents ». Ainsi, « la ville se rénove, se régénère et refait sur elle-même, depuis ses origines » (Coudroy de Lille, 1998).

Par opposition aux
éléments
artificiels.



a) Croissance de la ville de Nice (Bailly, 1999)



b) Croissance d'un corail Seriatoporas
(<http://mars.reefkeepers.net/Articles/Corail/Seriatopora.html>)

Figure 32 : La croissance : association entre les formes naturelles et anthropiques (Sevenet, 2013).

Pourtant, il existe une hystérésis, autrement dit un décalage dans le temps et dans l'espace entre la force et la forme qui en résultent de par ses propriétés d'inertie. Ce décalage naît de l'inégale vitesse entre l'évolution morphologique (changement de forme) par rapport aux contenus socio-économiques (forces). Par conséquent, les formes urbaines sont fortement

rémanentes, elles survivent longtemps après que les conditions de leur production aient disparu (Allain, 2004).

1.3.1. La verticalité et/ou la densité ?

Le dialogue entre forces et formes dans les espaces urbains produit une dynamique à double dimension, verticale et horizontale, qui s'inscrit dans un espace en trois dimensions.

Dans le chapitre 1, nous avons développé le concept de **prégnance** (Thom, 1999). Les réactions provoquées par une forme se caractérisent par une attraction ou une répulsion permanente. Pour Gracq (1985, p.5), « il n'existe nulle coïncidence entre le plan d'une ville dont nous consultons le dépliant et l'image mentale qui surgit en nous, à l'appel de son nom, du sédiment déposé dans la mémoire par nos vagabondages quotidiens ». La ville est, le plus souvent, assimilée au désordre voire au chaos. Dans la science-fiction, cette image est parfois associée à la verticalité (Metropolis, Blade Runner, Batman, Total Recall *etc.*).

En effet, comme le note Fouchier (1994), la **représentation** de la **ville future** dans les films, les romans ou encore les bandes dessinées est celle d'une **ville verticale**, dépeinte par des gratte-ciels qui s'élèvent à l'infini (figure 33). Cette densité exagérée est souvent associée à la **dégradation de la qualité de vie** par la dégradation de l'environnement et par l'accentuation des divisions sociales.



Figure 33 : NewYork (Sevenet, 2013).

La ville verticale fait peur, elle est associée à l'anthropisation et la disparition de toute vie naturelle et pourtant elle apparaît comme une fatalité ou une réponse à l'explosion démographique. Le dialogue entre forces et formes conduit inévitablement à la production d'un volume urbain. Toutefois, il ne faut pas confondre verticalité et densité ou compacité.

La prégnance développée au début de ce paragraphe et appliquée aux villes est associée à la densité et souvent à la surconcentration des hommes et des activités : elle « est accusée de vider le pays de sa substance au profit d'un seul ou de quelques lieux où les vices prolifèrent » (Le Bras, 1995). Pourtant, cette idée (image) est relativement récente, au cours **des siècles passés**, la **densité** renvoie plutôt à la **sécurité** (enceinte), à la **sociabilité** (proximité sociale) et à la **rentabilité**.

Le sens de la vie change, d'un monde horizontal nous sommes passés à un mode vertical...
 Tout a commencé par l'habitat. Les gens ont d'abord vécu les uns à côté des autres, dans des grottes, des tentes, des caravanes ou des châteaux. Puis vint la période où les gens ont habité à la verticale...
 On vit les mêmes choses aux mêmes endroits pour un prix au mètre carré qui varie du moins cher au plus cher, selon l'étage dont on a hérité. D'où l'expression les « prix grimpent »...
 Bien que la tendance change depuis le 11 septembre, l'étage coïncide avec la position hiérarchique dans les immeubles de bureaux...
 Maintenant on est enterré à la verticale.
 Les champs agrémentés de buis, de cyprès à l'intention de nos chers disparus se faisant rares, les sépultures contemporaines sont des murs agrémentés de niches pour recevoir les urnes.
 C'est une question de surface utile...
 Se mettre à la verticale c'est un acte dynamique, c'est répondre à l'appel de l'action « debout les gars ».

Double je
 Source : [4]

Le Bras (1995) a testé l'hypothèse que « pour un écosystème, et même pour toute la biosphère, il existerait des seuils critiques de population, à ne pas dépasser sous peine de compromettre la survie ultérieure ». Il a ainsi recherché les **effets néfastes** de la **densité** sur les **comportements sociaux**, pas simplement au niveau de l'individu mais également à d'autres échelles. Ainsi, il a voulu mettre en évidence des corrélations entre la densité et d'autres variables socio-économiques (le revenu par habitant, l'espérance de vie, l'Indice de Développement Humain (IDH), les libertés – indice de C. Humana, la croissance économique) au niveau national.

Les **résultats** sont presque tous **non significatifs** car la société humaine s'adapte à son milieu surtout sur de longues périodes comme celle de la densité. Au niveau départemental, l'auteur ne note pas de relation majeure entre la densité de population et les autres variables socio-économiques, sauf bien sûr pour les variables qui sont liées à l'urbanisation, fonction directe de la densité.

Il faut noter, en critique de cette étude, que la densité agit principalement sur les relations de voisinage et sur la sociabilité, donc à une échelle micro. De plus, elle s'appuie uniquement sur la densité de population, pourtant l'impression de surconcentration et de verticalité, la prégnance, est causée également par la verticalité des formes urbaines.

Vincent Fouchier et le Dr K.S. Pun (Fouchier et Merlin, 1994) ont également insisté sur le fait de ne pas confondre densité, verticalité et surpeuplement.

La **densité** ne se traduit pas toujours spatialement par la **verticalité** mais par la **concentration**. En effet, la concentration de l'emploi est souvent utilisée pour définir les pôles, par exemple la densité d'emplois par rapport à la distance au centre (Thériault et Des Rosiers, 2008a, cf. chapitre 1).

La **densité** est la **première caractéristique de la ville** ; « densité d'habitants mais aussi toutes les autres réalités matérielles (bâti, objets mobiles) et immatérielles (information, communication, culture) » (Lévy et Lussault, 2003, p.988). La densité est donc indissociablement liée à la verticalité.

L'absence du concept de densité dans les travaux théoriques, notamment ceux sur la forme et le développement des villes, a une incidence sur l'analyse urbaine. « Les modèles mathématiques néo-classiques* de la rente foncière et du développement urbain des années 1960 font certes intervenir la densité, mais comme l'inverse de la taille de la parcelle, donc dans une approche très dépendante des formes de la sub-urbanisation habituelle aux Etats-Unis » (Fouchier et Merlin, 1994).

Lors du colloque « Les fortes densités urbaines : une solution pour nos villes ? » (Fouchier et Merlin, 1994), le Dr K.S. Pun dresse un premier bilan des avantages et des inconvénients de la densité, résumés dans le tableau ci-dessous.

Certains d'entre eux seront présentés dans la sous partie suivante.

Avantages	Inconvénients
Optimisation de l'usage du sol	Contacts sociaux non désirés
Usage maximal des infrastructures	Insuffisance de certains équipements
Consommation minimale de l'espace rural	Mixité fonctionnelle parfois incompatible
Réduction des distances grâce à l'augmentation des vitesses de transport	Paysage urbain souvent oppressant
Utilisation efficace des systèmes de transport,	
Vie sociale plus riche	

Tableau 3 : Densité - avantages ou inconvénients?
(d'après K.S. Pun cité par Fouchier et Merlin, 1994).

D'après la définition donnée dans le paragraphe précédent, l'apport de la troisième dimension pour comprendre et analyser l'espace urbain semble évident pour caractériser les formes intra-urbaines ; mais il l'est moins pour la forme urbaine. En effet, la délimitation de l'espace urbain par rapport au non urbain est matérialisable par une ligne en deux dimensions alors que les formes intra-urbaines sont caractérisées par leur hauteur. « La ville entité spatiale **discrète**, caractérisée par des modalités particulières de vie commune, par une idéologie territoriale, largement tributaire des modèles architecturaux mis en place au début de l'époque moderne, par **une culture de la limite**, par une opposition franche à son « opposant », c'est-à-dire la campagne, disparaît peu à peu – et d'ailleurs la campagne avec elle. » (Lévy et Lussault, 2003, p.949).

Néanmoins, à l'examen des méthodes de caractérisation du contour urbain, il semble que la verticalité de la ville tienne une place importante. En effet, lorsque J. Beaujeu-Garnier (1995) décrit la ville comme un ensemble morphologique, physionomique, social et culturel différencié, fonctionnellement intégré dans un réseau hiérarchisé, elle propose également de rassembler différents critères servant de repères (verticaux) pour la délimiter (contiguïté du bâti, densité de population, type d'occupation du sol, *etc.*).

Parallèlement, M. Roncayolo (1990) explique que les anciennes limites sont observables en premier sur un plan et elles permettent donc d'étudier les différentes formes que la ville a pu prendre tout au long de sa croissance. Ainsi, déterminer les différentes limites historiques de la ville permettrait de détecter les discontinuités des formes intra-urbaines.

Bien qu'étant une caractéristique des formes intra-urbaines, la verticalité n'est que peu prise en compte dans les études urbaines, même si aujourd'hui, quelques analyses émergent avec le développement des données tridimensionnelles et des outils plus performants (Weber, 2001, Maignant, 2002, Robert 2009). Néanmoins, quelques études ont utilisé la volumétrie impliquant plus ou moins indirectement la variable hauteur. En effet J. Beaujeu-Garnier (1994) a montré la relation entre le prix du foncier et la hauteur du bâti. Cette analyse est pourtant marginale car la hauteur du bâti est le plus souvent mise en relation avec les densités de population.

1.3.2. Interaction de la forme urbaine avec son environnement

L'environnement est ici entendu comme ce qui entoure, c'est-à-dire le voisinage. Dans le dialogue des forces et des formes urbaines, nous avons surtout évoqué des résultats que les forces produisent sur la forme urbaine et intra-urbaine, sa croissance horizontale et verticale. Pourtant, la **forme urbaine rétroagit aussi sur les processus qui l'ont engendrée**. En effet, agir sur la forme urbaine, c'est modifier le paysage urbain, et influencer les conditions et la qualité de vie quotidienne. La figure 34 résume les principales interactions des formes urbaines avec et sur ce qui l'entoure.

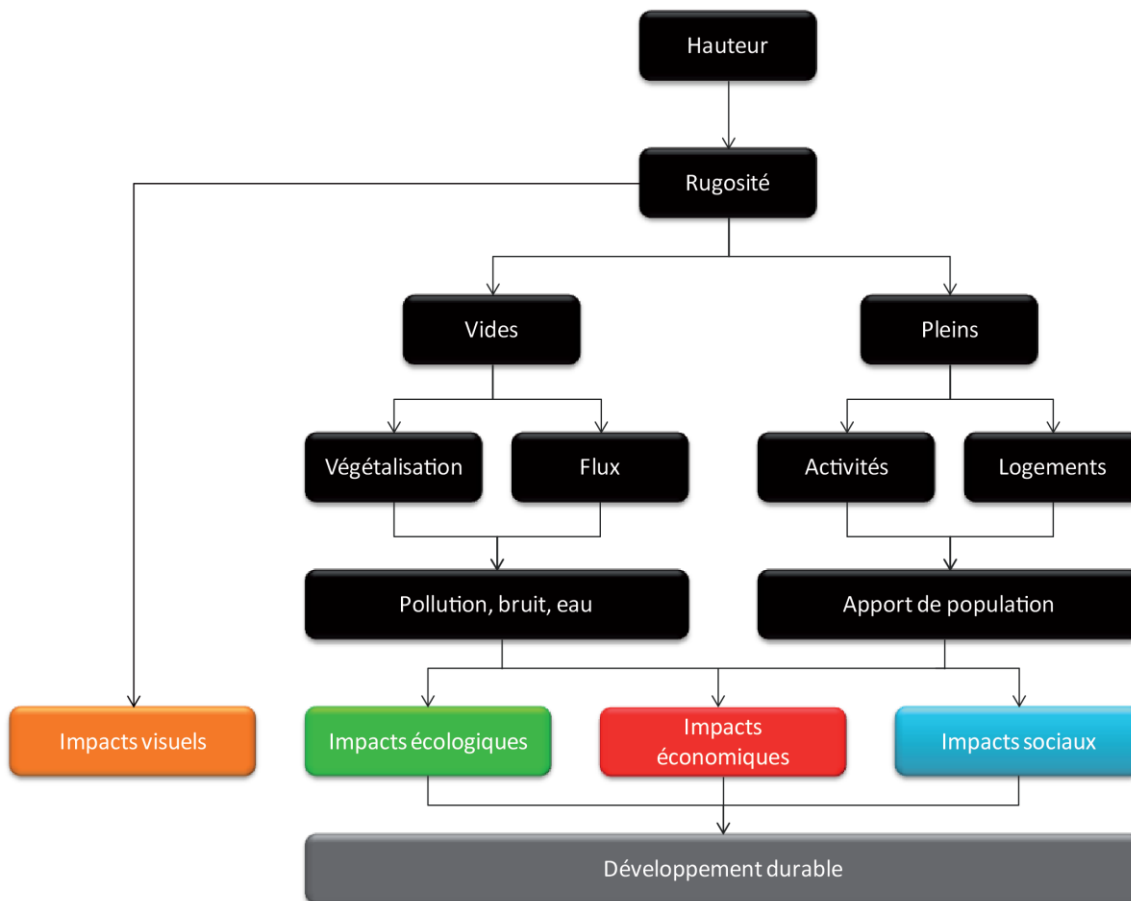


Figure 34 : De la forme urbaine au développement durable (Sevenet, 2013).

L'**espace vécu** est constitué par des **formes intra-urbaines** de divers volumes qui confèrent aux lieux une certaine **ambiance** émanant de l'interaction des lumières, des sons, des matières, des volumes. Par exemple, dans un contexte de forte pollution liée à l'industrialisation, les hygiénistes ont notamment pensé les formes intra-urbaines afin de faciliter la circulation de l'air. L'agencement de volumes différents et de vide est un moyen de produire des ambiances urbaines très différenciées. Par exemple, la rue canyon, caractérisée par une rue étroite entourée de bâtiments élevés et contigus, ne laisse pas circuler l'air et facilite la réflexion du bruit.

Les **formes intra-urbaines** sont contenues dans un système plus global, elles agissent sur les **ambiances urbaines** liées aux vides urbains :

- le bruit mesuré par les décibels est fonction de l'étroitesse entre deux murs, donc du gabarit de la rue et de la texture des murs. En effet, certaines textures absorbent et d'autres renvoient le bruit ;
- la lumière mesurée par le rayonnement est également liée à l'étroitesse des rues, mais aussi à la couleur des murs : plus les murs sont foncés plus ils absorbent la lumière ;
- la qualité de l'air (le taux de polluants) est encore liée à l'étroitesse de la rue et à la présence d'émetteurs de polluants tels que l'automobile.

Un espace dégradé ne tarde pas à devenir répulsif, sa valeur diminue et l'espace se paupérise

et se dégrade davantage. Ainsi, la forme urbaine participe à la **différenciation de l'espace** urbain qui entraîne des disparités sociales. Nous avons déjà brièvement évoqué, dans le chapitre 1, le lien entre organisation et différenciation spatiale. **Jusqu'au XIX^{ème} siècle**, l'organisation et la **différenciation sociale** s'inscrivaient **verticalement** (ségrégation sociale verticale). Les populations les plus aisées occupaient les premiers étages des habitations tandis que les populations les plus défavorisées vivaient sous les toits (Béaur, 1999). De même, en Grèce, les changements culturels de la société ont inversé cette organisation spatiale vertical : les appartements situés au rez-de-chaussée sont moins recherchés que ceux du dernier étage, il en résulte une ségrégation sociale entre les étages (Sintés, 2002, Maloutas, 2006).

Lorsque Haussmann a souhaité assainir la ville de Paris, cela a conduit à un phénomène de ségrégation sociale horizontale. En effet, les formes urbaines produites ont conduit à une augmentation de la valeur des quartiers réhabilités et ainsi les populations les moins aisées ont été reléguées en périphérie. Aujourd'hui, cette différenciation verticale est moins marquée mais existe toujours. Cependant, les changements culturels de la société ont inversé l'organisation spatiale : les logements situés en hauteur sont plus recherchés que les autres. F. Olivier (2002) et S. Robert (2009) ont démontré que la sélection du logement dépend de certaines variables de qualité de vie, telles que la vue ou l'ensoleillement. Ainsi le choix résidentiel résulte de caractéristiques reflétant les besoins actuels (qualité de vie, vue, éloignement par rapport à la pollution de la rue, *etc.*).

De même, cette différenciation est imprimée dans l'imaginaire collectif. En effet, la ville de la science-fiction fait l'objet d'une division sociale verticale. Cette opposition ville haute/ ville basse se retrouve dans un grand nombre de films (Metropolis, Blade Runner, Demolition Man, Total Recall *etc.*): en haut les riches et les maîtres de la cité, en bas les pauvres et les esclaves*.

Dans Metropolis, les jardins où les fils des maîtres jouent, sont tout en haut de la ville alors que la cité des travailleurs est profondément enfouie. Cela paraît aller de soi, tant nous avons coutume de lier la domination sociale à la position élevée.

Dans Blade Runner, une gigantesque pyramide Aztèque domine la cité: c'est la demeure de Tyrell, l'homme le plus important de la ville. À l'opposé, en bas, une faune cosmopolite vit dans le bruit et la saleté.

Dans Demolition Man, la Résistance se cache sous terre et espionne avec des périscopes ce qui se passe en haut.

La cité hypertrophiée du Cinquième Élément est également organisée verticalement : les embouteillages ont lieu dans les hauteurs et le bas de la ville semble désert. Mais la division sociale est moins nette que dans les films précédents.

Source : [6]

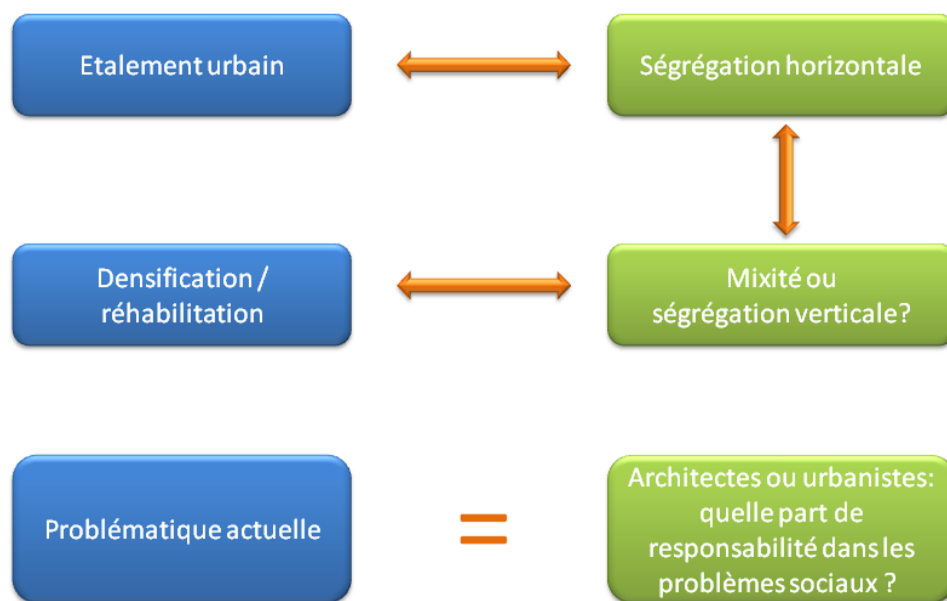


Figure 35 : Densité et ségrégation (Sevenet, 2013).

Par conséquent, les orientations urbanistiques actuelles (déballuées dans le chapitre suivant) doivent s'interroger sur les processus urbains et les formes tridimensionnelles qui lui sont associées (figure 35).

- La volonté politique de restructurer la ville sur la ville pour limiter l'étalement tout en proposant une mixité des fonctions et des logements ne va-t-elle pas entraîner une ségrégation verticale ? La diversité est inhérente à notre société : comment la répartir dans l'espace ? La ségrégation verticale ne serait-elle pas une forme durable ?
- De plus, le regain d'intérêt pour les centres urbains n'a-t-il pas attiré une partie de la population qui recherche l'accessibilité et une qualité de vie tout en excluant une autre ?

2. Evaluation et mesure de la forme urbaine

L'appréciation de la forme urbaine procède d'une part, de mesures plus ou moins sophistiquées à partir de données quantitatives mais également qualitatives, et d'autre part, des perceptions des individus, de leurs impressions et leurs ressentis. Ainsi, la densité, mesure standard de toute distribution spatiale recèle une dimension objective donnée par le rapport d'un nombre d'objets à une surface définie et une dimension subjective qui dépend de la situation personnelle des individus et du contexte géographique. Nous nous focaliserons sur la dimension objective de la forme urbaine.

2.1. *Densité et compacité*

2.1.1. Quelles densités ?

La densité est une notion particulièrement utilisée en géographie, aménagement et urbanisme. Une densité physique est le rapport entre la masse volumique d'un corps et celle d'un autre corps pris comme référence. Au sein des disciplines citées précédemment, la densité s'évalue par le rapport entre un élément quantifiable (une quantité ou un indicateur statistique) et la surface qu'il occupe à partir d'un espace de référence (Fouchier et Merlin, 1994, IAURIF, 2005c). En conséquence, les éléments quantifiés et les unités de surfaces mobilisées peuvent être très variables. Ainsi, parler de « forte ou de faible densité » sans préciser sa référence conduit souvent à des incompréhensions entre les différents acteurs de l'aménagement et de l'urbanisme.

Tout d'abord, la densité fait appel à des **éléments quantifiables différents** tels que la population, le bâti ou le logement. Plusieurs densités traduisent l'intensité des présences humaines et sont très souvent utilisées:

- la densité (INSEE), ou **densité de population** correspond au nombre de personnes domiciliées dans un espace donné. La densité d'activités qui s'ajoute à la population résidente est utile pour définir la politique de transport (Piron, 2003) ;
- à ces densités immatérielles s'ajoutent des densités matérielles qui font appel à des éléments physiques de la ville tels que le sol et ses divers types d'occupation. Par exemple, la **densité bâtie** est le rapport entre l'emprise au sol multipliée par la hauteur moyenne et la surface de l'îlot. Le calcul de la densité bâtie se rapporte au réel et non au possible ;
- dans de nombreuses études, la **densité résidentielle** (nombre de logements par ha) est utilisée dans la mesure où elle permet de définir des seuils pour les besoins en équipements ;

En outre, le calcul de densité s'appuie sur des **référentiels spatiaux différents** : des découpages administratifs ou statistiques (parcelle, îlot, iris, quartier ou surface métrique

telles que m², ha, km², etc.). La différence entre la densité nette et la densité brute vient du choix de la surface de référence choisie.

- La **densité nette** prend en compte les surfaces des parcelles réellement occupées par l'affectation donnée (bâtiments, espaces libres, voies de desserte interne).
- La **densité brute** prend en compte l'ensemble du territoire considéré sans exclusion (équipements collectifs, espaces verts, voirie principale et infrastructures).

Pourtant un consensus existe grâce au **Coefficient d'Occupation du Sol**, il constitue l'indicateur le plus utilisé par les professionnels de la construction. Il est une référence au plan d'urbanisme (POS ou PLU) et permet de définir un « droit à bâtir » sur une parcelle. Cependant ce n'est pas le seul moyen de maîtriser la forme urbaine et le COS est complété par d'autres règles : la hauteur limite, le rapport bâtiment/rue, bâtiment/bâtiment.

Pour l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de l'Ile de France (IAU), la densité bâtie est celle qui caractérise le mieux la forme intra-urbaine (IAURIF, 2005b). Elle a été calculée pour les formes intra-urbaines caractéristiques (figure 36). Mais la densité bâtie apparaît comme insuffisante pour identifier les formes intra-urbaines, car ces dernières ne conditionnent pas la densité d'un espace ; les rapports entre surfaces bâties et surfaces libres, la qualité des espaces publics et des bâtiments participent également à l'ambiance urbaine.

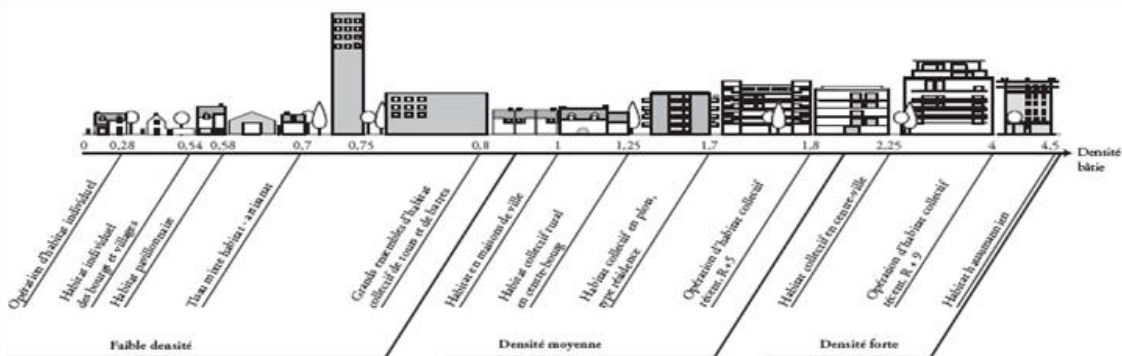


Figure 36 : Densités comparées des formes urbaines (IAURIF, 2005b).

La densité caractérise un aspect d'une distribution spatiale intra-urbaine mais ne peut caractériser une forme ou une configuration spatiale. En effet, la densité est une mesure comptable élémentaire qui appréhende toute distribution en se préoccupant du nombre et non de la disposition des éléments étudiés dans l'espace, ni de leur proximité.

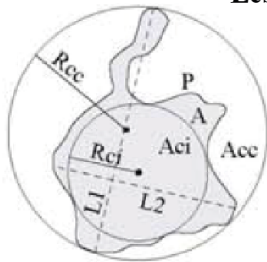
2.1.2. Les indices de compacité

Ces indices évaluent la forme urbaine en tenant compte de la compacité* de l'ensemble du bâti d'une ville. Ils se réfèrent à la compacité et/ou à la dispersion de la surface urbanisée. Néanmoins, ils ne tiennent pas compte de l'hétérogénéité intra-urbaine. Des illustrations des types de compacité sont présentées figure 38.

M. Guérois (2003) propose d'aborder la compacité de la forme urbaine par une double composante : l'emprise spatiale absolue et relative, autrement dit les superficies bâties et les densités moyennes de population, et la configuration morphologique. Cette deuxième composante s'appuie sur la forme la plus compacte : le cercle, puis la combinaison de plusieurs indicateurs permet de se rapprocher de la tâche urbaine la plus complexe. Les formes sont ensuite triées par classification hiérarchique ascendante. Il en existe cinq types, des plus allongés, digités, indentés *etc.* vers la configuration la plus circulaire (figure 37).

La ville dite compacte possède une multitude de définitions, mais en général, elle correspond à une densité relativement élevée, à une mixité fonctionnelle basée sur un système de transport public efficace et des modes doux tel que la marche et le vélo (Brton, 2000).

Les principaux paramètres de forme utilisés :



- l'aire de la figure (A), le périmètre (P),
- la longueur du plus grand axe (L1),
- la longueur du plus grand axe perpendiculaire à L1 (L2),
- le rayon du cercle circonscrit (Rcc),
- le rayon du cercle inscrit (Rci) et le nombre d'axes de digitation (D) (quand la distance minimale séparant son extrémité du cercle inscrit est supérieur au rayon du cercle).

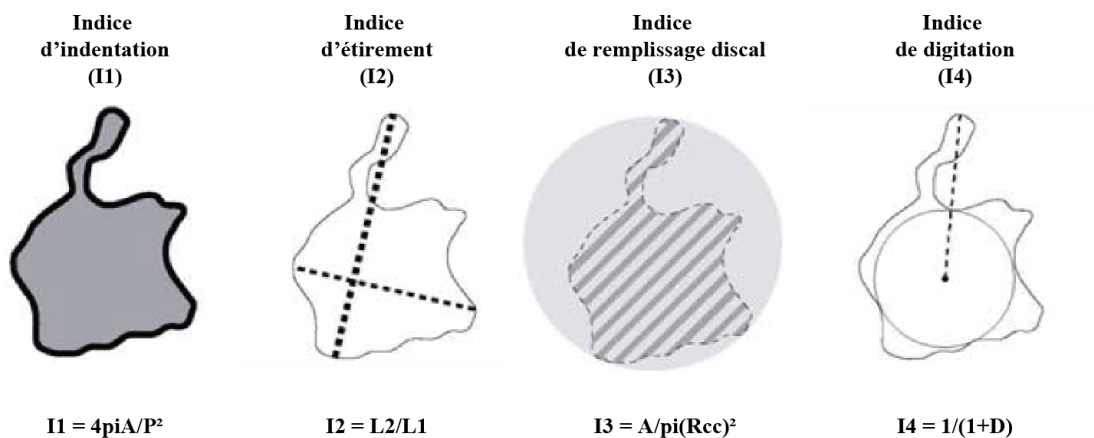


Figure 37 : Indices de forme caractérisant la configuration des tâches urbaines (Guérois, 2003).

La comparaison des résultats permet de voir dans quelle mesure ces dimensions se recoupent, sont complémentaires, ou se nuancent l'une l'autre. Grâce à son travail, M. Guérois (2003) a démontré une absence de concordance entre les deux classements issus du calcul des indicateurs. En outre, cette analyse a également montré que les deux démarches s'enrichissent l'une et l'autre.

Il faut différencier les notions de densité et de compacité. La densité est plus ou moins élevée selon le nombre d'habitants et le nombre de fonctions qu'il y a sur chaque unité de surface

effectivement urbanisée, il n'y a donc pas de lien direct avec la forme urbaine. En revanche, la compacité est un attribut de la forme.

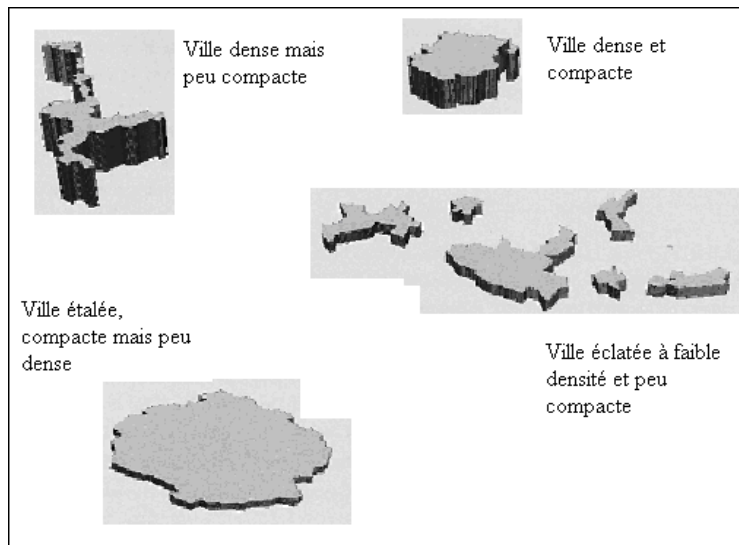


Figure 38 : La compacité dans les formes urbaines (Fusco, 2003).

Le premier indice de compacité a été développé par A. **Salveti** au début des années 80. Ce dernier souhaitait prendre en compte l'effet de la forme de la structure urbaine, indépendamment de sa densité.

Cette mesure de compacité s'appuie sur la **distance standard** définie par R. Bachi, utilisée en France pour l'analyse des formes urbaines par Cauvin et Rimbart en 1976 (Fusco, 2003). A partir de la distribution de la surface urbanisée, d_{ij} représente la distance entre deux de ces points, dont la somme est égale à N . La distance standard D est définie comme la distance quadratique d_{ij}^2 entre l'ensemble des N points de la ville.

$$D = \sqrt{\frac{\sum_{ij} d_{ij}^2}{N^2}} = 2\sqrt{\frac{\sum_i d_{ic}^2}{N}}$$

Équation 1 : la distance standard définie par R. Bachi (Fusco, 2003).

La distance standard peut être calculée à partir du **barycentre** de la distribution des points. Si C est le barycentre de la distribution de la surface urbanisée et d_{ic} la distance de chaque point i au barycentre C , la distance standard est la somme des distances de chaque point au barycentre (figure 39).

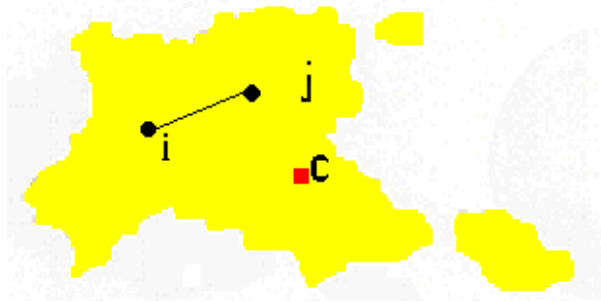


Figure 39 : Exemple d'une surface urbanisée et de son barycentre (Fusco, 2003).

A partir de la distance standard, Fusco (2003) a souhaité développer un **indicateur de dispersion/compacité**. Sachant que la forme géométrique la plus compacte est celle pour laquelle la distance standard entre l'ensemble de ses points est la plus petite, c'est-à-dire un cercle, alors la distance standard est égale à son rayon ($D_c = r$).

Ainsi l'indice de dispersion se base sur la distribution de la surface urbanisée. Tout d'abord, il calcule la distance standard puis le cercle de surface équivalente à la surface urbanisée (figure 40). L'indice fait le rapport entre la distance standard de la surface urbanisée réelle et la distance standard du cercle.

$$\text{Indice de dispersion} = D/D_c = D/r$$



Figure 40 : Normalisation de la distance standard D , mesurée pour la surface urbanisée réelle, par le biais du rayon r du cercle de surface équivalente (Fusco, 2003).

L'intérêt de cet indice est qu'il est plus précis que ceux cités auparavant. Cependant, s'il donne une idée sur le contour de la ville, il n'en donne pas sur la densité du bâti.

Tous ces indices permettent d'obtenir une forme simplifiée que n'importe quel individu peut identifier et comprendre. Mais la ville est plus complexe, et pour se rapprocher de la réalité, il manque à la fois l'évaluation de la forme intra-urbaine et de l'irrégularité du contour de la ville.

2.1.3. Intégrer la verticalité

Il y a encore moins d'une vingtaine d'années, les variables utilisées intégrant indirectement la verticalité étaient la densité de population et le prix du sol. Il est évident que plus la masse de population est importante sur une unité de surface, plus l'artificialisation de l'espace l'est également. Quand une ville connaît des densités de 900 habitants au km² (Paris), la verticalité domine. Parallèlement, plus le prix du sol est élevé, plus il faut le rentabiliser et donc construire en hauteur.

J. Beaujeu-Garnier souligne le rapport qui existe entre les *Central Business District* et les gratte-ciel où le prix du foncier est le plus élevé. Deux indicateurs permettent de détecter cette forme spatiale :

- W. Olson (Beaujeu-Garnier, 1994) a développé le ***Rent Shop Index*** s'appuyant sur l'exemple de Stockholm. Il utilise un indicateur calculé à partir du loyer total payé par les locataires d'un immeuble (boutiques, commerces, restaurants...) divisé par la longueur de la façade. Le manque de données rend cet indicateur difficilement reproductible, très spécialisé, et limité pour la mesure de la verticalité.
- Murphy et Vance (Beaujeu-Garnier, 1994) ont proposé le ***Central Business Index*** qui prend en compte l'accumulation d'activités typiques du centre des affaires. Autour de l'intersection de rues représentant la plus haute valeur foncière, l'enquête se fait par bloc sur chaque immeuble et recense la surface totale occupée par ses activités caractéristiques. Le recensement est fait étage par étage dans chaque immeuble. Il aboutit à trois cartes : une de la chaussée, une du premier étage, une pour les constructions comprenant des activités typiques au-delà de trois étages (les services). Deux ratios sont produits par cette enquête :
 - le *Central Business Height Index* c'est-à-dire le nombre d'étages d'activités caractéristiques par rapport à la surface du bloc.
 - le *Central Business Intensity Index* ou le pourcentage de l'espace total utilisé aux différents étages par les activités du *Central Business District* divisé par la surface totale de l'ensemble des étages du bloc.

Plus récemment, dans son étude sur la relation entre la forme urbaine et la répartition des polluants, Weber (2001) et l'équipe du laboratoire Image et Ville ont développé l'indice de visibilité. Leur hypothèse principale est que les formes intra-urbaines ont un impact sur la répartition et la diffusion des polluants. Ainsi l'influence des formes urbaines est analysée en fonction de diverses caractéristiques du bâti : la rugosité ou la compacité, l'occupation et l'utilisation du sol, autrement dit l'ouverture ou la compacité.

La méthode s'appuie sur plusieurs indicateurs de formes :

- le pourcentage de bâti dans un secteur de rayon défini (figure a) ;
- la distance par rapport au premier bâtiment dans une direction fixée (figure b) ;
- le secteur de visibilité dans une direction donnée (figure c) ;
- la surface ou le volume de visibilité en 2 ou 3 dimensions avec un rayon défini (figure d) ;
- l'indice de circularité de la surface ou l'indice de Miller (figure e) ;
- l'indice d'étalement de la surface ou l'indice de Morton (figure f) ;
- l'indice de compacité de la surface ou l'indice de Gravélius (figure g) ;

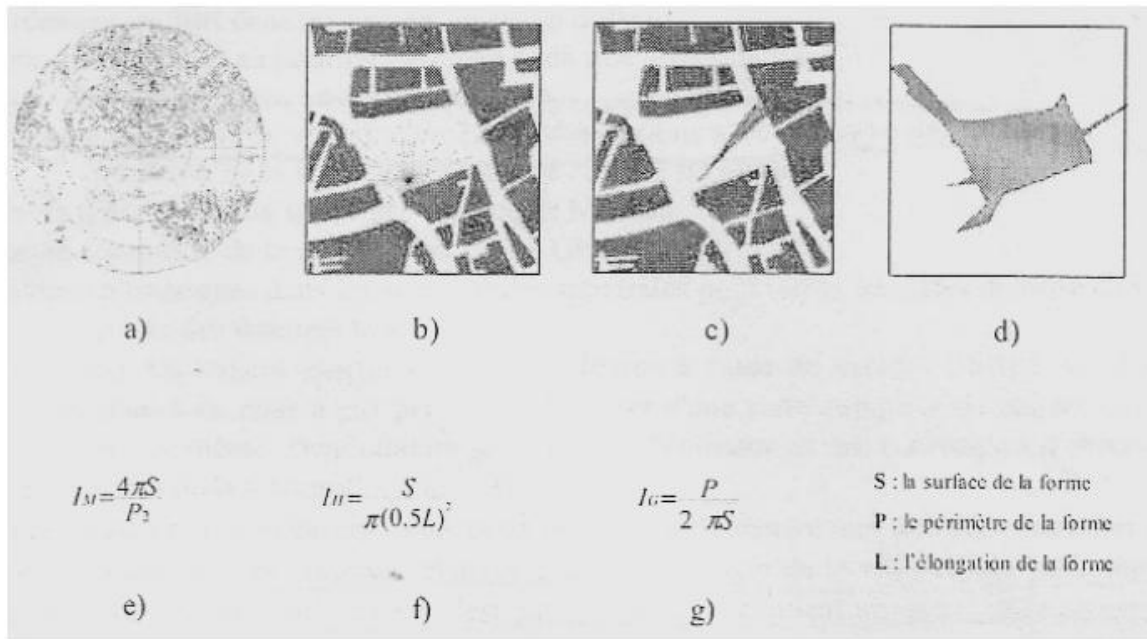


Figure 41 : Indicateurs renseignant sur la morphologie du site (Weber, 2001).

Ces indices sont innovants car ils prennent en compte la hauteur des bâtiments. Cependant, à l'inverse des indices sur la compacité, ils ne traitent de la forme qu'à une micro-échelle.

Maignant (2002) utilise l'indice de Landsberg (L) développé par le Centre de Recherche Scientifique du Bâtiment. Cet indice est un rapport entre la largeur de la rue (l) et la hauteur du bâti (h).

$$L = h / l$$

Équation 2 : Indice de Landsberg (CSTB cité par Maignant, 2002).

L'interprétation de cet indice est la suivante : une rue est dite large quand l'indice est inférieur à 1, en d'autres termes quand la largeur de la rue est supérieure à la hauteur des bâtiments. Une rue est étroite quand l'indice est très supérieur à 1, elle est appelée « rue canyon » si elle est très étroite, par exemple une rue d'un centre historique médiéval (Maignant, 2002). Cet

indicateur permet d'évaluer simplement la morphologie des vides sur tout l'espace urbain mais il exclut les pleins.

Récemment, Carneiro et *Alii* (2009) proposent des indicateurs morphologiques de la morphologie urbaine dans ces trois dimensions (figure 42). Ils utilisent quelques indicateurs présentés ci-dessus tels que l'orientation, l'élongation et la surface et de nouveaux indicateurs morphologiques basés sur des données tridimensionnelles issues du procédé LIDAR (cf. chapitre 4) :

- La complexité 2D : c'est-à-dire le nombre de points composant la forme de chaque surface.
- La complexité 3D : c'est-à-dire le nombre de surfaces planes composant le volume.
- Le volume 3D approché qui se calcule grâce à la multiplication de la surface et de la hauteur.
- Le volume 3D exact issu du volume des points géoréférencés en 3D des bâtiments.
- Le type de toit et la moyenne de leur pente.

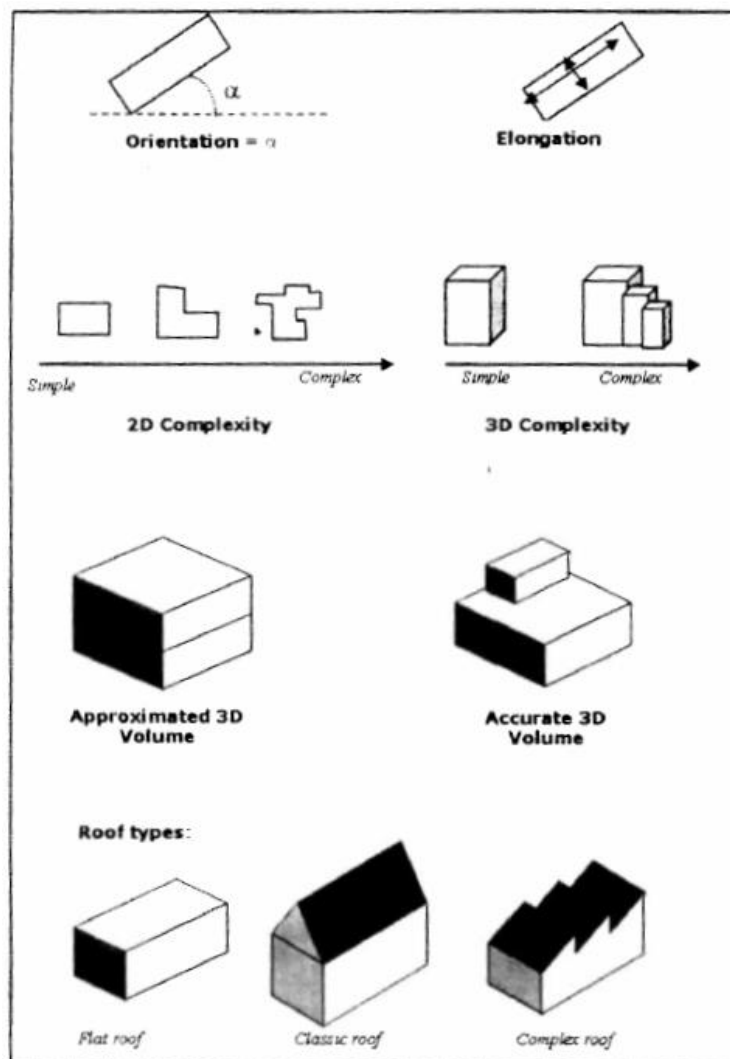


Figure 42 : Indicateurs morphologiques des bâtiments (Carneiro et *Alii*, 2009).

Compte tenu des données à notre disposition, les indicateurs suivants sont utilisés dans le chapitre 5 : complexité 2D et 3D ainsi que le volume 3D approché.

2.2. Les modèles urbains : la géométrie au service de la géographie

2.2.1. Les premiers modèles morphologiques urbains

La géographie actuelle utilise largement les mathématiques pour décrire les formes urbaines et construire les modèles classiques. Ceux-ci ont été créés dans l'optique de simplifier la ville afin de la comprendre. Ils ont donc utilisé la géométrie euclidienne et des formes telles que le cercle, le triangle ou le carré et ont ainsi privilégié des formes simples et des structures régulières comme ceux de Von Thünen, d'A. Weber ou ceux de l'écologie urbaine et de la nouvelle économie urbaine. La complexité des formes urbaines s'est révélée au fur et à mesure de l'enrichissement des analyses.

Ces modèles ont été créés à partir de l'observation des villes Nord-Américaines ainsi que sur les méthodes et les concepts des sciences de la nature (l'écologie). Ils représentent deux idées principales : les groupes sociaux sont en compétition pour l'occupation des sols et la représentation spatiale.

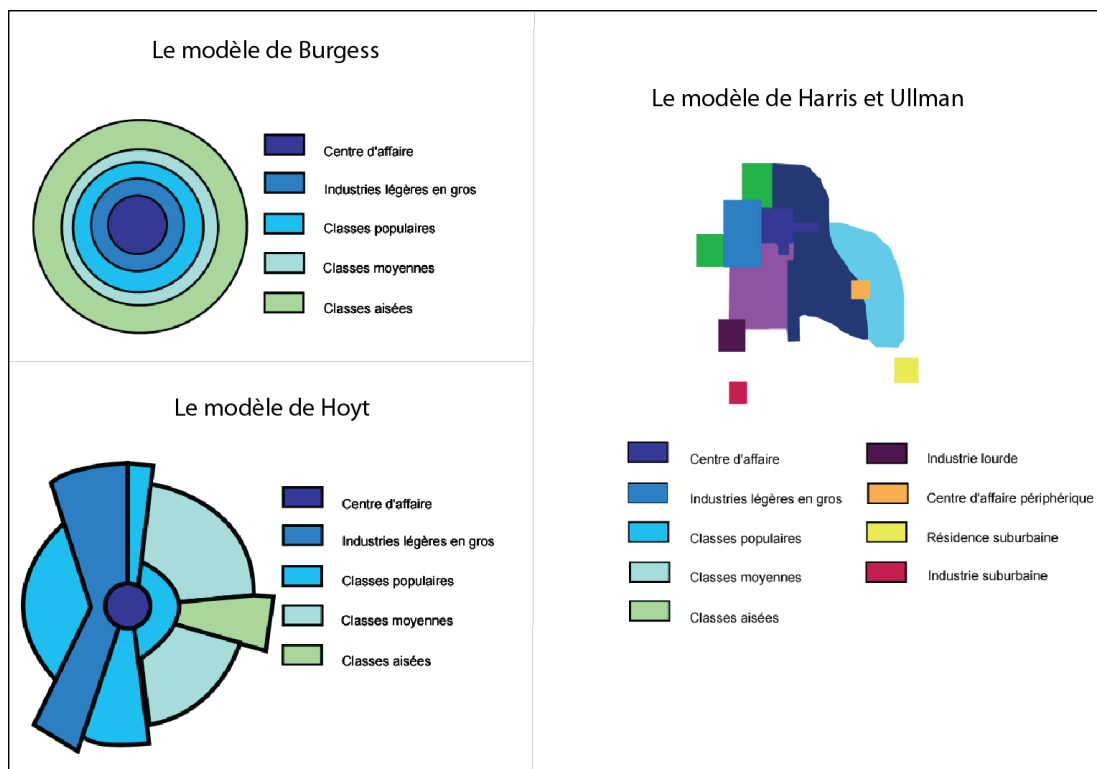


Figure 43 : Les modèles d'écologie urbaine (d'après Paulet, 2000).

Trois grands modèles symbolisent cette réflexion :

- La **ville concentrique de Burgess** est constituée au centre du *CBD*. Il est entouré d'une zone à forte densité composée d'immigrants récents et de minorités ethniques. Ensuite, des zones résidentielles habitées par une population de plus en plus aisée apparaissent. Cette organisation montre le processus d'ascension sociale et la mobilité sociale du centre vers la périphérie qui lui est associée.
- La **ville sectorielle de Hoyt** introduit l'accessibilité liée aux axes de transports dans le modèle. La réduction de la distance-temps produit deux conséquences : la croissance urbaine s'effectue en premier le long des axes et les citadins ont la possibilité de s'installer plus loin du centre-ville sans pour autant mettre plus de temps pour le rejoindre. Pareillement au modèle de Burgess, Hoyt attribue une spécialisation aux secteurs issus des axes structurants.
- La **ville polycentrique de Harris et Ullman** est caractérisée par l'apparition de plusieurs centres attractifs. La compétition spatiale, le développement de nouvelles activités et les externalités négatives liées aux organisations spatiales précédentes ont créé une nouvelle sectorisation. Ce modèle montre le regroupement spatial des activités similaires ou compatibles et l'exclusion des moins favorisées vers la périphérie.

Au-delà de l'apport à la connaissance et à la compréhension de l'espace urbain, ces modèles présentent le résultat du dialogue entre forces et formes, le lien entre la forme de la ville et les processus qui s'y déroulent. En outre, ces modèles traduisent indirectement le lien entre la fonctionnalité de l'espace urbain et les formes intra-urbaines associées.

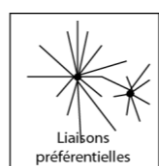
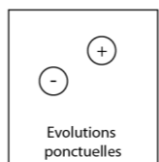
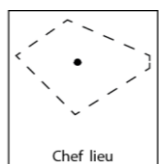
Dans le chapitre 1, nous avons évoqué l'apport d'un couplage des représentations 2D telles qu'illustrées figure 43, et d'une représentation du profil des villes telle que sur la figure 12. La modélisation des trois dimensions permet de rendre compte des forces, de la valeur et des formes ayant cours au sein de l'espace urbain.

2.2.2. La filiation entre forme urbaine et forme du vivant par la géométrie fractale

La géométrie euclidienne a largement dominé la modélisation en géographie. Par exemple, la modélisation graphique et la chorématique* s'appuient sur des séries de symboles provenant de la géométrie euclidienne.

Parallèlement, les développements des Mathématiques et de la Physique ont fortement influencé certains courants de la Géographie, tel est le cas de la théorie des fractales développée en 1975 par B. Mandelbrot. Ce dernier s'appuie sur deux domaines pour construire cette théorie : la géométrie et les mathématiques pures et en déduit ainsi une nouvelle branche des mathématiques.

La chorématique est une méthode de modélisation géographique qui développe, utilise et analyse les chorèmes, c'est-à-dire des représentations schématiques de l'espace par des formes élémentaires.



Une fractale est donc une figure géométrique représentant un objet naturel qui répond à plusieurs caractéristiques.

- Ses parties ont la même structure que le tout et
- sa forme est très irrégulière quelle que soit l'échelle.

Autrement dit, un objet fractal est un motif irrégulier ou fragmenté qui peut être divisé en sous parties, chacune d'elles étant approximativement une copie réduite de l'ensemble (Mandelbrot, 1995). La dimension fractale prend le sens décrit dans la figure 44 mais a la particularité de ne pas être entière. Elle permet notamment d'évaluer le degré d'irrégularité d'un objet.

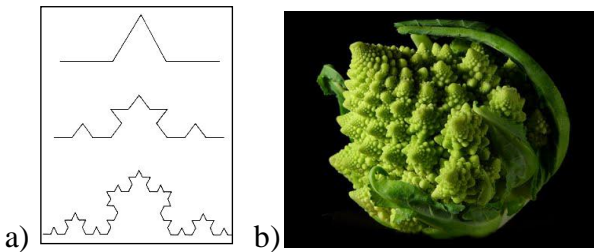


Figure 44 : Exemple d'objets fractals – la courbe de Koch et le chou romanesco (Sevenet, 2013)

B. Mandelbrot offre grâce à cette théorie un langage et une méthode d'interprétation qui s'approche de la réalité. Il classe toutes les fractales en deux groupes (figure 44) :

- les fractales déterministes, issues des processus répétitifs (a), et
- les fractales aléatoires ou naturelles (b).

La géométrie s'applique à toutes les disciplines et se veut donc universelle. Les premières applications en Géographie ont été en majeure partie urbaines (Batty et Longley, 1994, Frankhauser, 1994, Bailly, 1999, Tannier, 2010). Les formes, produites par l'homme, n'apparaissent pas toutes régulières mais plutôt très irrégulières. Selon Frankhauser et *Alii* (1995), le fait d'observer dans de nombreux cas certaines régularités dans les tissus urbains peut paraître surprenant vu la diversité de leurs aspects. Pourtant l'observation fréquente de l'irrégularité des structures urbaines indique l'existence de processus récurrents. M. Batty et P. Longley (1994) rappellent également que la perception visuelle de la forme urbaine est le point de départ traditionnel pour comprendre la ville.

Le premier groupe d'analyses et de modèles a cherché à simuler le contour urbain. En effet, l'irrégularité des contours urbains est évidente telle que présentée sur la figure 45. De même, la figure 32 montrait la ressemblance entre une forme naturelle (le corail ou la fougère) et une forme anthropique (la ville) issue d'un processus de croissance. Les formes représentées sur cette figure révèlent une certaine irrégularité. L'observation fréquente de l'irrégularité des structures urbaines indique l'existence de processus récurrents qui ont incité certains géographes à utiliser la géométrie fractale pour modéliser la croissance de la forme urbaine (Frankhauser et *Alii*, 1994, Bailly, 1999).

Bailly (1999) s'est appuyé sur la théorie des fractales pour modéliser la croissance des villes de Marseille, Nice et Gênes (figure 32). La géométrie fractale semble, dans ce cas, adéquate car elle a permis de simuler la croissance urbaine de manière très réaliste, l'écart entre le modèle et la réalité était faible. Ainsi, ce modèle montre que la croissance de la ville ne se fait

pas régulièrement par cercles radioconcentriques mais irrégulièrement en s'apparentant à la croissance du réseau.

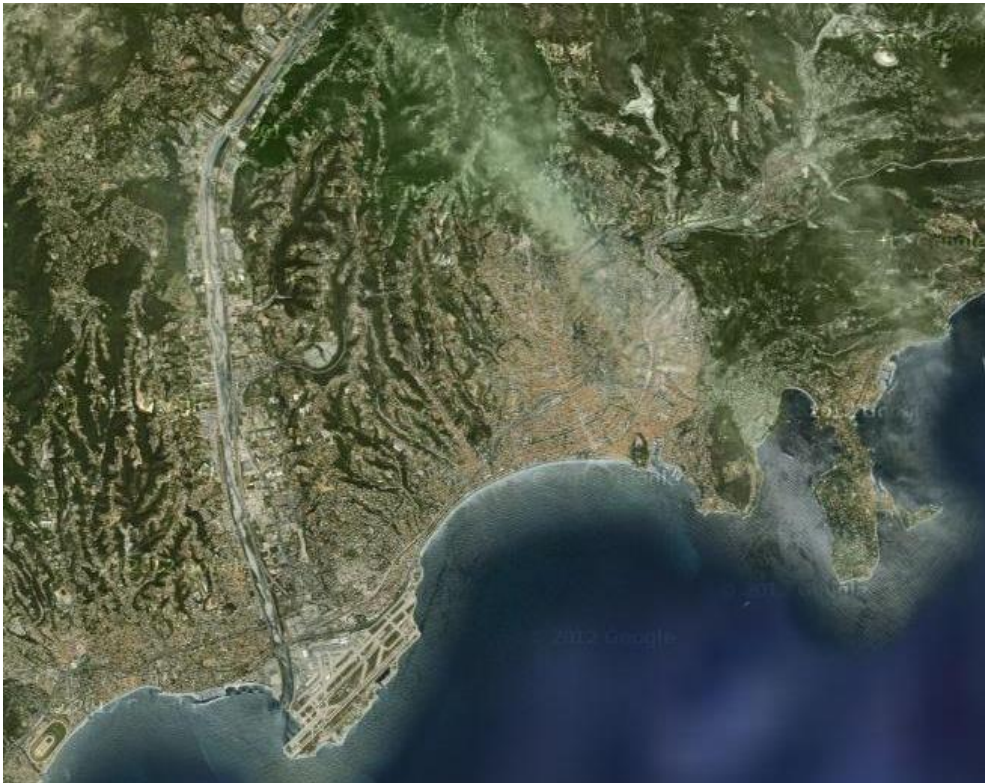


Figure 45 : Photographie aérienne de Nice
Source : Google Earth, 2013.

Le deuxième groupe de modèles vise à comprendre les **formes intra-urbaines** : soit par la forme du réseau, soit par la forme du bâti.

I. Thomas et *Alii* (2009) ont analysé la fractalité de 97 zones de 18 villes. Cette étude a notamment permis de confirmer l'irrégularité des formes urbaines et ce, quel que soit le pays d'origine (ANNEXE B).

L'analyse fractale appliquée aux villes a permis d'identifier deux structures majeures ayant leur propre logique : celles du centre et de la périphérie. Une des lois majeures en Géographie est celle de la gravitation qui montre que l'influence d'un lieu ou d'un élément décroît avec la distance. En ce sens, M. Guérois (2003) propose une analyse sur la relation entre les gradients de surface bâtie cumulée et la distance au centre. Son approche se réfère à un modèle gravitaire et de ville monocentrique car la distance au centre est le principe d'organisation spatiale. Elle considère que l'indicateur de densité, traditionnellement utilisé, n'est pas approprié à la description des structures fortement hiérarchisées et fragmentées telles que celles des villes. Cette analyse s'appuie sur des structures caractérisées par une hétérogénéité entre espaces bâtis et espaces non bâtis traduisant une couverture inégale de l'espace urbain.

Dans le cas de l'analyse radiale, la forme optimale de certaines organisations urbaines spontanées est « l'objet fractal de référence », soit une structure centrale autour de laquelle la masse de bâti diminuerait selon une fonction puissance inverse de la distance au centre (figure

46). Plusieurs travaux empiriques ont convergé pour établir qu'en moyenne, la valeur de la pente (appelée dimension fractale) était proche de deux dans les centres des villes (structure assez homogène) et proche de zéro en d'autres endroits. M. Guérois (2003) s'est appuyée sur la base de données CORINE LAND COVER pour étudier le phénomène. Elle a par ailleurs, démontré que la **rupture dans la pente** peut renvoyer à la question des ruptures identifiées comme **deux comportements scalants différents** (figure 46). La différenciation de l'espace bâti à l'intérieur de la ville s'explique par la diversité des prix des terrains et l'accessibilité. Cette idée est développée dans le chapitre 2.

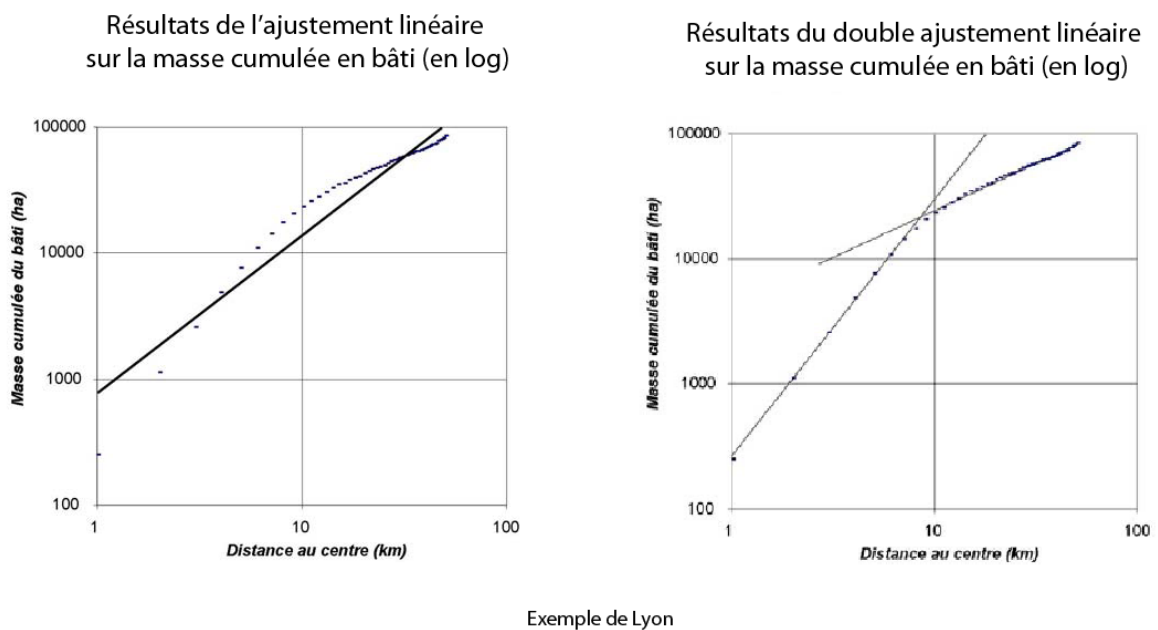


Figure 46 : Analyse fractale du bâti de l'agglomération lyonnaise (Guérois, 2003).

M. Batty et P. Longley (1994) notent que même si la ville est mesurée de zéro à trois dimensions, la plupart des études ne s'appuient que sur un ensemble de lignes et de surfaces, donc sur une géométrie en une et deux dimensions. De même, C. Tannier et D. Pumain (2005) ont montré une corrélation imparfaite entre la densité de population et la dimension fractale* des zones urbaines qui s'explique, sans doute, par le fait que la troisième dimension n'est pas prise en compte. Ainsi, les recherches actuelles visent-elles à étendre l'analyse de la fractalité des villes à leur morphologie en trois dimensions (Thomas et *Alii*, 2010).

Grandeur traduisant le « taux de remplissage » d'un espace par un ensemble, à toutes les échelles.

C. Genre-Grandpierre et P. Frankhauser (1998) ont montré que l'utilisation de la géométrie fractale permet de retranscrire la logique des réseaux de transport urbain grâce à plusieurs types de répartition spatiale non-homogène fondés sur un principe hiérarchique. L'intérêt réside dans le développement de structures de référence qui répondent simultanément à plusieurs critères d'**optimisation**. Par exemple, ils ont découvert que la ville dense peut cumuler proximité des espaces naturels et accessibilité aux services.

Parallèlement, la géométrie fractale permet d'analyser l'**hétérogénéité** du bâti dans ses trois dimensions.

- À partir d'une représentation cartographique d'un tissu urbain, l'analyse fractale permet de mesurer la variation de la part de la surface bâtie en fonction de la distance à un endroit choisi, par exemple le centre du noyau urbain. Des mesures fractales pourront servir à comparer la morphologie des tissus simulés à celle des tissus réels (Frankhauser et *Alii*, 1995, 1996). Ces mesures et applications permettent de caractériser la présence ou l'absence de bâti.
- De même, elle permet d'évaluer l'hétérogénéité des hauteurs du tissu urbain, autrement dit de la rugosité. À partir d'une image dont l'attribut est la hauteur, les contrastes entre les éléments bâtis peuvent être détectés par des méthodes d'analyse d'image (Sevenet, 2005). L'analyse a permis de montrer la forte hétérogénéité du bâti niçois et notamment la présence de vacuités ou de dents creuses. En outre, G. Maignant (2002) a développé une méthode d'analyse de l'hétérogénéité du bâti (dimension fractale comprise entre 1 et 2) en vue de modéliser la dispersion de polluants à l'échelle intra-urbaine. Les trois dimensions ne sont pas utilisées ensemble dans la mesure de la fractalité, néanmoins cette étude démontre l'impact des hauteurs dans certains phénomènes comme la ventilation des tissus urbains. Elle a notamment montré une décroissance linéaire quasi parfaite de la dimension fractale en fonction de la hauteur des bâtiments. Autrement dit, la concentration des polluants a tendance à s'uniformiser à mesure qu'elle s'élève.

L'intérêt des analyses présentées ci-dessus porte sur des problématiques d'aménagements : identification des zones à urbaniser ou amélioration de la qualité de vie des résidents.

2.2.3. L'apport des modèles d'agrégation à la modélisation de la croissance urbaine

Les réflexions sur la complexité et la morphologie ont généré d'autres théories et modèles. Ainsi, la **théorie de l'agrégation** a permis de construire de nouveaux modèles : par exemple le modèle *Diffusion Limited Aggregation*, le modèle de l'agrégation limitée par la diffusion (Dauphiné, 2003). Il repose sur le principe suivant : la croissance d'un amas est gouvernée par la vitesse de diffusion des particules. Dans le modèle, une première particule est localisée sur un espace donné, elle constitue le germe ; une deuxième particule avec un mouvement aléatoire qui simule un mécanisme de diffusion est lancée. Si elle touche la première particule, elle s'agrège et forme ainsi un amas. Si on reproduit plusieurs fois cette simulation, l'amas croît et change de forme. En définitive, ce processus produit des formes filandreuses car les particules diffusantes ont une probabilité plus grande de rencontrer une excroissance que la masse centrale (figure 47).

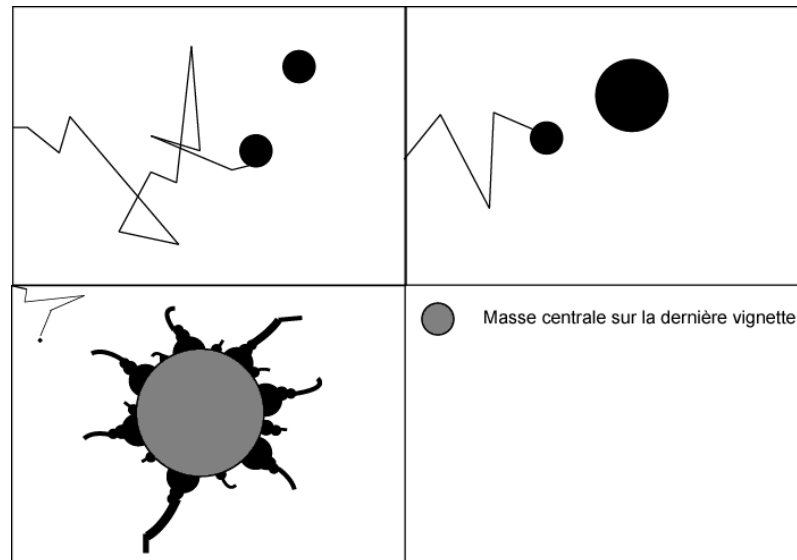


Figure 47 : Schéma représentant le modèle DLA (d'après Dauphiné, 2003).

En géographie, certains modèles se sont appuyés sur cette théorie. Batty s'est inspiré de ce modèle en y introduisant des contraintes naturelles telles que la mer et un relief. Il a pu ainsi simuler la croissance du centre historique de la ville de Cardiff (Dauphiné, 2003). Ce modèle a été également repris par Bailly (1999), à une échelle plus fine, en intégrant la déclivité de la pente comme paramètre principal. Ces deux modèles sont intéressants car ils ont introduit de nouveaux paramètres et intégré des contraintes. Ainsi, le modèle d'agrégation peut être complexifié par l'introduction d'un certain nombre de lois géographiques. Cependant, l'observation montre que certains espaces ne reproduisent pas formellement le phénomène de diffusion. L'espace n'est pas isotrope, ainsi les particules suivent des parcours privilégiés. Par conséquent, le modèle doit inclure des règles particulières telles que l'immobilité de certaines particules ou l'impossibilité de les agglomérer.

	Particule-amas	Amas-amas
Agrégation limitée par la diffusion	Croissance d'une ville	Formation d'une conurbation
Agrégation limitée par la réaction	Epidémie, feux de forêt	Violences urbaines
Agrégation	Tourisme balnéaire	Développement de fronts pionniers planifiés

Tableau 4 : La variété des phénomènes d'agrégation en géographie (d'après J-Fgouyet cité par Dauphiné, 2003).

Dans le chapitre 1, le lien entre volume et concentration de la population sur un territoire a été mis en lumière. Les théories et modèles présentés ci-dessus possèdent une représentation bidimensionnelle mais pourraient être enrichis par la troisième dimension. Au début de ce chapitre, les éléments urbains ont été présentés. Ceux-ci s'agglomèrent et se combinent pour faire naître l'espace urbain.

Si nous prenons l'exemple de la croissance d'une ville, nous savons qu'elle croît grâce à l'augmentation du nombre de constructions à l'intérieur de la zone déjà urbanisée mais aussi par la création de nouveaux bâtiments à l'extérieur, ce qui fait progresser le front d'urbanisation. Dans ce cas, nous avons un exemple d'agrégation de particules à amas. Ces particules (bâtiments) sont des objets complexes 3D, de même que les quartiers et lotissements sont des amas possédant une certaine volumétrie

A une plus grande échelle, ce phénomène peut donner lieu à un exemple d'agrégation amas à amas. Deux villes qui ne sont pas vraiment proches peuvent le devenir à cause de leur croissance. Ceci est le phénomène de conurbation, en d'autres termes « la réunion de plusieurs villes, distinctes à l'origine » (Brunet et *Alii*, 1996).

Conclusion de chapitre

Dans un contexte où l'espace urbain est au cœur des débats actuels, ce chapitre dresse le bilan des travaux existants, en se focalisant sur l'utilisation de la verticalité et des trois dimensions dans l'analyse et les méthodes développées.

Dans le chapitre précédent, le rôle des formes en 3D et des forces qui les façonnent dans l'explication des phénomènes spatiaux a été illustré. La ville est constituée d'objets en 2D et 3D (le site, le parcellaire, le bâti et le réseau) façonnés par des processus qui font d'elle un espace urbain en trois dimensions. Les dynamiques qui s'y déroulent produisent une densité, une épaisseur, un volume qu'il convient d'analyser dans toutes leurs dimensions.

En effet, ce chapitre a montré que la morphologie – par ses trois dimensions – participe à la différenciation de l'espace par la qualité qui lui est attribuée et donc sa valeur (figure 48 et figure 49). La tridimensionnalité de l'espace urbain est à envisager comme facteur explicatif de son évolution socio-spatiale : par exemple, la rugosité ou l'agencement entre pleins et vides façonne la circulation des fluides, la valeur foncière joue un rôle majeur dans la production des formes urbaines qui lui sont associées.



Figure 48 : Les interactions entre les formes urbaines et les phénomènes éco et socio-spatiaux (Sevenet, 2013)

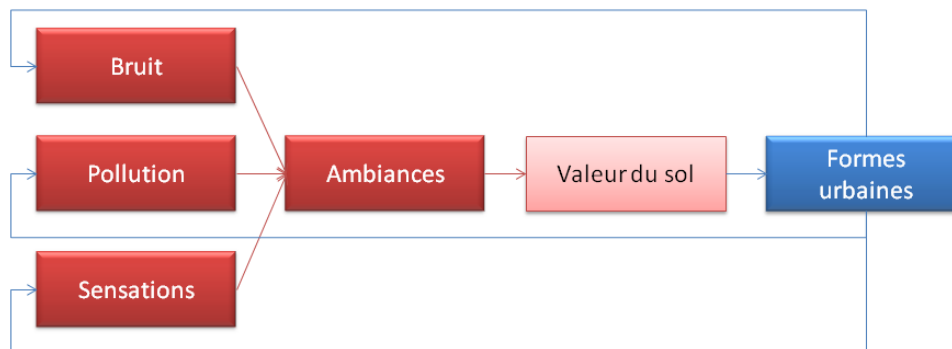


Figure 49 : Les interactions entre les formes et les ambiances urbaines (Sevenet, 2013)

La morphogénèse et la dynamique de l'espace urbain ont fait et font toujours l'objet de nombreuses **analyses** et **modèles**. L'état de l'art proposé permet de conclure sur l'importance de la morphologie dans la représentation de l'espace urbain mais également sur la **faible utilisation de la troisième dimension**. Cependant, des travaux récents tels que la mesure de la fractalité des tissus urbains ouvrent cette voie de recherche.

Conclusion de la première partie

L'espace en général se définit par ses trois dimensions qui permettent de localiser les objets qui s'y trouvent. Ceux-ci peuvent être décrits par leur localisation relative aux trois dimensions de l'espace ou par leur dimension propre au nombre de 0, 1, 2 ou 3 (Larrivée, Bédard, Pouliot, in RIG, 2006).

La représentation tridimensionnelle d'un espace quelconque et des éléments qui le composent ne constitue plus une difficulté. De ce fait, la majorité des travaux ayant trait à la 3D porte sur la visualisation de l'objet d'étude, par exemple, les cartes régionales en relief, la simulation de paysage ou d'option d'aménagement.

Les travaux sur la forme et son interaction avec la force permettent de montrer l'intérêt de l'intégration de la troisième dimension en amont de l'analyse. La naissance d'une forme tridimensionnelle naturelle ou anthropique est le résultat de forces agissant sur une surface. Par exemple, l'espace urbain et sa forme est le résultat de la pression humaine qui s'est exercée sur certaines portions du territoire.

La pression peut s'exercer par une masse (nombre d'habitants sur une surface) ou par une valeur (prix du foncier). La rente foncière est l'élément majeur qui attribue une valeur à l'espace et ainsi, une forme intra-urbaine. En outre, cette valeur dépend d'un certain nombre de facteurs (accessibilité, qualité des ambiances urbaines, services à proximité, *etc.*) liés plus ou moins directement au volume urbain.

Du point de vue de l'analyse spatiale, l'espace est considéré comme un ensemble de lieux ou d'unités spatiales localisées, dans lesquelles sont recherchées les relations entre la position spatiale de cet ensemble et les propriétés locales. L'analyse spatiale vise à établir des règles d'organisation et d'évolution fondées sur l'interaction spatiale. Elle considère les caractéristiques liées à la distance ou au voisinage, tant d'un point de vue structurel que fonctionnel. Elle s'intéresse à la position des lieux, élément majeur de la structuration des relations, en privilégiant l'analyse des distances relatives - distance-coût, distance-temps – qui engendrent les processus d'interactions spatiales comme les processus d'attractivité et de répulsivité, de différenciation spatiale et de transformation territoriale.

L'analyse spatiale offre donc un cadre théorique et méthodologique pertinent pour traiter des dimensions de l'espace.

L'intérêt de l'utilisation des trois dimensions a été souligné, ainsi que sa portée pédagogique et communicationnelle, toutefois il faut constater que peu de méthodes et d'analyses l'intègrent réellement. Or, les dernières avancées technologiques, couplées à de nouveaux questionnements sur le fonctionnement des espaces urbains, notamment, entraînent aujourd'hui, le développement de méthodes d'analyses s'appuyant sur les trois dimensions.

Partie 2. De la ville
monodimensionnelle et
horizontale à la ville
multidimensionnelle et
verticale

Introduction de la deuxième partie

Le XXIème siècle s'est ouvert sur la refonte de la planification et plus globalement, de la pensée urbanistique. La promulgation de la loi Solidarité et Développement Urbain (SRU), répondant aux préconisations du développement durable, vise, en effet, à maîtriser l'étalement urbain grâce à la reconstruction de la ville sur la ville. Cette partie vise à comprendre comment concilier volume urbain et développement durable et/ou comment trouver l'organisation optimale.

Tout d'abord, les enjeux des espaces urbains et des éléments qui les composent sont analysés au regard des principes de durabilité. Quelles sont les transformations attendues de l'espace urbain ? Sont-elles souhaitables ? Sont-elles voulues par tous ? Au travers d'exemples d'applications de ces préconisations, nous tenterons de répondre à ces questions.

De plus, les transformations urbaines impactent directement la morphologie des villes, mais compte tenu de leur complexité, des effets contre-intuitifs peuvent se produire. Comment alors proposer une forme urbaine optimale au regard de la qualité de vie, économiquement et socialement soutenable ? Les notions d'échelle, d'optimisation et de qualité de vie constituent des éléments clés pour la durabilité des formes urbaines.

Ces questions qui interrogent notre discipline et l'analyse spatiale, ont conduit au développement de nouvelles données, méthodes ainsi qu'à la conception de nouveaux outils permettant d'y répondre. Comment utilisent-ils la 3D ? Est-elle pertinente pour ce type d'analyse ? Par ailleurs, quels aspects de la durabilité urbaine sont traités ou nécessitent des développements ? Ainsi, pour terminer cette partie, ce sont les réponses de l'analyse spatiale à la durabilité urbaine qui sont traitées.

Chapitre 3. Les enjeux d'une analyse spatiale de la durabilité urbaine

« Par une sorte de suicide intellectuel, qu'au surplus elle prenait pour progrès, la civilisation occidentale s'est limitée volontairement à cette notion [le quantitatif], qui ne comporte qu'un fragment du réel et exclut en particulier les valeurs et le qualitatif. »
Huyghe, 1971

Les formes urbaines évoluent au cours du temps, leur histoire a été présentée dans le chapitre 2. Actuellement, elles sont soumises aux impératifs d'un développement durable qui visent, notamment, à limiter l'étalement urbain en densifiant les espaces déjà bâtis et préserver la qualité de vie. Par conséquent, la question soulevée est comment allier les principes du développement durable et les pratiques dans la production des volumes urbains.

Ce chapitre vise donc à analyser les processus de la croissance urbaine, présentés dans le chapitre 2, sous l'angle de la durabilité. Ce changement de politiques urbaines a des conséquences sur le processus de croissance, ces éléments seront débattus au regard des principes de durabilité urbaine.

De plus, les pratiques individuelles – spontanées et programmées ne sont pas toujours compatibles, mais doivent s'allier pour répondre aux effets du changement climatique et les limiter. Dans ce contexte, il apparaît que la qualité de vie et le bien-être sont des concepts qui permettent de concilier développement durable et l'adaptabilité des formes urbaines. Les problématiques soulevées ici conduisent à s'interroger sur la forme urbaine optimale.

Parallèlement, des expérimentations de territoires durables ont été menées. Cette section vise également à analyser les principes de gouvernance mis en œuvre au regard des pratiques et des processus urbains actuels. Autrement dit, il s'agit de déterminer comment combiner les pratiques agissant sur le développement urbain de manière efficace. Pour finir, les retours sur les expériences de développement urbain durable mettront en lumière les freins qui demeurent.

1. Reconstruire la ville sur elle-même

1.1. Pourquoi accabler l'espace urbain ?

Aujourd'hui, les **espaces urbains** concentrent de **fortes densités**, que ce soit en termes de population ou d'activités et d'infrastructures. Comme le rappelle O. Godard (1996), le développement urbain actuel est confronté à deux problèmes.

- Tout d'abord, la **croissance urbaine** est **incompatible** avec les conditions nécessaires au **développement durable** de la planète. Pour faire évoluer son milieu, l'Homme a détruit des écosystèmes ; pour vivre, il consomme les ressources naturelles. L'espace urbain, construit par l'Homme jusqu'à présent, est considéré comme contre-nature car il cumule un certain nombre de facteurs non soutenables à long terme pour le système. Par exemple, les diverses formes de pollution – de l'air, de l'eau ont entraîné une surmortalité globale de la population. « Toutes les études confirment cet état de fait : les villes connaissent une importante surmortalité liée à la mauvaise qualité de l'air » (Cluzet, 2007, p65). De même, les villes sont soumises à des problèmes de ressources, d'alimentation et de traitement de l'eau car « l'eau est également polluée massivement dans de nombreuses métropoles et consommée sans modération dans de nombreux pays » (Cluzet, 2007, p67).

- De plus, dans la mesure où le **libéralisme** et l'**absence** de véritables **règles** d'urbanisme et d'aménagement ont laissé une liberté complète aux acteurs au cours des deux derniers siècles (Cluzet, 2007), la **viabilité** du système urbain est **remise en cause** par le mode de croissance mis en place. Les choix résidentiels – ou l'absence de choix dans certains cas – ont entraîné une réduction de la mixité sociale (Chamboredon et Lemaire, 1970, Croyet et Alii, 2007).

Globalement, la **qualité de vie** dans ces espaces s'est fortement dégradée. En effet, Cluzet (2007, p.67) relève que « le stress urbain se développe rapidement, qu'il soit lié à des phénomènes objectifs comme le bruit [...], ou plus généralement aux conditions de vie dégradées : congestion des axes de transport, rythme de vie en ville harassant, habitat désuet, perte de lien avec la nature, *etc.* ». Aujourd'hui, pour que le système urbain soit durable et viable, les problèmes environnementaux soulevés ci-dessus doivent être résolus.

La relation entre la ville et l'environnement n'est pas nouvelle ; dès l'Antiquité, Platon et Aristote ont mené une importante réflexion sur ce thème. En effet, ils préconisaient des villes conçues en fonction de critères environnementaux, comme le climat, le site, la santé, *etc.* Au XIX^{ème} siècle, cette vision a été reprise dans les théories des Hygiénistes. La révolution industrielle ayant amorcé la période d'urbanisation ainsi que l'apparition des premières nuisances liées à la qualité de l'air, ces deux processus ont été très rapidement mis en relation. Cette période de croissance urbaine et d'industrialisation, que certains pays d'Europe ou les Etats-Unis ont connue au XIX^{ème} siècle, se produit actuellement dans d'autres pays tels que la Chine ou certains pays d'Afrique (Harouel, 1981).

De nos jours, le nombre et la taille des villes croissent dans le monde entier et avec elles les nuisances. Par conséquent, les préconisations édictées lors de la conférence de Rio (1992)* insistent sur la mise en place d'une gestion cohérente des espaces urbains et notamment en préservant les ressources naturelles par une urbanisation maîtrisée.

Pourtant, toute forme de développement (y compris celui des espaces urbains) est une exigence ou un besoin naturel. Dans le chapitre 2, un parallèle entre la croissance des espaces urbanisés, entendus comme lieux de vie des hommes, et celle des espaces écologiques et biologiques a été mis en évidence.

De ce fait, il existe à la fois une **compétition** et une **complémentarité** fortes entre ces différents systèmes, ce qui n'est pas sans rappeler les relations entre forces et formes développées dans la première partie.

De plus, l'espace urbain est soumis à une multitude d'enjeux, rendant difficile l'application d'un développement durable. Dans ce dessein, il doit relever une multitude de défis.

Le développement urbain durable étant en quelque sorte l'application locale du développement durable, il doit en retranscrire les principes fondateurs. Lors du Sommet de

La conférence de Rio marque le début d'une coopération internationale pour établir les premières mesures en faveur d'un développement durable notamment à l'échelle locale.

Rio (1992), 27 principes majeurs ont été énoncés et il existe une correspondance logique entre ces principes et les objectifs de durabilité urbaine. Le tableau 5 présente les principes et les objectifs directement liés au développement urbain durable.

Précaution / Environnement	Homme centre des enjeux / Viabilité / Vivabilité	Equité / Justice sociale
Constructions Haute Qualité Environnementale ou Basse Consommation	Qualité de vie	Mixité sociale
Lutte contre l'étalement urbain	Qualité du confort urbain	Lutte contre l'exclusion
Préservation des espaces agricoles	Rénovation et densification des centres	Amélioration du service en logement social
Valorisation des espaces verts	Valorisation des espaces verts	
Optimisation des transports publics	Optimisation des transports publics	
Étude d'impact	Valorisation des espaces publics	

Réflexion globale: les principes de durabilité

Mise en œuvre locale: les objectifs de durabilité urbaine
(Les listes ne se veulent pas exhaustives)

Tableau 5 : Exemples de correspondance entre principes fondateurs du développement durable et la mise en œuvre du développement durable urbain (d'après Dutozia, 2004).

1.2. Adaptabilité de la ville aux changements climatiques : allier pratiques individuelles et pratiques programmées.

Un développement urbain durable nécessite de prendre en compte trois éléments majeurs :

- anticiper la croissance urbaine
- la maîtriser
- gérer de manière cohérente son espace.

Le débat sur l'existence et le développement d'une « bonne forme » urbaine est relativement ancien (cf. chapitre 2). Cette idée est déjà présente dans le livre *Good City Form* de K. Lynch datant de 1959 (Sénécal et *Alii*, 2005). Les questionnements sur la forme idéale de la ville sont aujourd'hui remis au premier plan (Gordon et Richardson, 1997, FNAU, 2004, Sénécal et *Alii*, 2005, Castel, 2005a et 2005b).

Les études actuelles sur l'environnement urbain et sur le développement durable, présentées dans la suite de cette partie, font écho à ce débat en mettant en relation le système urbain avec la conservation des ressources et des milieux naturels. En effet, selon Sénécal et *Alii* (2005, p.21), « une bonne forme urbaine favoriserait les économies d'énergie et des ressources, autant qu'elle permettrait un bon accès à la nature comme aux services, aux équipements et aux autres *aménités urbaines* ». Pour de nombreux auteurs, la forme urbaine dense participe également aux économies d'échelle (Castel, 2005b) et à la sociabilité (Lévy et Lussault, 2003).

La maîtrise de l'artificialisation de l'espace, afin de préserver les ressources naturelles, est présentée comme une nécessité. Les espaces urbains et leur étalement sont, de ce fait,

directement visés par les critiques, et sont contraints de maîtriser leur croissance. La densité urbaine est imposée, mais certains estiment qu'elle n'est pas pour autant durable.

1.2.1. Le débat : ville étalée versus ville dense

Le débat actuel sur la forme de la ville durable oppose d'un côté, les défenseurs de la forme, compacte et dense, et de l'autre, les partisans d'une ville verte et dispersée. (Revue Urbanisme, 2008, p.46).

Le premier groupe défend l'idée que la ville dispersée et étalée est une forme moins durable que la ville dense. Notamment, certains acteurs de l'aménagement et de l'urbanisme s'interrogent sur les coûts engendrés par la ville étalée.

Rappelons que la forme urbaine compacte comme forme idéale évoque **certains courants urbanistiques** (Hygiénistes), **certaines périodes de l'histoire** des villes du Moyen-âge ou de la Renaissance), ou encore le **modèle des villes méditerranéennes**. Au départ, la ville et la concentration des hommes et des activités sont nées pour que l'homme réalise des **économies d'échelle**.

- Plusieurs études récentes menées sur différentes villes européennes mettent également en évidence le **moindre coût de la densification** et du renouvellement. Une première méthodologie établie à partir des **coûts collectifs** liés aux infrastructures de réseaux et aux services publics (les transports, la communication, l'éclairage public, la voirie, *etc.*), des **différents types d'urbanisation** – concentrée, contenue, linéaire, dispersée et par grandes opérations – a été réalisée. Puis elle a été appliquée à 186 communes de la province de Milan. Cette étude, menée par M-C Gibelli (FNAU, 2004), a révélé que les coûts collectifs sont deux fois plus importants pour les villes dispersées ou celles dont la croissance urbaine se fait par grandes opérations, que pour les villes denses.

Une autre étude (FNAU, 2004) portant sur la comparaison de 370 projets, a montré que les **coûts de renouvellement** sont de 20 à 30% moins élevés que ceux de **l'extension urbaine***.

A. Lorgeoux, auteur de cette dernière étude, rappelle tout de même que les coûts sont différents d'un projet à l'autre et que l'extension urbaine peut se révéler moins chère dans certains cas.

Au-delà de la question du coût, d'autres arguments sont avancés contre l'étalement urbain. Tout d'abord, la ville compacte est souvent associée à la **maximisation des interactions sociales, économiques et culturelles**. À l'image du modèle urbain méditerranéen, la ville compacte favorise la mixité sociale et la sociabilité. Plus généralement, la ville étalée renvoie à l'individualisme et au repli sur soi (Prud'homme et *Alii*, 2002, Reigner, 2011). Cependant, ces arguments se heurtent à la représentation plutôt négative que les populations ont actuellement de la ville.

De plus, l'étalement urbain est consommateur de surfaces naturelles et/ou agricoles et, en conséquence, générateur de conflits d'usages – agricultures, loisirs, résidentiels, *etc.* Par exemple, l'implantation d'espaces urbains au sein de terrains agricoles peut produire une

Sauf si le renouvellement consiste à remettre les équipements à niveau.

cohabitation difficile entre les arrivants et les habitants enracinés (Reigner, 2011). De plus, cette forme urbaine est jugée de médiocre qualité architecturale car les opérations de lotissement ne sont pas impliquées dans de réels projets urbains.

Enfin, depuis la publication de la courbe de P. W. G Newman et J. R. Kenworthy (figure 50), en 1989, représentant la consommation de carburants dans les grandes agglomérations mondiales en fonction de la densité de population, il est admis qu'une corrélation négative existe entre la densité des agglomérations et la consommation de carburants.

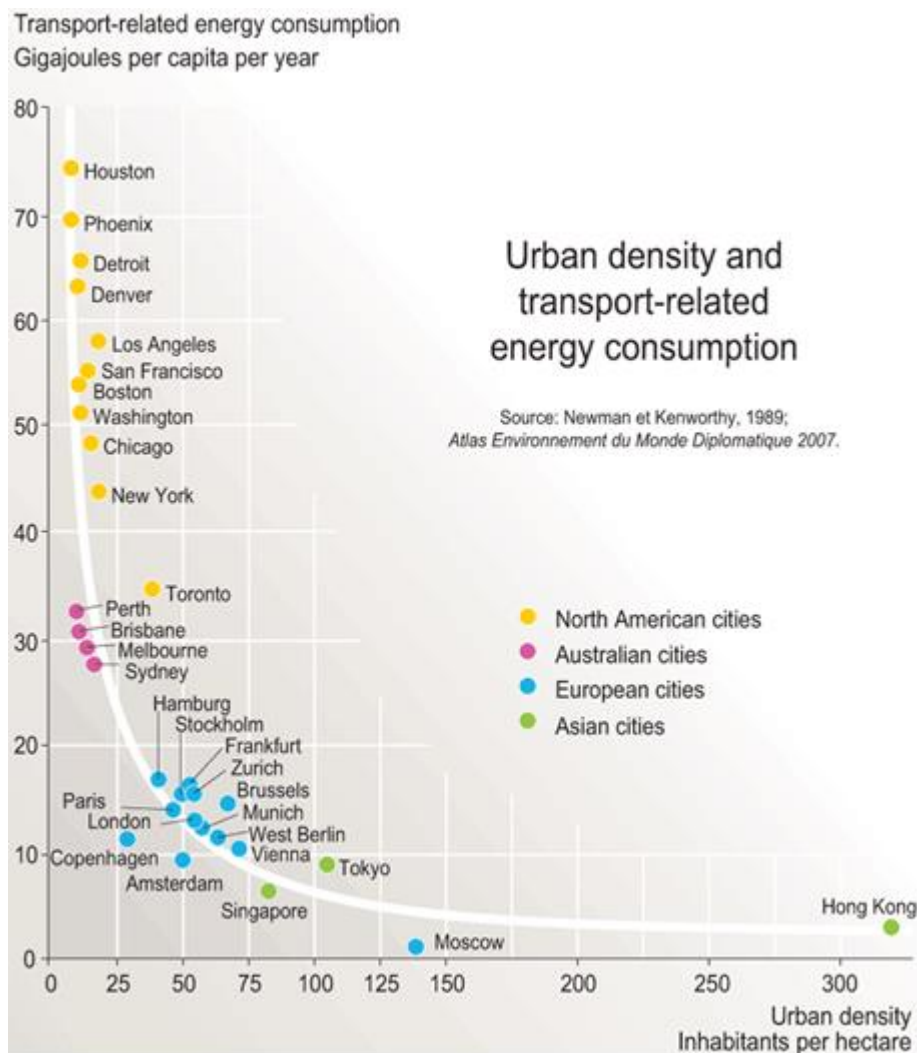


Figure 50 : Densité urbaine et consommation d'énergie liée aux transports (Newman et Kenworthy, 1989).

Le deuxième groupe soutient l'idée que la ville dense n'est pas aussi durable qu'on le prétend. Diverses recherches ont montré que la relation entre mobilité et morphologie urbaine est plus complexe que ne le laisse supposer la courbe de Newman et Kenworthy (1989), notamment en raison des nombreux trajets longues distances liés aux loisirs (et des consommations associées) observés dans la ville dense (Reigner, 2011). « Trop souvent, elle gaspille l'énergie et ne démontre pas que la densité est efficace » (Cluzet, 2007, p.69). Par ailleurs, 13%

seulement des émissions de GES seraient imputables aux déplacements contre 21% pour le secteur de l'habitat. Les enjeux environnementaux liés aux déplacements seraient finalement moindres (Neuman, 2005 Reigner, 2011), et ce, d'autant plus que des travaux prospectifs avancent l'idée que la croissance de la mobilité automobile sera ralentie (CERTU, 2012), particulièrement pour les courtes distances (inférieures à 50km), et ce pour plusieurs raisons :

- tassement de la croissance du revenu des ménages (INSEE, 2008),
- augmentation du coût de la mobilité (Aubrée et Alii, 2011)
- « budget-temps » consacré au transport qui atteint un plafond dans les zones denses (tableau 6). On aurait donc déjà atteint un pic de mobilité, ce qui tendrait encore à minimiser les bénéfices supposés, de la densification.

	Répartition de la population totale (%)		Proportion d'immobiles un jour donné (%)		Personnes mobiles						
					Nombre de déplacements quotidiens		Temps de transport quotidien (minutes)		Evolution de la distance à vol d'oiseau (%)	Durée cumulée des activités et du transport	
	1994	2008	1994	2008	1994	2008	1994	2008	1994-2008	1994	2008
Rural ou faiblement urbanisé	51,6	52,3	19	18	3,7	3,7	60	64	12	7h26	7h36
Grandes agglomérations	48,4	47,7	13	12	3,8	3,6	71	68	-5	8h04	7h54
Ensemble	100,0	100,0	16	15	3,8	3,7	65	66	6	7h45	7h45

Tableau 6 : Evolution de la mobilité quotidienne et du temps passé dans les déplacements locaux selon l'urbanisation du lieu de résidence

Source : Insee - SOeS - Inrets, enquêtes nationales transports et communication 1993-1994, transports et déplacements 2007-2008.

En outre, dans le chapitre 2, nous avons discuté de la théorie classique de l'espace urbain, construite sur le principe d'un **gradient de la rente foncière** (Haggett, 1972, Beaujeu-Garnier, 1995, Paulet, 2000). Celui-ci évolue non seulement spatialement, mais aussi

- hiérarchiquement, selon les types d'activités,
- socialement, pour les zones résidentielles.

Ainsi, les différents modèles de la forme urbaine présentés dans le chapitre 2 sous-entendent que la densité de population urbaine et l'organisation des activités sont tributaires de la valeur du sol, dépendant elle-même de la distance* au centre-ville ou aux infrastructures et aux autres groupes sociaux.

Enfin, aujourd'hui, la ville **dense et compacte** ne bénéficie pas d'une **image** positive auprès de la population (cf. chapitre 2, paragraphe 1.3.1). Elle est associée à la promiscuité, la concentration, le surpeuplement ou la verticalité et enfin la pollution. La ville est un espace social, les individus et les groupes sociaux inscrivent leurs pratiques dans leur espace vécu, et ne sont guère favorables à la densité urbaine qui peut dégrader les qualités de cet espace.

L'étalement urbain est le produit combiné du manque de terrain corrélé au gradient de la rente

Aujourd'hui, le terme d'accessibilité est davantage utilisé puisqu'il fait référence à la distance km et/ou la distance coût.

foncière, et de la recherche d'une qualité de vie préservée près de la nature. Cette forme urbaine est, de plus, la traduction spatiale de la somme des volontés individuelles de réduire les coûts.

Par conséquent, plusieurs points sont soulignés pour remettre en question l'intérêt de la densification des espaces urbains : la rentabilité urbaine (prix du foncier), la qualité de vie (pollution et congestion), et plus globalement, la qualité de la ville. Ces différents éléments pourraient engendrer un surcoût de la ville. Ainsi, A. Lorgeoux (FNAU, 2004) estime que la densification et le renouvellement urbain sont des procédés plus controversés, plus complexes et qui paraissent plus coûteux que l'étalement.

L'ensemble des analyses présentées ci-dessus ne permet pas d'affirmer quelle forme est plus coûteuse qu'une autre. En ce sens, une étude récente réalisée par Castel (2005b), a montré que les **coûts globaux** sont **incalculables** en raison de la diversité des contextes et de la complexité du système urbain.

Rappelons que « les villes se sont composées à la fois par extension urbaine et par sédimentations successives » (Piron, 2003, p.16, Roncayolo, 1990). La forme urbaine dense n'est pas méconnue puisqu'elle a déjà existé et existe encore, mais elle est controversée et difficilement acceptable. Aujourd'hui, elle est soutenue au nom de l'intérêt commun, de valeurs communautaires et collectives qui ont disparu au profit de l'intérêt individuel. Par conséquent, ces valeurs collectives sont abstraites pour les habitants.

De même, les arguments en faveur de la ville durable sont fragiles, car certains éléments du système urbain peuvent s'opposer. Pour G. Sénécal et Alii (2005, p.65), « la forme compacte serait plus durable, parce qu'elle réduirait les distances de déplacement, faciliterait et rentabiliserait le transport en commun. ». Mais Cluzet (2007) explique que la grande ville dense ne répond pas aux critères de durabilité en raison de sa taille.

Depuis quelques années, la question est abordée à une autre échelle : « **la forme polycentrique** revêt l'apparence d'un modèle alternatif à l'hypercentralité ainsi qu'à l'étalement urbain ; elle serait susceptible de réduire les navettes, ainsi que de diminuer les émissions polluantes de CO₂ de même que la pression foncière sur les milieux naturels » (Sénécal et Alii, 2005, p.29). Parallèlement, le débat de la 25^{ème} rencontre nationale des agences d'urbanisme sur les densités (FNAU, 2004) s'est clôturé par un constat : l'extension et la densification urbaine ne s'opposent pas mais sont complémentaires et nécessaires. Et en 2005, un groupe de travail sur les « grands territoires » concluait ainsi un atelier « Il n'est plus temps d'empêcher l'étalement urbain mais de l'organiser en le freinant » (Revue Urbanisme, 2005, p.31).

Ainsi, on peut légitimement se poser les questions suivantes : les transformations de l'espace urbain n'entraînent-elles pas une perte de repères ? Sachant que les groupes sociaux inscrivent leurs pratiques et leurs valeurs sur l'espace, peut-on réellement les tenir éloignés du processus de transformation du bâti en leur imposant une forme urbaine, sans risquer de contrarier le processus attendu quel qu'il soit?

1.2.2. Les formes préconisées en réponse au débat

Depuis la loi Solidarité et Renouvellement Urbain du 3 décembre 2000, la législation est claire : l'étalement urbain doit être maîtrisé. Cela implique deux processus : le renouvellement urbain et la densification des espaces déjà urbanisés et/ou artificialisés. Cependant, bien avant cette loi, certaines collectivités avaient déjà compris l'enjeu. J-P. Antoni (2005, p.13) explique que « les réflexions engagées depuis 1996 sur un modèle urbain « idéal » pour le Pays de Montbéliard [ont] consisté à définir un meilleur équilibre entre le cœur de l'agglomération – à structurer et à densifier, les bourgs centres dans les vallées, pour lesquels il s'agit de construire ou de consolider de réelles centralités, et les villages, qui ne peuvent plus continuer d'accueillir spontanément la périurbanisation prenant trop d'ampleur ».

Ainsi, la tendance est à la reconstruction de la ville sur la ville, avec comme mode de transformation le renouvellement urbain, la régénération urbaine, la rénovation, la réhabilitation, *etc.* Ces termes, qui se retrouvent dans la littérature, expriment donc une même volonté, ils se retrouvent tous dans la littérature mais leur définition est assez floue car ils sont utilisés dans différents domaines (la politique, l'urbanisme, l'architecture, l'aménagement du territoire, l'économie, la sociologie, *etc.*).

D'un point de vue **opérationnel**, la reconstruction ou le renouvellement des espaces urbains peut se traduire par trois processus :

- L'extension des bâtiments existants ou le comblement des vides.
- Le renouvellement urbain par rénovation ou réhabilitation des bâtiments, ou par des opérations de destruction puis reconstruction. La démolition, dans le cadre du renouvellement urbain, marque une rupture forte avec la dynamique de dévalorisation d'une zone urbaine. Procédure radicale et qui doit rester rare, elle est parfois nécessaire tant l'image liée aux précédentes formes urbaines est négative.
- Le changement de destination, autrement dit un changement de fonction du bâtiment sans transformation physique.

Les espaces urbains ont subi, en France, de profondes mutations des espaces urbains au cours des deux derniers siècles : la désaffectation des grands sites industriels, l'abandon d'anciennes implantations de services publics du XIX^{ème} siècle et les problèmes posés par les formes urbaines construites dans l'urgence au milieu du XX^{ème} (Piron, 2003). Les formes urbaines créées pour répondre à un besoin immédiat – les grands ensembles par exemple, sont désormais remises en question. Le manque de réflexion prospective lors de leur construction a conduit, aujourd'hui, à la constatation de leur non-pérennité.

Aussi, l'exigence de reconstruire la ville sur la ville en ayant pour objectif de faire évoluer les espaces urbains vers une meilleure structuration et un meilleur rendement des éléments du système urbain (Antoni, 2005). À l'heure actuelle, le renouvellement urbain suppose une constante modernisation du parc bâti : rénovation des logements insalubres, mobilisation des

logements vacants, démolition des industries désertées ou d'entrepôts consommateurs d'espace.

Dans le chapitre précédent, nous avons expliqué que le bâti est l'un des éléments majeurs d'inertie de la ville, tandis que les fonctions urbaines qui l'occupent sont, elles, beaucoup plus dynamiques. Concrètement, la reconstruction de la ville sur la ville doit passer par une gestion souple et une optimisation des espaces urbanisés (Piron, 2003, Cluzet, 2007). Une gestion souple implique une **certaine adaptation de la forme aux fonctions urbaines**. Autrement dit, lors de la construction des bâtiments, il faut déjà penser à leur reconversion. Proposer des formes urbaines « adaptables » permet de relier ces deux temporalités. À ce propos, Cluzet (2007, p.97) rappelle qu'« associer la durabilité à la pérennité des organisations urbaines et des constructions elles-mêmes, dans leur forme et souvent dans leur usage, relève d'une évidente confusion et d'un contresens : n'est durable que ce qui s'adapte et permet d'éviter des créations *ex nihilo* ». La notion de « ville durable » ne renvoie pas nécessairement à l'idée de « pérennité des formes urbaines » mais à celle de maintien des villes dans la durée (Zuindeau, 2000). C'est donc bien le processus permanent de reconstruction, exprimé à travers l'expression de « renouvellement urbain », qui est au cœur de la problématique de la durabilité. La prospective urbaine doit ainsi s'étendre sur une très longue période car « il faut beaucoup de temps et d'attention pour que la ville se constitue, se modèle, se transforme et puisse accueillir convenablement les populations qui y viennent, de plus en plus nombreuses s'y fixer » (Paquot, 1999).

Cependant, Cluzet (2007) constate que le **renouvellement urbain** n'a jamais été aussi **bas** en France. À part quelques opérations de démolition-reconstruction ciblant les grands ensembles, les **centres**, eux, sont **surprotégés** au nom de revendications patrimoniales et sous le couvert de mise en valeur touristique. L'immobilisme se développe pour contrecarrer un développement toujours plus rapide qui effraie. Les références « historiques » sont confortables car prévisibles. En conséquence, la maîtrise de l'étalement urbain semble difficile dans la mesure où la protection du patrimoine empêche le renouvellement du bâti et conduit nécessairement à une hausse des valeurs foncières. La conférence « Modèles et transitions de la durabilité urbaine », dont la première journée d'étude a eu le 30 mai 2012 portait notamment sur l'analyse de cette inertie. Il apparaît ainsi, que le modèle de ville durable issu essentiellement d'Europe du nord, peine à être appliqué aux villes méditerranéennes en raison de leur fort héritage historique.

En outre, comme nous l'avons expliqué dans le paragraphe 1.2.1 de ce chapitre, imposer une forme urbaine ne suffit pas, les **habitants** doivent être associés aux choix. Pour renforcer la densité ou effectuer du recyclage urbain (Cluzet, 2007), ou en tout cas pour que ces transformations deviennent une mutation naturelle, il faut qu'elles soient acceptées par ceux qui vivent la ville. Ainsi, l'IAURIF (2005b) propose de faire référence aux images urbaines qui ont marqué l'histoire (Haussmann, la ville méditerranéenne, *etc.*).

La forme polycentrique soutenue par la FNAU (2004) et G. Sénécal et Alii (2005) est perçue

comme un modèle alternatif à la forme actuelle des villes et une complémentarité entre étalement et densité. Cependant, l'unité urbaine ne doit pas être entendue seulement dans le sens de quartier. Les quartiers durables sont en effet un des fers de lance des projets urbains aujourd'hui. Ce travail de recherche vise, ici, à mettre en garde contre la segmentation et l'analyse de ces quartiers pris indépendamment. La ville n'est pas simplement la somme de ces quartiers ou l'assemblage de quartiers durables (mixtes d'un point de vue fonctionnel et social, et de bonne qualité environnementale) ne signifie pas que la ville est durable. Il nous semble qu'à la manière de la théorie Constructale qui sera approfondie dans le 0 paragraphe 1.3, chaque quartier doit être régi par ses propres « lois », c'est-à-dire avoir sa spécificité pour permettre de faire fonctionner l'ensemble. Sinon, de l'hétérogénéité apparente des quartiers naîtra une homogénéité de la ville pas nécessairement durable, tout d'abord parce que la valeur d'une ville se mesure entre autres par sa singularité, et parce qu'un quartier qui « comblerait tous les désirs » mènerait à un enfermement en son sein, comme le souligne T. Paquot (FNAU, 2004).

1.3. **Mieux vivre : qualité et harmonie**

Selon la FNAU (2005), « la constitution de la civilisation urbaine a amené à réfléchir aux modes d'organisation architecturale, urbanistique ou environnementale susceptibles de garantir, de protéger et de créer les meilleures conditions d'harmonie de la vie sociale et collective ». Si la forme urbaine est au cœur des débats actuels sur le devenir des villes et des problématiques sur le développement urbain durable, c'est parce qu'elle est au centre du système urbain et qu'elle est en interaction avec tous ces éléments (figure 51). Dans le cadre des études sur le développement durable urbain et sur l'environnement urbain, le bien-être et la qualité des environnements urbains (naturels et construits) sont deux dimensions indissociables. Elles interagissent l'une avec l'autre et sont ainsi structurantes de la qualité de vie (Sénécal et Alii, 2005).



Figure 51 : Les sphères du développement urbain durable (Sevenet, 2013).

L'*urban design* étudie l'arrangement entre la forme urbaine et l'environnement urbain. Son objet d'étude n'est pas l'architecture mais plutôt la qualité de vie et l'organisation urbaine.

Cette discipline vise à mettre en relation toutes les disciplines traitant de l'urbain – aménagement, architecture, développement économique, ingénierie *etc.* – pour offrir une vision commune.

Elle s'appuie sur trois analyses fondamentales (Xia et Qing, 2004):

- la qualité physique de l'espace urbain : environnement sonore, conditions d'ensoleillement, de ventilation et de pollution,
- la qualité visuelle de l'espace urbain,
- la structure de l'espace urbain : la distribution des fonctions et leurs occupations au sol.

Concrètement, elle implique l'arrangement et le design des bâtiments, de l'espace public, du système de transport, les services et les aménités pour donner une forme, une identité et une qualité à un espace que ce soit une ville, un quartier ou un bloc de bâtiments.

Pour Xia et Qing (2004), la troisième dimension, et plus particulièrement les modèles urbains virtuels, peuvent considérablement améliorer l'analyse de l'espace urbain. En effet, cette avancée permet aux professionnels de la ville de mieux appréhender l'*urban design*. Plus précisément, E. Saarinen pense que l'*urban design* est l'art d'organiser l'espace en trois dimensions, c'est-à-dire en ne prenant pas uniquement en compte la géométrie de l'espace mais également la vie humaine et le sens social (Xia, Qing, 2004).

Donner une définition unique de la qualité de vie est une tâche difficile, pourtant, chacun en a une idée, car chaque individu possède en lui un référentiel lui permettant d'évaluer sa propre qualité de vie.

L'évaluation de la qualité de vie s'appuie sur deux éléments opposables : des critères objectifs mesurables et un concept subjectif (Maignant, 2009). Pour la plupart des gens, la qualité de vie est dépendante du statut socio-économique, essentiellement du revenu, et d'indicateurs matériels. Elle renvoie également à l'espace vécu, notamment la structure résidentielle et l'organisation spatiale des services de base, éléments fondamentaux de la qualité de vie. Cependant, l'espace vécu renvoie à de nombreux autres facteurs, souvent qualitatifs, donc difficilement mesurables (cf. chapitre 1 et chapitre 2). De plus, la qualité de vie dépend d'aspirations individuelles propres à la représentation et la valeur que chaque individu attribue à l'espace (Bailly, 1984). En d'autres termes, « la qualité de la vie est une notion complexe qui ne met pas seulement en jeu les caractéristiques objectives d'un territoire mais qui traduit aussi les aspirations de ceux qui y vivent ou qui souhaitent s'y installer » (FNAU, 2005).

La question de l'évaluation de la qualité de vie renvoie à sa définition même, et celle-ci ne fait pas consensus. Elle se résume par « les conditions de vie » pour l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (cadre de vie, modes de vie, niveau de vie, *etc.*), par « l'expression d'un sentiment général de bonheur » pour l'United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, ou par « un complet bien-être physique, mental et social » pour l'Organisation Mondiale pour la Santé (FNAU, 2005).

Dans tous les cas, la qualité de vie possède un caractère multidimensionnel.

L'image d'une ville s'évalue de deux manières : de l'intérieur, c'est-à-dire du point de vue des habitants ; et de l'extérieur, autrement dit, à travers l'attractivité qu'elle suscite. La qualité de vie est donc une affaire de perceptions, qui sont à la fois le fruit de l'individualité et de la culturalité.

En outre, la qualité conditionne la capacité à attirer. En effet, la qualité de vie est un facteur d'attractivité des villes pour les entreprises et les hommes. Par conséquent, elle est évaluée selon divers critères inhérents à la pluralité des acteurs.

Pour Bailly (1984), la qualité de vie dépend en partie de l'organisation spatiale des services de base et donc de leur accessibilité. Ainsi, ce facteur valorise la proximité, et par la suite la densité de l'espace urbain. Par exemple, habiter à proximité d'un hôpital, d'un équipement sportif, d'un parc ou de tout autre équipement ou service, est susceptible d'améliorer le bien-être des gens et donc leur qualité de vie (Sénécal et *Alii*, 2005).

Le développement d'indicateurs d'évaluation de la qualité est difficile à mettre en place dans la mesure où les perceptions sont difficilement quantifiables et toujours subjectives. Ainsi, la quantification de la qualité de vie est réalisée à partir du niveau d'accessibilité de services de base.

La notion de qualité de vie, telle qu'elle est exposée aujourd'hui, est le prolongement de la vision de la ville des Hygiénistes (cf. chapitre 2) par l'introduction de l'idée d'un développement urbain durable. Néanmoins, le **développement durable** se **différencie** sur deux points par rapport à la **qualité de vie** : l'échelle (espace monde *versus* espace vécu) et le temps (la durabilité s'envisage sur une temporalité beaucoup plus longue que celle des élus et des citoyens).

Aujourd'hui, le développement urbain durable repose sur le renouvellement et la densification de la ville. Par conséquent, il est désormais indispensable de connaître avec précision les impacts de ce type de développement sur la qualité de vie et donc sur l'ambiance urbaine et l'attractivité des quartiers. Ainsi, les chercheurs sont attendus sur le développement de méthodes de connaissance et de compréhension du fonctionnement urbain. « Ce sont notamment les interactions des éléments environnementaux, spatiaux, démographiques et socio-économiques, dont beaucoup sont encore mal appréhendées, qui doivent être privilégiées, et pour ce faire, les collaborations interdisciplinaires sont impératives. Cette connaissance précise des interrelations anthropiques et environnementales est un pré-requis dans la conception d'indicateurs de durabilité urbaine pertinents et robustes [...]. Elle est également indispensable à la prospective inhérente au développement urbain durable » (Voiron, 2005, p.5).

2. Trouver la configuration et la distribution urbaine optimale dans le contexte du développement durable

L'appropriation et l'utilisation du sol renvoient à un découpage fonctionnel de la ville (cf. chapitre 2). L'espace urbain est divisé en zones fonctionnelles : zones résidentielles, commerciales, industrielles, de loisirs. Celles-ci répondent à des principes morphologiques qui leur sont propres. Par exemple les zones industrielles nécessitent de grands espaces pour leur fonctionnement non loin d'infrastructures de transports. L'agencement de toutes ces fonctions se fait à travers la structure morphologique urbaine, autrement dit l'organisation spatiale des éléments morphologiques dans l'espace urbain.

Le zonage est aujourd'hui remis en question puisqu'il entraîne une grande quantité de déplacements et par conséquent des nuisances.

2.1. Comment trouver une forme d'organisation alternative au zonage et aux déplacements associés

2.1.1. Quels sont les éléments favorables au zonage

Rappelons que les progressistes considèrent que tous les êtres humains doivent s'adapter à la modernité dont les innovations technologiques font partie.

Par exemple, Le Corbusier estime que la fonction résidentielle ne doit pas être mitoyenne de la fonction industrielle (figure 52). Par conséquent il dessine des quartiers d'habitations verticales éloignées des voies de circulation et entourées d'espaces verts. Plus généralement, le courant progressiste prônait une division fonctionnelle de l'espace, c'est-à-dire une différenciation entre les lieux de vie et les différentes temporalités de l'individu. Cependant, une



Figure 52 : La ville de trois millions d'habitants de Le Corbusier
Source : [7].

des principales conséquences de cette organisation est l'allongement des déplacements d'une zone à une autre.

Ainsi, l'élément majeur favorisant le zonage urbain est l'augmentation de la mobilité. En effet, la croissance urbaine est notamment due au **développement des transports**, et en particulier à l'automobile. Par le passé, les villes européennes ont été construites denses et compactes car le coût de la mobilité était très élevé. Aujourd'hui, la vitesse, le coût et le confort des transports se sont améliorés et ont permis de conquérir de nouveaux territoires. Par rétroaction, l'étalement des zones urbaines engendre lui-même une augmentation des distances parcourues et du nombre de déplacements.

Par ailleurs, l'étalement urbain est lié aux choix de formes urbaines induites par **les modes de vie des habitants**. En France, 57% des résidences principales construites entre 1990 et 1999

sont des maisons individuelles (CETE 2004). Cette forme d'urbanisation est fortement consommatrice d'espace et constitue le moteur de l'artificialisation des espaces périurbains qui possèdent encore des réserves foncières.

Ce phénomène de périurbanisation, voire de rurbanisation, s'explique par les choix résidentiels effectués par les habitants. Les facteurs en faveur d'un éloignement du centre-ville sont multiples (Prud'homme, Dupuy et *Alii*, 2002). Les principaux sont :

- La plus grande disponibilité foncière à moindre coût en périphérie. En effet, dans les villes centres et les quartiers denses d'habitats collectifs, les offres foncières et/ou immobilières sont faibles et donc très onéreuses.
- La représentation que la société attribue à la maison individuelle. En effet, l'accès à une maison individuelle indique une forme de réussite sociale. De plus, elle représente le calme, un certain rythme de vie, l'intimité ainsi que le besoin d'espace et de nature.

Les enjeux d'un développement durable, notamment la maîtrise de l'étalement urbain, créent de nouvelles conditions auxquelles sont confrontées les collectivités locales. Elles doivent ainsi réussir à proposer une alternative à l'étalement urbain et à la voiture particulière, tout en prenant en compte le plus possible les attentes de leurs administrés.

Les nouvelles orientations urbaines ont été retranscrites dans de nouvelles approches de la planification urbaine (cf. paragraphe 1.2.2 de ce chapitre). Malgré les premières modifications apportées aux documents de planification, dont notamment la loi SRU, l'évolution des pratiques reste lente puisque que le nombre de maisons individuelles construites hors procédure d'urbanisme (lotissement ou ZAC) est encore très important (CERTU, 2004).

2.1.2. Une alternative : la compacité et le volume?

Au début de ce chapitre, nous avons évoqué le débat actuel portant sur la définition de la ville de demain. Même si la ville dense semble être le modèle à suivre, elle ne semble pas pour autant être la forme la plus durable. Quelle que soit l'issue qui sera trouvée, il est clair que l'étalement urbain doit être maîtrisé.

Reprenons les éléments avancés pour ou contre le développement d'une ville compacte. Tout d'abord, la compacité permet de réaliser des **économies d'échelle** et une réduction des coûts collectifs. Cependant les **coûts** annoncés pour réaliser **du renouvellement urbain** ou de la reconstruction de la ville sur la ville semblent être **très importants**. De même les différentes opérations de durabilité (éco-quartier, quartier durable ou ville durable) possèdent des coûts beaucoup plus élevés qu'une opération de construction classique (cf. paragraphe 1.2.2 de ce chapitre).

Parallèlement, les espaces urbains denses permettent de favoriser et de maximiser les **interactions sociales**. Néanmoins, les forces et les interactions associées poussent l'individu à rechercher davantage l'**isolement** et le développement d'une sphère privée nécessaire à

l'épanouissement de la vie familiale. À cela s'ajoute chez certains citoyens, le désir de se rapprocher des espaces verts situés en périphérie des espaces urbains.

Maîtriser l'étalement urbain, maîtriser la mobilité, maximiser les interactions sociales et réduire les coûts urbains par augmentation des coûts collectifs sont envisagés dans une ville compacte. Cependant, ce **modèle** ne peut être **applicable** que si et seulement si, **les inconvénients** présentés ci-dessus **sont limités**.

En effet, au-delà du critère d'artificialisation du territoire, la ville de demain doit également concilier qualité architecturale, réduction des consommations énergétiques (voire même production d'énergie) et mixité sociale et fonctionnelle. A ce dessein, la ville de demain doit limiter son étalement urbain tout en offrant en tous lieux « des différentiels moins forts entre les cadres de vie » (Emelianoff, 2002). Ceci implique, soit une mixité sociale et fonctionnelle dans un **schéma multipolaire**, soit une amélioration globale des proximités au niveau d'une ville unipolaire, mais plus compacte (Moreno, 2009). Il est donc nécessaire de redéfinir la proximité aux espaces verts et aux espaces de loisirs, aux lieux de consommations et aux équipements.

2.1.3. Quelles adaptations de la structure de la ville à ces dynamiques futures?

Le développement durable des territoires est un enjeu majeur pour la France. Ainsi, plusieurs objectifs ont été fixés pour l'aménagement urbain dont l'optimisation globale des projets urbains en lien avec les systèmes de réseaux, au regard des objectifs précédemment cités.

Intuitivement, la structure urbaine* renvoie à la morphologie des réseaux et plus particulièrement du réseau routier. En effet, lorsque l'on regarde un plan, les différentes parties de la ville, autrement dit les grands ensembles bâtis, semblent être connectées aux autres par le linéaire du réseau routier.

Le paragraphe précédent a permis de montrer que la **morphologie** est **corrélée à l'accessibilité** des différentes fonctions dans la ville. De même, il a été démontré que les formes urbaines pouvaient influencer la mobilité pédestre (Genre-Grandpierre et Foltête, 2003). Dans le passé, la relation inverse a été démontrée, c'est-à-dire **l'influence de la mobilité sur la morphologie**. Nous avons rappelé, dans le chapitre 2, qu'Hausmann s'était fixé comme objectif d'améliorer la qualité de l'air en zone urbaine. Ainsi, la forme urbaine créée à cette époque devait-elle répondre à des critères de fluidité de l'air. Ces éléments indiquent que le rôle de la mobilité dans la définition de la ville de demain ne doit pas être négligé. G. Dupuy (1991) propose l'adoption de pratiques d'aménagement qui reconnaissent le rôle de la mobilité dans le fonctionnement de la ville.

D. Moreno (2009) donne quelques exemples d'urbanisme tenant compte de la mobilité et qui ont joué un rôle majeur sur la **redéfinition des proximités spatiales** et sur l'utilisation du sol.

Au sens d'organisation qui relie les différentes parties de la ville entre elles.

- Le projet de système général de communications pour Londres en 1855 souhaitait limiter à 15 minutes les déplacements à l'intérieur de la ceinture ferroviaire.
- La conception du réseau électrique de Chicago par S. Insull visait à connecter tous les éléments de la ville.

2.2. Réflexions autour de l'organisation spatiale optimale

2.2.1. Imbrication du bâti / non bâti et densification réfléchie

Un certain nombre de géographes postulent que la **ville fractale** est celle qui maximise les accessibilités à des aménités de nature variée (urbaines et rurales), tout en limitant la fragmentation des espaces non bâtis (Tannier, 2009 ; P. Frankhauser, 1994, 2005 ; C. Genre-Grandpierre, 1998). Ces chercheurs ont ainsi proposé, sur ce modèle, une forme urbaine dense mais qui tient compte de la répartition des fonctions et des aménités urbaines, avec une imbrication des zones bâties et non bâties.

Ainsi, en croisant les aspects majeurs d'une organisation spatiale optimale des tissus bâtis inspirés par V. Fouchier, cités dans le chapitre 2 et les objectifs pour une forme urbaine durable (Tannier, 2009) :

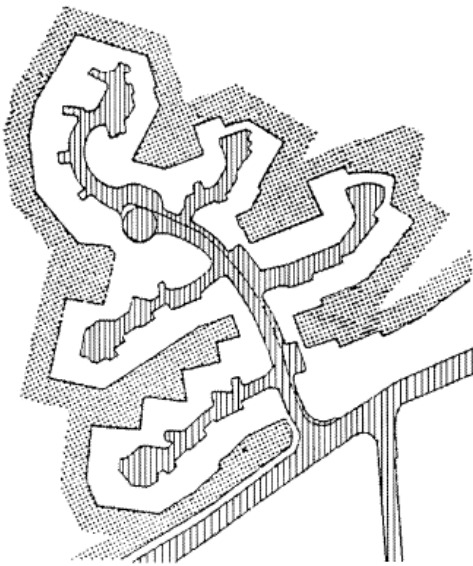


Figure 53 : La proposition de SCHÖFL pour l'aménagement de la bordure d'une agglomération.

La zone verte et le bâti s'entrelacent. (Frankhauser et Genre-Grandpierre, 1998).

- Il faut privilégier la proximité grâce à la construction (ou reconstruction) d'unités urbaines dont la taille permet d'accéder à leurs bordures en dix minutes à pied, pour minimiser le nombre et la longueur des déplacements en voiture. Les nouveaux rapports de proximité incluent l'accessibilité entre le domicile et le travail, mais aussi l'accessibilité à la nature et aux zones de loisirs (figure 53).

- Il faut limiter la consommation d'espace, tout en satisfaisant la demande en logements et éviter la fragmentation des espaces bâtis et non bâtis.

- Les équipements doivent être dispersés pour ne pas reconstituer le zonage ou des inégalités d'accessibilité aux équipements à l'échelle de la ville ou de la métropole.

- Les espaces verts doivent être présents partout, mais leur taille – dépendant de leur localisation dans la ville – doit être réduite au cœur du tissu urbain et plus vaste en périphérie, en veillant à la préservation des coulées vertes.

Cette organisation est **multidimensionnelle** puisqu'elle tend à optimiser l'unité urbaine en satisfaisant **simultanément des critères de plusieurs natures**. Cette organisation complexe est « basée sur une critique des revendications trop simplistes d'une densification à tout prix ; le résultat est une densification locale, réfléchie » (Frankhauser et Genre-Grandpierre, 1998, p.50).

2.2.2. La durabilité comme optimum multiscale ?

J. Theys (2002) fonde son analyse sur la nécessité d'établir le développement durable à l'échelle locale, le territoire est la brique de base du développement durable. À l'inverse, O. Godard (1996, p.33) estime que « la viabilité locale peut ne pas être suffisante [car] la logique de l'auto-organisation d'un système a pour contrepartie une logique d'externalisation de son environnement dont la reproduction ne peut être comprise que comme une désorganisation rattrapée ».

La **ville d'aujourd'hui** doit donc s'organiser selon une **approche multiscale** : du local au global et *vice-versa*. Celle-ci nécessite une **nouvelle distribution des éléments urbains** à partir d'un ou plusieurs **optimums**. « Il faut nous demander comment une optimisation locale s'insère dans une articulation globale ? Est-ce que l'optimum global ne doit intégrer que des optimums locaux ? Et la somme des optimums locaux est-elle un optimum global ? » (Martin, 2008, p.1).

De même Martin (2008, p.1) explique que les problèmes d'optimums sont théoriques, « mais ils se posent fréquemment dans la gestion des territoires et conduisent à l'idée qu'un mieux pour certains, peut être un mal, pour d'autres » et de ce fait, il s'interroge sur une nécessaire mutualisation des pertes pour atteindre un **optimum global**.

Pour O. Godard (1996, p.33), dont le point de vue est partagé par J. Theys (2002), « la contrainte écologique n'a de sens qu'au niveau planétaire. Aux autres niveaux, des échanges, des substitutions et des déséquilibres sont possibles et les contraintes écologiques sont relatives. [...] En ce sens, le développement durable n'est pas fractal ». Ainsi, « l'enjeu est de trouver les conditions d'équilibre d'ensemble de processus qui peuvent être localement déséquilibrés ou dommageables » (Godard, 1996, p.33). De la même manière, « en géographie, l'optimum global n'implique pas nécessairement l'optimum local et inversement [...]. En effet, des pratiques locales en faveur d'un développement durable peuvent parfaitement se retrouver contre-productives à d'autres échelles » (Maignant, 2009, p.54).

Afin d'obtenir l'articulation espérée, J. Theys (2002) et C. Emelianoff (2004, 2008) soulignent la nécessité de changer les **représentations spatiales des habitants**. Ainsi, certains principes de topologie permettent, selon eux, de « mieux comprendre et intégrer les **enjeux locaux et globaux** du développement durable ; en accordant, à la fois, une place centrale à la singularité des lieux, autrement dit aux spécificités géographiques ou aux potentiels locaux, et aux articulations qui les relient, *de proche en proche* à l'espace global » (Theys, 2002, p.6). Ainsi, des discontinuités des espaces locaux, naît une certaine continuité entre les échelles.

Concrètement, les espaces en mutation et les diverses coupures de l'espace doivent être mis en relation avec leurs voisins afin de créer ou de recréer de nouvelles « coutures »* entre les différents espaces. L'**articulation scale** est alors réalisée par les acteurs de terrain et les

Terme emprunté à
Theys (2002)

collectivités territoriales en mettant en place, à la bonne échelle, les outils d'un aménagement durable adaptés à chaque territoire. « Aux marchés, aux Etats, ou aux institutions internationales – formelles ou informelles – le soin d'imaginer, puis de faire fonctionner, les instruments qu'ils jugent les plus efficaces (normes, prix, contrats, fiscalité, *etc.*) pour réguler les interdépendances planétaires » (Theys, 2002, p.5).

Pour l'instant, les principes du développement durable se sont traduits par une multitude d'initiatives locales se juxtaposant aux déclarations d'intentions aux niveaux nationaux et internationaux (cf. paragraphe 3.2 de ce chapitre).

2.2.3. La forme idéale au niveau du bâtiment est-elle duplicable ou multipliable au niveau de toute une ville ? La somme des parties fait-elle un tout ?

Maîtriser la croissance urbaine implique de ne pas construire trop de nouveaux bâtiments, mais plutôt d'**adapter les constructions existantes** aux contraintes actuelles. Le bâti est constitué par les bâtiments, composantes élémentaires de la structure physique de la ville. L'agencement des bâtiments dans l'espace donne lieu au tissu urbain ou tissu constructif, caractéristique d'un environnement urbain donné (Moreno, 2009).

Dans le contexte de l'espace urbain, le développement urbain durable doit être institué à tous les niveaux : du bâtiment à l'ensemble de la ville de manière articulée (figure 60 et figure 54).

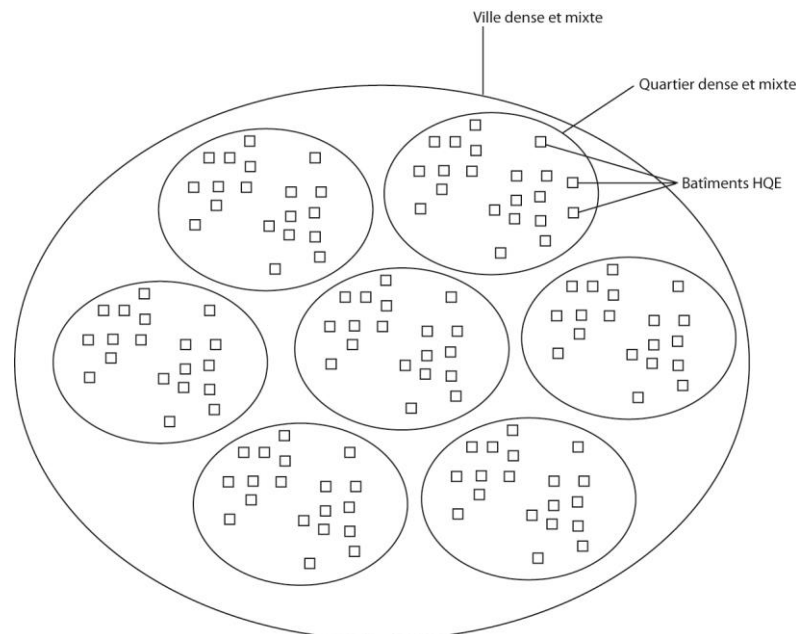


Figure 54: Imbrication des échelles dans l'espace urbain (Sevenet, 2013).

Si la ville doit être compacte, il s'agit alors de remplir les dents creuses existantes. Cette compacité à toutes les échelles constitue-t-elle pour autant une forme idéale ? Une forme optimale ? voire même une forme qui procure du bien être ?

2.2.4. Rechercher une forme urbaine respectueuse de la qualité de vie et du confort urbain

La question de fond est de savoir si les formes urbaines et la qualité de vie peuvent être articulées et s'il existe une ou des formes optimales permettant de répondre aux besoins des habitants, toujours plus exigeants sur la qualité de leur cadre de vie.

Dans le cadre de la ville, l'optimisation des formes urbaines ne doit pas se contenter de satisfaire un seul critère pour son bon fonctionnement. En effet, le Chapitre 2 a permis de démontrer que les éléments du système urbain sont tous interconnectés. Les formes intra-urbaines forment l'espace vécu caractérisé par les ambiances (sonores, olfactives, visuelles) qu'elles produisent (figure 34). Le bien-être et la qualité des environnements urbains (naturels et construits) sont deux dimensions indissociables de la qualité de vie. Par conséquent, la question de la qualité de vie est partie prenante de l'**optimisation des satisfactions sociétales** à des fins de durabilité (Maignant, 2009).

Comme évoquée dans le paragraphe 1.3 de ce chapitre la difficulté est de trouver une définition univoque de la qualité de vie dans la littérature. De plus, le phénomène contemporain d'individuation entraîne un élargissement de la notion de qualité de vie avec le bien-être qui lui, dépend de l'intensité et de la diversité des perceptions sensorielles des habitants (Fleuret et *Alii*, 2004). Par conséquent, **qualité de vie et bien-être sont souvent liés mais ne se superposent pas** : le bien-être assure la qualité de vie des habitants mais la qualité de vie est un bien à défendre ou à conquérir (Maignant, 2009).

La maximisation de la qualité du cadre de vie rétroagit sur la qualité de vie effective des populations. Ainsi, la **perception de la qualité de vie** varie considérablement d'une culture à une autre et même d'une classe sociale à une autre (Charles et *Alii.*, 2007). Par conséquent, la perception par la population des nuisances, des risques et de leur environnement immédiat dépend intrinsèquement de facteurs subjectifs tels que l'appartenance au quartier, l'histoire de l'individu, le choix résidentiel.

Les résultats du travail de thèse de N. Saulnier permettent de mettre en évidence des critères quantitatifs de la qualité de vie issus d'une analyse qualitative (CERTU, 2006). Les critères subjectifs perçus comme essentiels à la qualité de vie ont été identifiés par une enquête menée auprès d'acteurs professionnels et d'habitants. Cette étude a servi ensuite de référence à une approche objective de la qualité de vie. Tout d'abord, les résultats de l'enquête ont montré que la qualité de vie quotidienne se structure autour du logement, du cadre de vie et de l'ambiance de vie (figure 55).

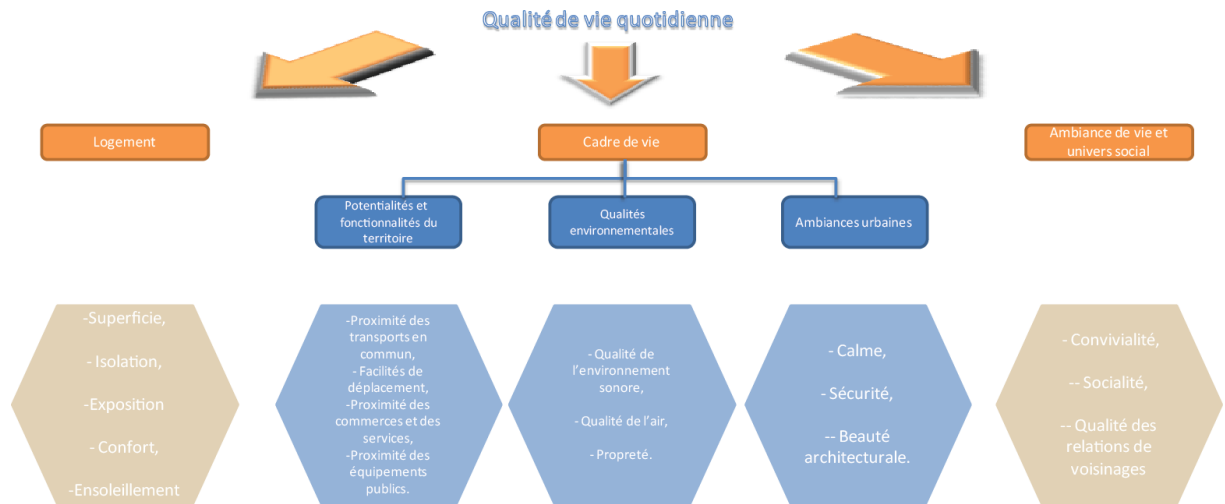


Figure 55 : Critères subjectifs de la qualité de vie quotidienne lyonnaise (CETE, 2006).

Ensuite, l'auteur a cherché à mettre en **adéquation** la **nature des perceptions** ayant trait à la qualité de vie avec des **données quantifiables**, tout en respectant l'exigence de reproductibilité de la démarche. Ainsi, le diagnostic de la qualité de vie urbaine se structure autour de 10 critères : le réseau de transport en commun, l'accidentologie, les potentialités commerciales, la qualité de l'environnement sonore, la qualité de l'air, la propreté des rues, les infrastructures éducatives, la disponibilité des espaces verts, la taille des logements et la sécurité des citoyens. Ces résultats sont à prendre avec précaution, ils dépendent du contexte temporel, géographique et des acteurs (CERTU, 2006).

Par conséquent, une redistribution spatiale optimale des externalités négatives du cadre de vie semble possible afin de **maximiser** la **composante objective** de la qualité de vie. Cependant, il faut rappeler que la maximisation de la qualité de vie du plus grand nombre n'implique pas forcément la **maximisation de la qualité de vie** de tous : l'optimum global n'implique pas des optimisations locales systématiques (Martin, 2008, Maignant, 2009). De ce fait, les critères du diagnostic urbain de la qualité de vie (CERTU, 2006) ont été choisis car ils ont été massivement évoqués par la population, et ce, quel que soit leur profil. En effet, G. Maignant (2009, p.91) explique que « l'optimum de qualité de vie se situe aux marges de ce que tout un chacun peut accepter de concéder (contraintes souples) ou à l'intersection de ce qui est fondamental pour chacun (contraintes non-négociables) ».

Il faut noter que l'optimisation de la qualité de vie individuelle nécessite actuellement un **changement comportemental de nos sociétés** avec comme objectif l'amélioration de la performance globale du système urbain selon des principes de durabilité (Maignant, 2009).

2.2.5. Une ville adaptable, cohérente et réversible

La **durabilité** de la ville ne signifie pas nécessairement pérennité des formes urbaines mais se réfère plutôt au **maintien** de la ville et de son bon fonctionnement **au travers du temps**. Autrement dit, les différents éléments de l'espace urbain doivent être adaptables au cours du temps. La ville durable doit se fonder sur l'existant car la création de nouvelles villes est impossible. Par conséquent, la ville d'aujourd'hui doit donc densifier les espaces fragmentés tout en restant viable et cohérente à long terme (Maignant, 2009).

En ce sens, E. Korsu, M-H. Massot et J-P Orfeuill (2009) ont développé le concept de **ville cohérente**. Les auteurs font le constat que les diverses politiques menées dans les domaines de l'habitat, du transport, de la mobilité, du développement économique et de l'urbanisme ne sont pas toujours cohérentes et contribuent toujours à favoriser l'étalement urbain. M. Wiel (2009) suggère de taxer l'incohérence territoriale qui selon lui est une trop grande dispersion de l'habitat et de l'emploi afin de répondre à cette problématique.

La forme urbaine est un des éléments les moins dynamiques, elle apparaît même parfois immuable (cf. chapitre 2) pourtant elle a su évoluer et s'adapter au cours du temps. Même si l'espace urbain a été construit par un mode de pensée fondé sur l'irréversibilité, il est intrinsèquement mutable donc réversible (L. Andres dans Scherrer et Vanier, 2010). Ces deux dynamiques se retrouvent dans l'histoire des villes : les centres historiques enserrés par leurs murailles sont encore lisibles dans l'espace tandis que les premiers faubourgs se sont transformés et n'ont plus rien à voir avec ce qu'ils étaient.

Cependant, aujourd'hui, il s'agit de considérer la **réversibilité** comme clé d'un développement futur, durable. Pour L. Andres (Scherrer et Vanier, 2010), il faut conférer au lieu en attente ou en transition, une fonction temporaire et éphémère. Par exemple, les grandes friches ont été utilisées pour accueillir des projets culturels et artistiques comme dans de nombreux bâtiments à Berlin ou l'Île Seguin à Paris.

Le concept de ville réversible est intéressant dans la mesure où il met l'accent sur la multi-temporalité et l'adaptabilité de la ville qui étaient jusqu'à présent oubliées des projets. Cependant, il laisse de côté la spatialité et l'organisation de la ville. De ce fait, il convient de prendre en compte l'ensemble des concepts de ville durable, développé dans ce paragraphe : multiscalair, multi-temporalité et cohérence.

3. Et co-construire sa ville

3.1. *Un nouveau mode de (géo)gouvernance*

La prise de conscience des problèmes liés à notre mode de croissance et les mises en garde qui en ont résulté, ont émané principalement de scientifiques et de petits groupes d'écologistes. Ces problèmes n'ont pas été ressentis au départ par la population. J. Theys (2002, p.4) se demande « si, sous couvert d'intentions louables, se référant aux générations futures, une élite technocratique, armée d'un discours moralisateur sur l'état de la planète et les responsabilités de chacun, n'est pas en train d'imposer une nouvelle vision du monde, un "nouvel évangile" auquel personne n'aurait explicitement souscrit ». De fait, le **développement durable local** est donc guidé et **imposé** aux habitants.

Toutefois, le chapitre précédent a permis de montrer que l'urbanisation encadrée par une législation, même forte, rencontre des difficultés face aux **différentes pressions** agissant sur le territoire urbain. Par conséquent, il y aura toujours l'apparition d'espaces urbanisés spontanés ou non prévus. Par exemple, la mise en place de la loi SRU n'a pas vraiment freiné l'artificialisation des collines niçoises, dernier poumon vert de la ville (Sevenet, 2005). Il est nécessaire de tirer les leçons de ces dernières années en matière d'urbanisme durable. Force est de constater qu'imposer la conception d'un urbanisme durable ne se traduit pas forcément dans les faits, par un développement durable des territoires.

Il est impératif d'**ouvrir le dialogue** avec tous les acteurs de la ville et de leur démontrer les avantages à retirer d'un développement urbain durable. Même si la **concertation** et les principes de la **démocratie participative** et de la **gouvernance** font peu à peu leur entrée dans les processus d'aménagement et d'urbanisme, ils ne sont pas encore systématiques, car difficiles à mettre en place. La convention d'Aarhus de 1998, entrée en vigueur en 2002 en France, vise l'accès à l'information, la participation du public au processus décisionnel, et l'accès à la justice en matière d'environnement. Ainsi, peut-on espérer parvenir, progressivement à un changement des comportements en faveur de la gouvernance et de la participation des citoyens.

3.2. *Des expériences plus ou moins encourageantes*

Depuis quelques années, les concours, les programmes de recherche, les appels à projet portant sur la ville durable, les éco-quartiers ou les quartiers durables, *etc.* se multiplient. Le paragraphe suivant vise à analyser les différences entre plusieurs initiatives, en fonction de leur **échelle** d'intervention : du quartier à la ville durable.

Lors d'une enquête réalisée sur les quartiers durables (OBS VILLE, 2007), les maires interrogés se sont montrés favorables au développement durable à l'échelle de l'agglomération (63%) car, pour eux, elle est le périmètre le plus pertinent pour construire un équilibre entre activités économiques, activités sociales, habitats et environnements. La

question du coût est, sans aucun doute, un frein important à la mise en place d'actions, tout autant que l'échelle considérée ; une intervention au niveau de l'agglomération permettrait de mutualiser les coûts.

Comme le rappelle C. Emelianoff (2008, p.45), « l'engouement médiatique pour les éco-quartiers fait oublier le contexte politique et urbanistique dans lequel ils s'inscrivent. Les villes françaises qui ont commencé à construire des quartiers durables développent également une politique de resserrement urbain et de réduction des émissions de gaz à effet de serre ». En effet, il faut rappeler que la France a promulgué plusieurs lois allant dans le sens d'un développement durable. La loi SRU, par exemple, a démocratisé les principes du développement durable au sein des documents d'aménagement et d'urbanisme. Mais « sans renouvellement des outils et de la politique foncière nationale, on ne voit pas comment les territoires peuvent relever le défi de l'économie de l'espace » (Emelianoff, 2008, p.46).

Les **exemples de villes durables** se multiplient également à travers le monde. **Curitiba**, au Brésil, est souvent considérée comme une référence en termes de développement urbain durable (Cluzet, 2007). La ville a, depuis 30 ans, placé les transports en commun, et plus particulièrement ceux en site propre*, au cœur de sa politique urbaine. Dès la fin des années 1970, la ville a été une des premières à définir une stratégie environnementale pour améliorer la qualité de vie des habitants sous l'impulsion de son maire, l'architecte J. Lerner. Les principaux objectifs se sont concentrés sur les secteurs des transports (réseaux de bus), des espaces verts, de l'éducation et du recyclage. Même si la ville connaît encore des difficultés, elle est devenue, aujourd'hui, une des villes brésiliennes les moins polluées.

Un autre exemple, plus médiatique, est la construction de la ville de **Dongtan** en Chine, prévue, au départ, pour l'Exposition Universelle de Shanghai en 2010. La Chine est confrontée à de nombreux problèmes écologiques liés à une explosion démographique et industrielle, et est, de ce fait, fortement critiquée. La construction de cette ville durable visait à montrer l'engagement du pays dans le développement durable. Le projet de Dongtan prévoyait une ville verte de 15000 habitants en 2010 (Sciences et avenir, 2006). Plus précisément, la ville devait répondre aux principaux critères de durabilité. Par conséquent, la ville s'est fixée plusieurs objectifs précis notamment en termes de densité (un habitat collectif d'environ 8 étages), de santé (aération du tissu urbain) et de réduction de la consommation énergétique par une architecture bioclimatique. Malgré cela, le projet a rapidement été soumis à de nombreuses critiques. Tout d'abord, la production électrique issue des énergies renouvelables est apparue insuffisante, il a donc été prévu d'installer une centrale à charbon. Par ailleurs, de nouveaux problèmes sont survenus : la forte pollution et l'essor de l'industrie du bâtiment causé par cette construction. Parallèlement, d'un point de vue social, aucun plafond de loyer ou de prix de vente des logements n'a été prévu, faisant craindre le risque de ghettoïsation de la ville.

Pour ces raisons, le projet est, aujourd'hui, suspendu. Cependant certaines réalisations, concomitantes à ce projet, sont toujours en cours : le quartier de Xinjiang Wan au nord-est de

Les transports en commun disposent de leurs propres voies de circulation.

Le projet avait été lancé à Londres en 2005 et devait être terminé en 2010.

Shanghai ou le village écologique de Cao Tian Ba, dans le Yunnan. Il semble donc que la construction d'une ville nouvelle durable n'est pas si évidente à court terme*. Si la construction d'une ville durable ne peut se faire sur un espace presque vierge, il semble difficile d'envisager de rapides évolutions sur la durabilité des villes existantes.

Les expériences menées pour **améliorer la durabilité des villes** se sont surtout focalisées sur de plus petits espaces comme le quartier. Les expérimentations de quartiers écologiques ou durables ont été mises en œuvre :

- principalement dans les pays d'Europe du Nord : Bedzed (Sutton), Greenwich Village (Londres), Bo01 (Malmö), Hammarby (Stokholm), Kronsberg (Hanovre), Nieuwland-Amersfoort (Pays-Bas), Vauban (Fribourg), Vesterbro (Copenhague), et
- aux Etats-Unis : Cleveland Eco Village, Civano Park del Sol (Tucson), Los Angeles Eco Village, Village Homes Davis (Californie).

Ces quartiers sont souvent des projets urbains neufs, seule une minorité vise le renouvellement ou la rénovation, ce qui souligne la difficulté et/ou l'inertie des espaces urbains existants.

Malgré la pluralité géographique et thématique de ces exemples, ces quartiers ont plusieurs points communs. Ce sont, tout d'abord, des projets récents (pour la majorité, ils ont moins de 10 ans) et de taille relativement réduite (rarement plus de 100 ha), ils constituent des vitrines de la modernité, et de la qualité de vie et des modèles énergétiques.

L'amélioration de la durabilité des bâtiments ne s'effectue pas simplement dans le cadre de la construction d'un quartier écologique ou durable. En effet, le gouvernement français a lancé en 2003 les Opérations Programmées d'Amélioration Thermique Énergétique des Bâtiments. Le bâtiment est le premier instrument de la mise en place de la durabilité : réduction de la consommation d'énergie, production d'énergies, matériaux de construction écologique, recyclage des déchets, développement de la biodiversité (jardins, toits et façades végétalisés, *etc.*). Une nouvelle architecture est en train de naître appelée architecture bioclimatique, dont les principes sont des logements :

- peu consommateurs d'énergie et d'eau, à la fois lors de leur construction, mais aussi dans leur fonctionnement quotidien,
- préservant la santé, car les matériaux ne contiennent pas de substances toxiques, l'air est renouvelé et le taux d'humidité est maîtrisé
- offrant du confort thermique hiver comme été et
- inscrits harmonieusement dans le paysage environnant.

Globalement, le bilan de ces expériences a été positif. Néanmoins, certains problèmes sont encore à résoudre. L'ensemble des projets de durabilité urbaine est en effet soumis à des **surcoûts de construction** (Cluzet, 2007). En outre, une conséquence non anticipée est déjà constatée dans certains quartiers. Par exemple, au sein du quartier BedZED à Londres, le prix

d'achat d'un logement était 20% plus élevé que le prix moyen de l'immobilier dans cette banlieue. Certes, ce coût est amorti ensuite grâce aux faibles coûts d'exploitation et de production de l'énergie, mais habiter dans ce quartier représente un investissement impossible à réaliser pour certaines catégories de la population. Par ailleurs, un autre type de surcoût non négligeable est représenté par le suivi des actions, notamment les travaux d'entretien et de réparation, nécessitant de recourir à des entreprises spécialisées. La principale critique, qui peut également être faite à l'ensemble des projets urbains de durabilité, est l'opération marketing et l'utilisation « d'une vitrine écologique » notamment pour un pays comme la Chine qui abritent parmi les villes les plus polluées de la planète. Ces opérations restent extrêmement ciblées localement, et ne permettront pas d'améliorer la situation globale si aucune action n'est menée à des niveaux supérieurs.

De plus, si ces opérations ne restent que des vitrines, des éléments de communication, elles vont possiblement engendrer des effets néfastes tels que la **ségrégation sociale**. Dans la mesure où ces initiatives ne restent que des opérations exceptionnelles et rares, le prix du foncier sera à la hauteur de la réputation que ces quartiers durables ont acquise au fil du temps. « Les échanges ont lieu à toutes les échelles spatiales, et prétendre recréer des territoires quasi étanches [de par leurs autonomies énergétique et productive] peut se révéler demain être la version écologique des communautés fermées (*gatted communities*) mais pas un modèle réellement généralisable » (Cluzet, 2007, p108).

Au regard de ces éléments, il semble d'une part, que le développement durable, après avoir été associé à l'écologie, rime davantage, aujourd'hui, avec énergie. La mise en œuvre d'un développement durable urbain n'est que partielle, certaines thématiques sont toujours privilégiées, il y a encore peu de transversalité. De plus, il semble que l'articulation entre le projet (local) et son contexte ne soit pas souvent prise en compte, alors que, pour aboutir à un ensemble cohérent, il conviendrait de concevoir et d'articuler les actions en faveur de la durabilité urbaine, à différentes échelles (de la ville aux bâtiments).

La recherche sur les méthodes et les outils pour instaurer un développement durable urbain est très prometteuse, mais encore trop peu de recherches sont menées sur l'articulation des différentes échelles d'intervention.

Conclusion de chapitre

Aujourd'hui, les espaces urbains concentrent de fortes, voire de très fortes, densités de populations et de bâtiments. Le mode de croissance urbaine pratiqué jusqu'à il y a une dizaine d'années, est considéré comme incompatible avec les conditions d'un développement durable (disparition de la biodiversité, raréfaction des ressources naturelles, dégradation de la qualité de vie des habitants, *etc.*). Toutefois, toute forme de développement est un besoin naturel. Par conséquent, il est nécessaire de combiner la croissance des différents espaces afin de lutter contre leur mise en compétition, préjudiciable à chacun d'eux, en s'appuyant sur la complémentarité des différents systèmes.

Trouver l'organisation urbaine optimale dans le contexte du développement durable n'est pas chose aisée. Le développement de la mobilité (innovation dans les modes de transport et augmentation de la vitesse) ainsi que l'évolution des modes de vie des habitants ont créé un morcellement des espaces urbains. Dans ce contexte, l'alternative semble être le développement d'un **schéma multipolaire** construit autour de la notion de proximité, de densité, de compacité. Pourtant, les inconvénients d'une forme urbaine dense sont également nombreux (les coûts, les perceptions et la qualité de vie). Ce modèle ne pourra être applicable que si la proximité aux besoins des habitants est redéfinie (les espaces verts, de loisirs, les lieux de consommations *etc.*). Renouveler la proximité dans les espaces urbains implique de structurer autour du couple morphologie du bâti – morphologie du réseau dans la mesure où l'interrelation entre les deux est démontrée. Dans cette optique, E. Korsu, M-H. Massot et J-P Orfeuil (2009) ont développé le concept de **ville cohérente**. Puis, la théorie des fractales vient également enrichir la réflexion en proposant notamment d'améliorer l'accessibilité aux espaces verts et aux services de première nécessité. Ainsi, elle s'organise autour de plusieurs **pôles hiérarchisés** de manière **multiscale**.

L'objectif des villes est donc de **trouver un équilibre** entre les deux formes de développement (dense ou étalée), chacune d'elles ayant des avantages et des inconvénients. En outre, la forme urbaine, pour être durable, doit s'adapter. En effet, durabilité ne signifie pas inertie surtout appliquée à la ville. Les forces, les pressions qui y ont cours, impliquent une évolution constante de ses éléments.

Au travers de cette analyse, nous observons que l'approche urbaine est passée d'une vision monodimensionnelle et horizontale à une vision multidimensionnelle, globale et volumique. Le principal problème de l'application du développement durable au niveau local est qu'il a été imposé. Or, le développement durable ne se décrète pas. Aussi, est-il nécessaire que le dialogue et la concertation prennent désormais une place privilégiée dans le processus de développement urbain, pour permettre l'adhésion des populations concernées. Mettre la **densité** et la **proximité** spatiale au cœur de l'organisation spatiale pose des difficultés dans la mesure où elles sont perçues de manière négative. Au cours du temps, la **qualité de vie** a été **portée au cœur des débats** sur la durabilité urbaine. Les pays anglophones ont regroupé les études concernant l'interaction entre forme urbaine et environnement dans le domaine du

design urbain. La question de l'évaluation de la qualité de vie en France est traitée soit de manière qualitative, en s'appuyant sur le point de vue des habitants, soit de manière quantitative, en analysant l'accessibilité aux services de base. Même si les deux approches sont complémentaires, l'approche anglophone apporte, par ses méthodes, davantage de réponses aux problématiques actuelles.

La question de la qualité de vie renvoie à l'**optimisation des satisfactions sociétales**. Le bien-être, quant à lui, renvoie à une perception individuelle. Ces deux notions, bien que liées, ne se superposent pas ; en effet, même si la qualité de vie intervient directement sur le bien-être, l'inverse n'est pas automatique. Par conséquent, la qualité de vie correspond au niveau d'intervention le plus pertinent puisque qu'elle agit à la fois sur la sphère sociétale et sur la sphère individuelle. Cependant, il faut préciser que l'optimisation de la qualité de vie de la société ne signifie pas nécessairement l'optimisation de la somme de bien-être individuel. Améliorer la qualité de vie de la population, c'est maximiser la composante objective de celle-ci. Pour finir, il faut noter qu'un changement comportemental de nos sociétés œuvrerait pour un développement durable.

Au-delà des difficultés dans la mise en application des principes du développement durable, les **retours d'expériences** sur les projets de durabilité permettent de mettre en lumière les réussites, les freins, et les améliorations qu'il faut apporter à l'avenir. Globalement, tous les projets ont été des expériences réussies, et ce, quelle que soit l'échelle. Cependant, les gains réalisés ne sont pas toujours clairs. D'un point de vue énergétique, les résultats sont positifs tant dans le fonctionnement d'un quartier que pour les bâtiments à basse consommation, dans la mesure où ils sont intégrés à l'espace urbain existant. En revanche, les gains environnementaux sont plus mitigés et l'amélioration de la qualité sociale n'est absolument pas prouvée.

Chapitre 4. Les réponses de l'analyse spatiale aux questionnements sur la durabilité urbaine

*« The obvious questions of applicability of these ideas to real systems and real problems,
to policy and to markets »
Batty et Longley, 1996*

Ce chapitre traite des réponses de l'analyse spatiale aux problématiques nouvelles liées au développement urbain durable. Les principes d'un développement durable du territoire ont conduit les acteurs locaux à repenser les problématiques urbaines. Il est apparu au cours du chapitre précédent que l'organisation de la **ville** doit être **optimisée** de manière multiscalaire et polycentrique.

L'**analyse spatiale** offre un ensemble de **méthodes** et d'**outils pertinents** pour l'analyse de la morphologie. Ce chapitre propose d'analyser en quoi l'analyse spatiale répond à la problématique de l'optimisation des formes urbaines dans toutes leurs dimension sous l'angle de la durabilité urbaine, en générale, et sur la qualité de vie en particulier. En effet, depuis quelques dizaines d'années, les méthodes d'analyse spatiale et les SIG tentent d'apporter des solutions aux problèmes des décideurs.

Après avoir présenté les éléments du corpus théorique permettant d'assoir les concepts d'emboîtement d'échelle et d'optimisation évoqués dans le chapitre précédent, nous nous interrogerons plus spécifiquement sur l'apport de la 3D dans les travaux d'analyse spatiale. De quelle manière, cette dimension a-t-elle été intégrée dans les méthodes et dans les modèles ? Quelles sont les analyses qui ont été proposées ? Et quelles limites persistent encore ?

Les Systèmes d'Information Géographique ont fait leurs preuves pour répondre aux problématiques de développement urbain durable. Mais comment intègrent-ils la troisième dimension ? Quelles analyses sont-elles possibles ? Les avancées technologiques permettent-elles, aujourd'hui, de répondre aux nouvelles problématiques qui s'imposent aux géographes et plus particulièrement aux spécialistes de l'analyse spatiale ?

Au travers des approches individu-centré, il s'agit d'examiner comment les progrès techniques et l'amélioration de la connaissance du fonctionnement du système urbain offre de nouvelles opportunités d'analyse. Le renouvellement des problématiques urbaines émanant du concept de développement durable nécessite un changement d'échelle d'analyse et une connaissance plus fine du territoire.

1. Les ancrages théoriques : Echelle et optimisation

Au cours des chapitres précédents, il est apparu que l'espace, la forme et le développement durable nécessitent une analyse à plusieurs échelles afin d'**optimiser les configurations spatiales**. L'analyse de l'emboîtement des échelles spatiales est aujourd'hui au cœur des problématiques géographiques surtout en analyse spatiale. Les concepts liés à l'autosimilarité (les multifractales, la Théorie de la Relativité d'Echelle et la loi Constructale) offrent un cadre théorique et méthodologique permettant d'appréhender les **mécanismes multiscalaires**.

1.1. Autosimilarité et invariance d'échelle

L'**autosimilarité** est la propriété qualifiant la ressemblance morphologique des parties par rapport à l'ensemble, autrement dit l'invariance de la forme quelle que soit l'échelle. Ainsi il y a une répétition des mêmes motifs à diverses échelles d'observations (figure 56). De ce fait, les structures fractales auto-similaires sont caractérisées par la répétition de la même distribution et ce, à plusieurs échelles.

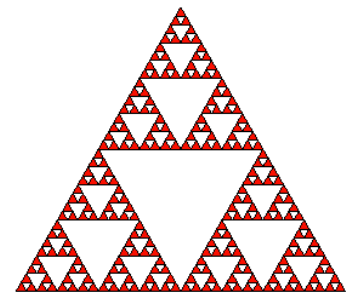


Figure 56 : Le triangle de Sierpinski.

Depuis le développement de la géométrie fractale, plusieurs travaux ont mis en évidence l'autosimilarité des formes naturelles ou anthropiques, en deux ou trois dimensions. D.L. Turcotte (Dauphiné, 1995) a analysé 60 profils topographiques qui ont montré une constance du taux hauteur-largeur à toutes les échelles que ce soit pour les milieux collinaires et les milieux montagnards. De même, P. Martin (2000) a démontré une irrégularité similaire de profil topographique, c'est-à-dire la variation d'altitude, à plusieurs échelles.

Concernant les espaces urbains, la similarité des formes n'est pas nécessairement évidente. En géographie urbaine, l'autosimilarité des formes a été démontrée avant même le développement des fractales. La théorie des lieux centraux développée par W. Christaller (figure 57), théorie expliquant l'organisation économique et spatiale des villes, illustre parfaitement le principe d'autosimilarité (Batty et Longley, 1994, Tannier et Pumain, 2005). Celle-ci appliquée aux espaces urbains ne signifie pas la répétition de la même forme mais l'alternance d'espaces libres et occupés. Autrement dit, cette propriété des fractales dans le cadre de l'espace urbain est la répétition de la distribution spatiale hiérarchique des éléments à travers les échelles, comme l'illustre le modèle de Christaller par la répartition des lieux centraux par la concentration locale des éléments (Tannier et Pumain, 2005).

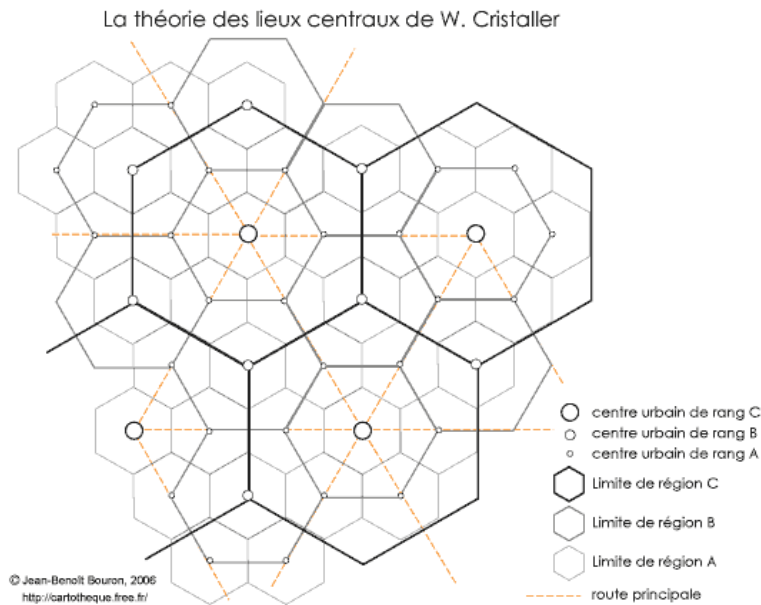


Figure 57 : Schématisation de la théorie des lieux centraux
Source : [8].

En outre, certaines interactions de base telles que le prix du sol et l'accessibilité, créent des distributions spatiales apparemment différentes mais qui sont en fait similaires dans l'agencement des pleins et des vides* (Tannier et Pumain, 2005, p.5). En effet, l'autosimilarité entre formes locales au niveau microscopique (le bâtiment, l'îlot) et formes au niveau macroscopique (l'organisation spatiale de la ville) peut être plus ou moins forte. Elle se décompose en trois types (Tannier, 2009). L'**autosimilarité stricte** convient aux formes fractales qui répondent strictement à la définition donnée ci-dessus. La **quasi-autosimilarité** est une fractale étant approximativement identique à différentes échelles, c'est-à-dire que les éléments sont identiques à la fractale entière mais présentent une forme distordue. Enfin, l'**autosimilarité statistique** correspond aux objets qui possèdent les mêmes caractéristiques numériques ou statistiques à travers les échelles. « Une ville fractale n'est donc pas forcément une ville qui répète la même forme à différents niveaux d'analyse : elle répète simplement la même logique de disposition des éléments les uns par rapport aux autres, cette logique pouvant être complexe ou aléatoire » (Tannier, 2009, p.157).

Selon la géométrie fractale, l'autosimilarité se produit à l'infini. Cependant des limites ont été observées dans la réalité. En 1991, R.F.Cahalan (Dauphiné, 1995) a notamment démontré que la relation surface-périmètre des strato-cumulus suit une loi de puissance unique et obéit à un principe d'autosimilarité, par contre les cumulus de types différents ne possèdent pas la même dimension fractale et donc pas d'effet d'autosimilarité. De même, la **dimension fractale des formes urbaines n'est pas constante à toutes les échelles**, il existe un seuil au-delà duquel la dimension change (Tannier et Pumain, 2005). A ce propos, M. Guérois (2003) considère que l'indicateur de densité n'est pas approprié à la description des structures fortement hiérarchisées et fragmentées des villes. Cette hiérarchie repose sur la reproduction de

Some basic interaction principles involving land prices, accessibility, etc. lead to spatial distributions of elements which seem apparently different, but which are actually similar in terms of the way in which free and occupied places alternate through the scales

structures identiques à différentes échelles selon le principe d'autosimilarité interne décrit ci-dessus.

Cette déviation aux principes de la géométrie fractale a conduit au développement d'un nouveau concept et d'une nouvelle théorie. A. Dauphiné (1995) et C. Tannier et *Alii* (2011) voient dans l'analyse des **multifractales** une solution pour comprendre les objets qui ne répondent pas strictement au principe d'autosimilarité. P. Martin (Martin, 2008, Forriez et Martin, 2006a, 2006b, Forriez et *Alii*, 2009) propose d'explorer la Théorie de la Relativité d'Echelles.

1.2. La Théorie de la Relativité d'Echelle

Le physicien, L. Nottale, propose avec la Théorie de la Relativité d'Échelle (TRE) un modèle correspondant à un espace-temps-djinn* à cinq dimensions c'est-à-dire les trois dimensions de l'espace classique, auxquelles s'ajoutent une pour le temps et une pour les échelles. Cette nouvelle théorie interroge la question des optimums multiscalaires : « il faut nous demander comment une optimisation locale s'insère dans une articulation globale ? Est-ce que l'*optimum* global ne doit intégrer que des *optimums* locaux ? La somme des *optimums* locaux est-elle un *optimum* global ? » (Martin, 2008, p.1).

Toutefois, il faut distinguer espace-temps-djinn et espace-temps-échelle car ce sont deux représentations possibles d'un espace-temps fractal.

- L'**espace-temps-échelle** permet de décrire les échelles de la même manière qu'une transition de second ordre. Dans ce modèle, la dimension fractale est constante, il y a donc une invariance d'échelle, cependant elle reste une variable secondaire par rapport au temps et à l'espace.
- Par contre, l'**espace-temps-djinn** considère une dimension fractale variable de même importance que l'espace et le temps. Le terme djinn définit l'idée d'une loi de variation de la dimension fractale, donc une covariance d'échelle.

La différence entre les conceptions de la TRE et des fractales s'appuie sur celle de la définition de la forme : L. Nottale se fonde sur la structure interne de l'objet comme s'il le définissait de l'intérieur, alors que B. Mandelbrot l'aborde par sa limite, par sa seule extériorité.

L'intérêt de cette théorie pour la géographie est qu'elle fournit un support théorique au concept majeur en géographie : l'**emboîtement d'échelles**. Dans le chapitre 1, l'imbrication entre forces – formes – espace – échelles a été illustré (figure 3). Ainsi, « chaque fois que l'on zoome sur un élément de l'espace, une nouvelle structure apparaît, complètement emboîtée dans une autre avec, par exemple, de la plus petite échelle à la plus grande : le système solaire, la Terre, les plaques continentales (ou océaniques), les unités morpho-sédimentaires, *etc.*, mais aussi, les associations régionales comme l'Europe, les pays comme la France, les

Djinn est le nom donné par L. Nottale à la dimension fractale devenue variable.

régions comme PACA, *etc.*, ou encore, l'homme, le globule rouge, la molécule, les particules, *etc.* » (Martin, 2006a, p.298).

Dans le paragraphe précédent, nous avons expliqué que les phénomènes et les objets naturels ne se déployaient pas à l'infini et donc à toutes les échelles. Tout objet géographique est encadré par une échelle inférieure à partir de laquelle l'objet n'est plus observable et une échelle supérieure à partir de laquelle l'objet se dilue dans un espace plus vaste (Martin, 2006a). Par conséquent, l'échelle, au sens de rapport de taille, permet d'articuler les discontinuités fondamentales de l'espace car elle fixe une des conditions d'existence de l'objet.

Les applications en géographie proposées par M. Forriez et *Alii* (2009) visent à analyser différentes formes de dimensions variables.

La répartition des chefs-lieux de communes dans le Nord de la France peut être considérée comme un **ensemble de points de dimension topologique égale à zéro**. La distribution de ces points présente localement des regroupements, des espacements ou des alignements. La problématique posée est la suivante : sur quelles bases scalaires se constitue cette distribution spatiale. Les auteurs constatent qu'il s'agit d'un modèle avec deux transitions fractales/non fractales.

- La première se manifeste aux grandes échelles : comme cela a été expliqué ci-dessus, l'objet se dilue dans l'espace car l'information a atteint sa résolution minimale.
- La deuxième correspond à une échelle de coupure virtuelle expliquée par la taille de l'information prise en compte : « au-delà d'un certain carré, on va toujours compter le même nombre de carrés contenant de l'information quelle que soit la taille du carré » (Forriez et *Alii*, 2009, p.7).

Cette analyse permet de montrer que le regroupement principal des habitations sur un territoire communal, surtout dans le Nord de la France, est particulièrement dense et correspond aux anciens territoires agricoles relativement peuplés. Par conséquent, même si ce territoire a connu deux siècles d'industrialisation, l'organisation spatiale précédente perdure encore.

La deuxième analyse porte sur les **éléments linéaires** dans un **espace topologique à deux dimensions*** : le réseau hydrographique amont et pérenne des Gardons dans les Cévennes. Les résultats obtenus montrent deux domaines dont l'un correspond aux plus grandes échelles et l'autre, aux plus petites. Par contre, la transition fractale/non fractale s'effectue sur une plus petite gamme d'échelles que celle de la distribution des chefs-lieux. La coupure obtenue sur les petites échelles peut également être considérée comme virtuelle et liée à la taille de la résolution des données. En effet, l'irrégularité du réseau disparaît à un seuil de résolution donnée.

Cet espace ne tient pas compte des hauteurs.

Le troisième exemple s'appuie sur une **forme auréolaire** : la ville d'Avignon, dont la surface bâtie est définie comme étant le négatif du réseau intra-urbain. Dans cet exemple, les données utilisées sont très précises puisque la résolution équivaut à un mètre. Les résultats indiquent une loi avec deux transitions, les échelles de coupure sont : un mètre aux grandes échelles et trois kilomètres aux petites échelles, mais sont également toutes deux virtuelles. En effet, en deçà d'une certaine échelle, l'étude évolue d'une problématique urbaine vers une problématique architecturale et au-delà, l'objet d'étude change avec la transition vers le domaine urbain et le domaine rural.

Cette analyse ne porte pas encore sur des éléments morphologiques à trois dimensions topologiques. Toutefois le développement récent de cette théorie et l'apport majeur qu'elle procure à l'analyse géographique permettront sans aucun doute de nouvelles analyses. Par exemple, elle pourrait être utile dans le développement de règles scalaires entre les tissus urbains. L'analyse fractale (Guérois, 2003) et l'application de la TRE sur Avignon (Forriez et Alii, 2009) appliquée aux villes a permis d'identifier deux structures majeures ayant leur propre logique : celles du centre et de la périphérie. Ces deux formes sont les deux tissus urbains les plus différenciées en termes de densité et de volume urbain. Une analyse plus fine des transitions d'échelle des formes intra-urbaines serait intéressante. Dans le cadre de ce travail de thèse, ces éléments permettent de borner l'échelle d'analyse à l'intra-urbain.

Le problème lié à la limite de la résolution spatiale est très important, de même que la problématique du MAUP (paragraphe 3.1.2 de ce chapitre). Lorsque qu'une étude sur les formes intra-urbaines en trois dimensions est menée sur l'ensemble d'une ville, une coupure virtuelle pourrait apparaître si la résolution utilisée n'est pas assez fine.

Cette théorie et ses applications peuvent avoir un impact majeur sur la compréhension des phénomènes et des objets géographiques, mais sa complexité ne permet pas d'envisager des applications opérationnelles à court terme.

1.3. Vers une modélisation opérationnelle : l'optimisation

1.3.1. Apport de la géométrie fractale au concept d'optimisation

L'approche par la géométrie fractale permet d'aborder des problématiques d'aménagement et d'urbanisme ayant pour but d'améliorer la qualité de vie par l'optimisation des formes urbaines.

Pour P. Martin (2008), l'optimisation peut être envisagée en premier lieu au travers du **Principe de Moindre Action** développé par Moreau et de Maupertuis : « la nature agit toujours par les voies les plus simples et les plus courtes [...] qui minimisent la dépense de la nature, c'est-à-dire l'action ». Par exemple, il a été démontré que les lieux de forte fréquentation pédestre sont de forme complexe, irrégulière et qu'ils contiennent des éléments dont les limites sont tortueuses (Genre-Grandpierre et Frankhauser, 1998, Genre-Grandpierre

et Foltête, 2003). Ainsi, l'optimal de certaines formes ne correspond pas, voire s'oppose, aux formes régulières et compactes où les éléments ont davantage de tracés rectilignes.

G. Maignant (2009, p.48) note que « dans la nature, par définition, tout ce qui existe dans le monde physique et biologique est là parce qu'il s'est révélé viable, adapté à la survie ». Pour Huyghe (1971, p.402), ce processus d'adaptation de la nature ne suit pas une loi d'économie mais de gaspillage, mais la nature possède « un pouvoir de sélection propre à compenser ce gaspillage *etc.* ». Elle accroît les possibilités afin de multiplier les solutions tout en leur appliquant un « facteur correctif » ou, en d'autres termes, un choix dirigé. Elle minimise ses efforts par la recherche d'un *optimum*. Par ce renouvellement constant de la maximisation des possibilités et du choix qu'elle opère, elle cherche constamment son amélioration par un **accroissement qualitatif**. Au cours de son évolution, elle maximise les possibilités de développement afin d'optimiser sa croissance.

De ce fait, « cela revient à se demander si se tenir éloigné de fonctionnements correspondant à des structures naturelles peut être durable ? » (Martin, 2008, p.1) car « les conditions d'adaptation des systèmes biologiques et végétaux peuvent servir de modèles d'optimisation pour les sociétés » (Maignant, 2009, p.38). Imiter les conditions de maintien des systèmes écologiques et biologiques semble une solution, mais cela sera sans doute difficile à mettre en œuvre. Tout d'abord, il s'agit plutôt d'améliorer la mise en relation entre les différents systèmes vivants afin de ne pas les compromettre à long terme. Ainsi, l'Homme va devoir s'adapter à son milieu naturel. Cependant, l'état du milieu naturel dans quelques décennies est incertain, de même que les besoins des hommes. Autant d'incertitude rend la définition d'un *optimum* difficile.

Dans cette logique, C. Genre-Grandpierre et P. Frankhauser (1998) ont montré en s'appuyant sur la géométrie fractale que la forme urbaine optimale est irrégulière lorsqu'elle répond simultanément à plusieurs critères d'**optimisation**. Par exemple, la ville dense, au sens fractale, peut cumuler proximité des espaces naturels et accessibilité aux services (figure 58).

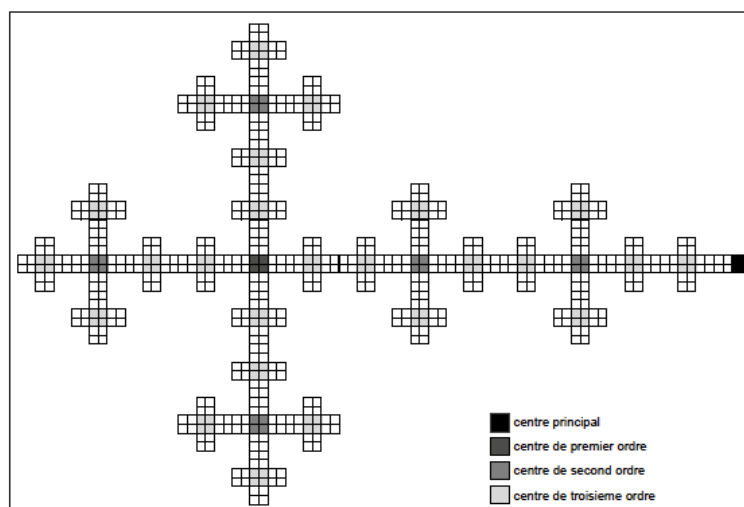


Figure 58 : Reconstitution de la forme de la ville optimale grâce à la géométrie fractale (Genre-Grandpierre et Frankhauser, 1998).

1.3.2. La méthode constructale : l'optimisation sous contraintes

La loi Constructale a été proposée par A. Bejan et développée en France par S. Lorente (2006). Pour A. Bejan, les formes ne sont pas le résultat d'un processus aléatoire, mais sont construits du plus petit vers le plus grand élément (Bejan et Lorente, 2006). Autrement dit, « ce n'est pas par fragmentation que les formes s'engendrent mais par construction et optimisation, etc. » (Science et vie, 2003). Il s'inscrit donc en faux par rapport à la théorie de fractales.

Cette loi met en relation les formes des systèmes naturels et les structures créées par les ingénieurs afin d'optimiser la circulation des flux au sens d'un système. Elle propose donc un *design constructal* qui permet de répartir les résistances de manière optimale. Par conséquent la finalité de cette loi est de trouver un optimum entre un objectif qui se veut global (la circulation d'un fluide) et les contraintes locales (les résistances).

La méthode Constructale s'appuie sur trois principes développés dans les paragraphes précédents (Maignant, 2009). Deux exemples permettront d'illustrer l'intérêt de cette méthode pour l'analyse géographique.

- G. Maignant (2009) propose d'appliquer cette méthode pour optimiser les formes urbaines en tenant compte de contraintes environnementales.
- D. Moreno (2009) insiste davantage sur le lien qui existe entre la croissance des réseaux urbains par le système de transport et les systèmes d'écoulement décrit par A. Bejan.

La première étape de la méthode consiste à trouver le système élémentaire le plus optimal possible, autrement dit la forme optimale du plus petit volume ou surface élémentaire disponible. Cette méthode rappelle la **recherche du volume élémentaire représentatif** en physique et géologie. Dans l'espace urbain, le volume élémentaire représentatif est l'élément de volume qui, au point matériel P est statistiquement représentatif d'un voisinage infinitésimal en ce point.

Cette étape prend également son sens pour l'analyse géographique car la plus petite échelle spatiale (locale) dans laquelle se situe une société complète contient l'intégralité des logiques de la dimension spatiale de la société en question (cf. chapitre 1).

La recherche de *sous-optimums* locaux peut s'effectuer de deux manières complémentaires illustrées sur la figure 59 (Maignant, 2009).

- Soit une démarche ascendante permet d'analyser comment les propriétés des entités microscopiques (satisfactions individuelles) se combinent pour donner naissance à des propriétés macroscopiques (satisfactions collectives). Par exemple d'un point de vue opérationnel, le principe de la démocratie participative correspond à cette démarche, comme l'analyse des trajectoires individuelles ou des choix résidentiels dans la ville (Thériault et Des Rosiers, 2008b).
- Soit la démarche descendante permet d'analyser comment les propriétés macroscopiques (les principes d'un développement durable) conditionnent en retour les propriétés des entités microscopiques (un développement urbain durable).

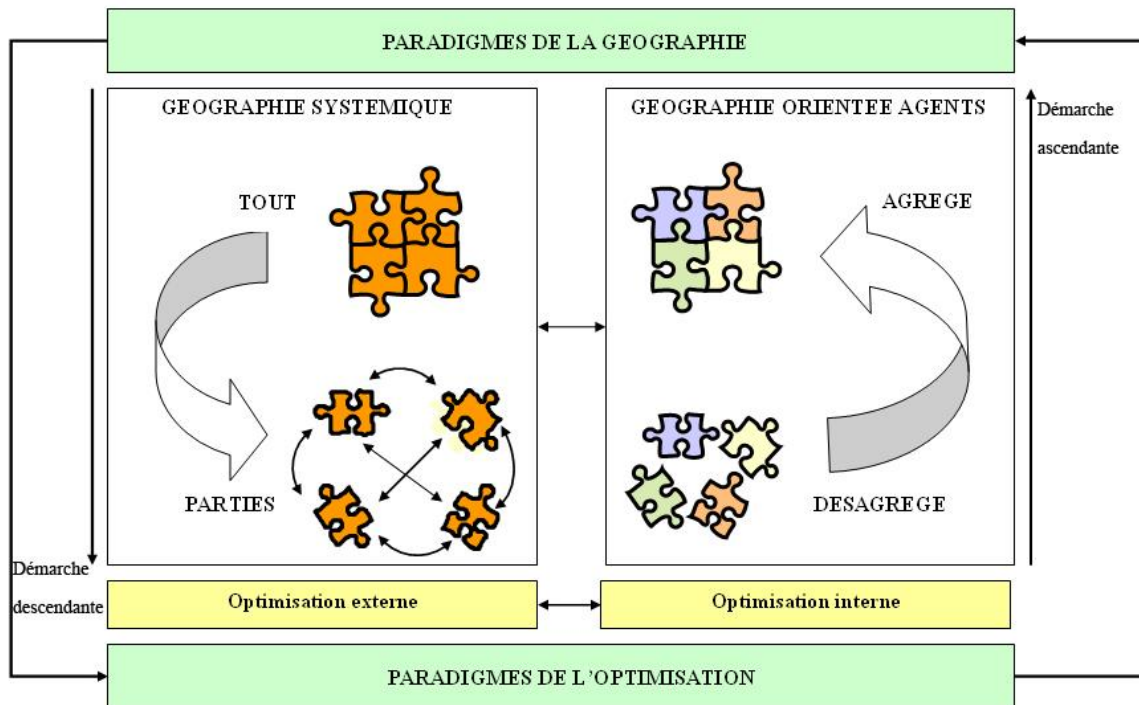


Figure 59 : Paradigme de la Géographie et de l'optimisation (Maignant, 2009).

Pour G. Maignant (2009), le système élémentaire optimal au regard des propriétés aérodispersives est le « pâté de maison ». Dans le cadre de l'analyse des flux de transports, le système élémentaire correspond à l'origine et la destination des individus (soit le domicile et les lieux de travail, de loisir, les commerces *etc.*).

Les **systèmes élémentaires optimaux** (*sous-optimums*) sont ensuite **assemblés** pour produire l'optimum global. À chaque échelle, les contraintes et les objectifs fixés au début de la démarche doivent être répartis pour optimiser les systèmes. Puis, un opérateur scalant d'optimalité permet de gérer le rapport entre les différentes échelles et entre les différents *optimums*. Le processus optimisation, c'est-à-dire l'assemblage des systèmes optimisés, doit permettre de définir des *optimums* à une échelle qui ne contraignent pas les *optimums* des échelles supérieures ou inférieures.

Selon ce principe, les « pâtés de maisons » sont regroupés au fur et à mesure de l'extension urbaine jusqu'à obtenir l'émergence de la ville optimale souhaitée, comme illustrée sur la figure 60 (Maignant, 2009).

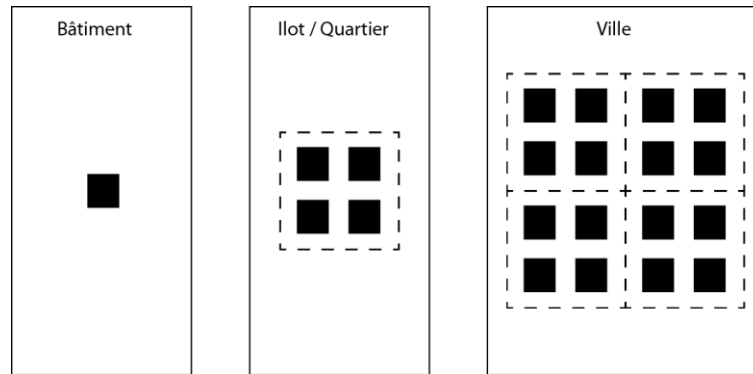


Figure 60 : Schématisation de la recomposition des formes urbaines selon la méthode Constructale (Sevenet, 2013).

Cet exemple est assez facile à comprendre, cependant la recherche de l’optimalité dans les zones urbaines peut s’avérer moins intuitive. Comme le rappelle G. Maignant, 2009, (p.54) « en géographie, l’optimum global n’implique pas nécessairement l’optimum local et inversement. [...] En effet, des pratiques locales en faveur d’un développement durable peuvent parfaitement se retrouver contre-productives à d’autres échelles ». En effet, l’exemple présenté figure 61 montre que l’amélioration de la mixité à l’échelle de la ville ne résulte pas seulement de l’augmentation du nombre de quartiers dits mixtes, car elle peut s’accompagner d’un renforcement de la ségrégation dans les quelques quartiers restants dits non-mixtes (Dutozia, 2004).

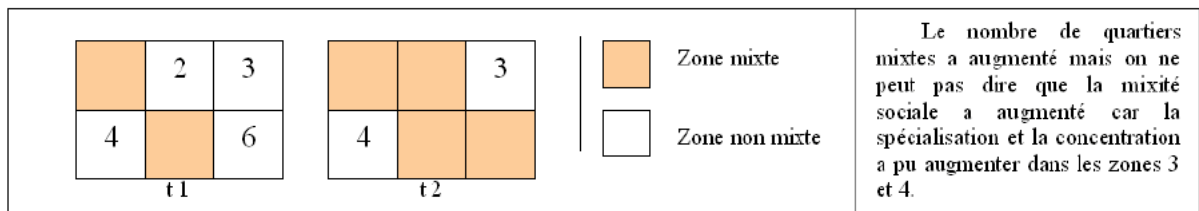


Figure 61 : Echelles urbaines et évaluation de la mixité sociale (Dutozia, 2004).

De plus, la figure 62 indique que le regroupement d’îlots non-mixtes (q3 et q4) peut produire des quartiers mixtes (Q4) au même titre que des îlots mixtes (q1 et q2) mixtes produisent des quartiers également mixtes (Q1).

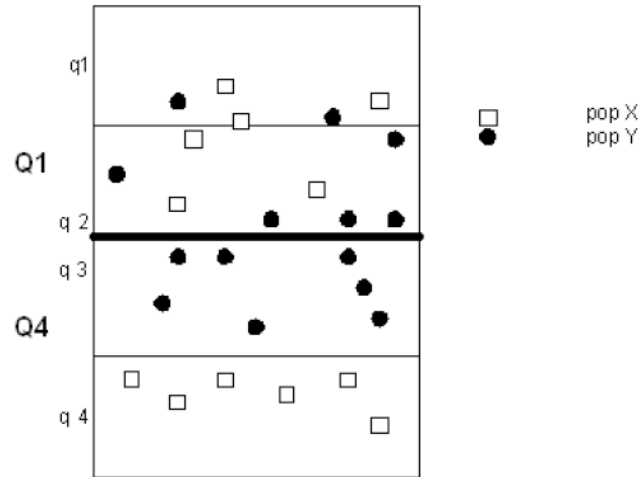
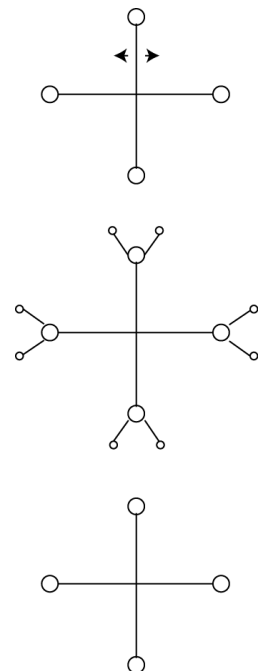


Figure 62 : Exemple de répartition sociale différenciée en fonction des niveaux d'analyse (Dutozia, 2004).

Pour suivre la méthode Constructale, un objectif final est fixé pour lequel les imperfections et contraintes sont distribuées de manière optimale. Le principe n'est pas de nier ni de corriger les imperfections d'un système mais de mieux les distribuer dès la mise en œuvre de celui-ci, afin d'obtenir la solution la moins non-optimale (Bejan, Lorente, 2006), et donc finalement la plus durable.

D. Moreno (2009) fait un parallèle entre l'*optimum* du système d'écoulement développé par A. Bejan et celui du système de transport urbain, à travers l'histoire des villes. Il décrit trois situations correspondant au développement urbain et de l'automobile. Pour chacune d'elle, une contrainte est proposée pour construire la configuration.

- Si l'aire d'influence d'un centre urbain est constante, autrement dit si les distances n'augmentent pas, les habitants adoptent des transports plus rapides et les infrastructures s'adaptent à la croissance des flux engendrés. Par exemple, après le Moyen-âge, la morphologie urbaine s'est adaptée pour faciliter la circulation intra-urbaine.
- Si la capacité du réseau ne peut être pas augmentée et que les vitesses de circulation sont limitées, la structure urbaine doit s'adapter pour couvrir un territoire de plus en plus grand. Au cours du XX^{ème} siècle, la ville moderne a atteint ses limites et s'est donc étalée.
- Si l'emprise urbaine est constante et que les vitesses sont limitées, les infrastructures de transport voient leur capacité se réduire afin de libérer de l'espace. Ce modèle correspond à celui de la ville contemporaine régulée par des politiques urbaines contraignantes qui visent à limiter les vitesses de déplacement, tout en contrôlant l'étalement urbain.



Le premier principe de la méthode Constructale est de construire chaque élément de manière optimisée pour composer un Tout optimal. Cela ne signifie pas que la somme des parties est égale au Tout mais que l'ensemble des éléments d'un système possède son propre fonctionnement, qu'il faut optimiser ; même si, pour cela, certaines parties élémentaires ne sont pas optimales.

1.3.3. La ville durable naît-elle des quartiers durables ?

Ce paragraphe propose le développement d'un exemple d'application de la méthode constructale. L'objectif de G. Maignant (2009) est de rechercher une **optimisation de formes urbaines sous contraintes** environnementales (essentiellement qualité de l'air). Avec cette application, la loi Constructale est très rapidement transposable puisqu'elle vise à optimiser géométriquement les flux dans un système en minimisant les résistances de leur circulation. De ce fait, elle est particulièrement bien adaptée à l'écoulement de l'air dans la canopée urbaine*. Suivant le principe constructal pour l'optimisation de la circulation de l'air en milieu urbain, il faut **limiter le cumul de facteurs aggravants** la pollution (le regroupement des rues étroites et/ou d'activités polluantes) en les redistribuant spatialement. Ainsi, les **concentrations moyennes** au sein d'un quartier **sont réduites**, de même que sur le reste de la ville.

G. Maignant utilise ce terme qui nous semble tout à fait adapté dans la mesure où il définit normalement la partie supérieure de la forêt en contact direct avec l'atmosphère.

L'idée de la loi Constructale est alors de partir d'une forme élémentaire, ici un **îlot** de bâtiments et de rues (des exemples sont illustrés en ANNEXE C). La première étape consiste à optimiser cet îlot selon les propriétés aéro-dispersives, puis d'assembler ces formes en une plus grande surface et continuer jusqu'à obtenir la ville optimale souhaitée (figure 54 et figure 63).

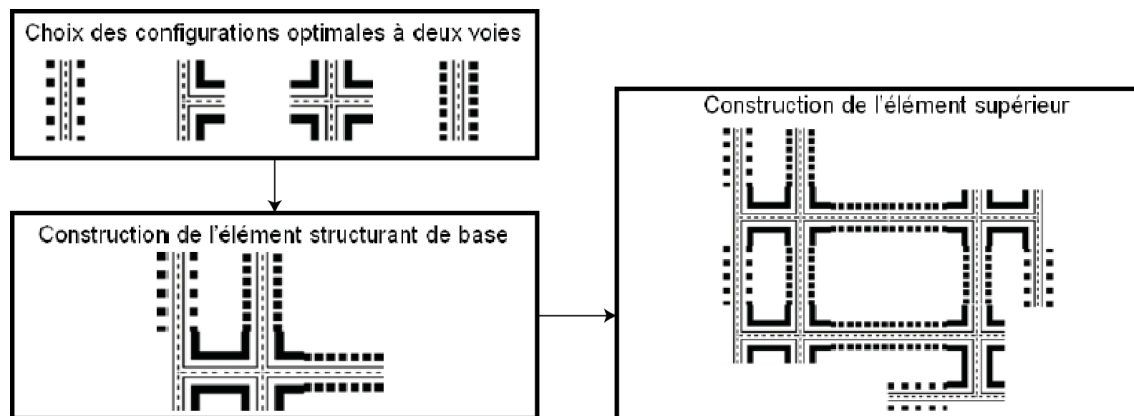


Figure 63 : Exemple de processus constructal d'élaboration d'un quartier optimal d'un point de vue dispersion de polluants (Maignant, 2009).

La somme optimisée des formes élémentaires constitue la base du processus d'optimisation. Cependant, cette méthode n'est pas construite uniquement sur la simple addition de ces éléments, mais sur l'imbrication de ces formes élémentaires et le résultat de leur optimisation aux différentes échelles. Dans le processus d'assemblage des formes élémentaires, la somme est également optimisée pour répondre aux contraintes du niveau supérieur. La figure 63

illustre le processus d'assemblage de quatre morphologies élémentaires dont la seule contrainte est de ne pas créer des zones favorables à l'accumulation de polluants. La forme construite issue de ce premier niveau d'assemblage doit ensuite suivre la même règle d'optimisation pour atteindre le niveau supérieur *etc.*

Rappelons que selon le principe de la loi Constructale, le processus d'assemblage des formes élémentaires optimisées produit une forme globale, elle aussi optimale. Cependant, l'**optimum absolu n'existe pas**, il est toujours défini par rapport à une finalité, elle-même fonction de choix individuels et d'un mode d'élaboration spécifique (Martin, 2008, Maignant, 2009).

Le processus d'optimisation sous contraintes rappelle que la solution optimale ne l'est pas nécessairement pour tous. Ainsi, la ville durable est en fait la ville la moins non-durable possible. En ce sens, le processus d'optimisation de la ville doit tenir compte de **degrés de durabilité** ou de moindre non-durabilité (Maignant, 2009).

Dans l'exemple cité ci-dessus, l'auteur a produit 98 formes élémentaires de rues correspondant aux différents types de morphologies présents en Europe (ANNEXE C) et hiérarchisés selon leur degré d'optimalité.

Les résultats de cette recherche indiquent que la configuration morphologique durable, la compacité, ne l'est pas du point de vue de la qualité de l'air. La solution optimale définie est un compromis : elle propose le comblement des dents creuses d'un seul côté de la rue. Disposer de formes et de leur degré d'optimalité permet à l'aménageur de bâtir plusieurs projets les moins non-durables possibles en hiérarchisant les contraintes urbanistiques réelles.

La question de l'articulation des échelles pour l'optimisation du système urbain ayant été posé, il s'agit de lister les données disponibles et leur résolution pour réaliser une étude de la durabilité de l'espace urbain en trois dimensions.

2. Les avancées technologiques alimentant la réflexion de l'analyse spatiale

Dans cette sous-partie, nous examinerons comment les développements technologiques contribuent à faire émerger de nouvelles problématiques en géographie et plus particulièrement en analyse spatiale.

2.1. Vers la THRS : données, précisions, échelles

Cette partie aborde une réflexion sur l'information géographique. De quelle information géographique dispose-t-on aujourd'hui ? Quels sont les outils existants ? Que reste-il à améliorer ?

Les progrès de la télédétection font partie des éléments majeurs qui ont permis l'**évolution des données** 2D vers la 3D. Il faut tout d'abord rappeler que « la télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information » (CCTS, 2010). La multiplication des modes de prises de vues aériennes ou satellitaires témoigne d'une croissance des besoins en données géographiques. Les images produites par les satellites, par le Light Detection And Ranging (LIDAR) ou les photographies aériennes sont autant de moyens pour produire des données géoréférencées à haute voire très haute résolution spatiale. En effet, les données résultant de ces modes de captures peuvent avoir une résolution infra-métrique.

Une telle résolution des images a permis de produire en parallèle des données sur la troisième dimension (altitude et hauteur des objets décrits au sein des modèles numériques de terrain ou d'élévation). La construction de **données tridimensionnelles** permet de disposer d'informations **extrêmement précises** et plus **exhaustives** sur l'espace et ainsi, de poser de nouvelles problématiques et d'y répondre.

La production de données de plus en plus détaillées et désagrégées permet de **s'affranchir de la pratique du terrain**. En effet, la télédétection est l'unique moyen de collecter facilement une masse importante de données à différentes échelles sur une ville. Jusqu'à il y a peu de temps, la hauteur des objets spatiaux notamment urbains, était mesurée *in situ*. Il n'est donc plus nécessaire d'arpenter les rues pour collecter ces données grâce à ces nouvelles technologies.

Les données tridimensionnelles issues d'images peuvent être fournies sous différents formats : raster ou vecteur. Les méthodes, les traitements et les analyses déterminent théoriquement l'utilisation de tel ou tel format. De plus, ces deux types de mode de représentation ont chacun leurs avantages et leurs inconvénients. La précision nécessaire en milieu urbain rend les représentations maillées (raster) particulièrement lourdes ; inversement,

la restitution automatique de modèles 3D de bâtiments sous forme polyédrique (vecteur) reste encore aujourd'hui imparfaite (Fuchs et *Alii*, 2002).

2.1.1. Les types de données disponibles

Le **mode raster** « utilise une description matricielle de l'espace géographique » (Puissant, 2003, p.45). La matrice est formée par un maillage régulier carré composé de cellules (pixel). Chaque cellule ou pixel traduit un attribut ou une valeur numérique qui représente un phénomène.

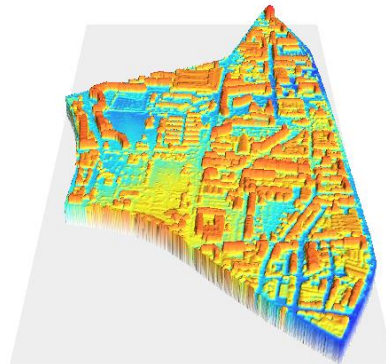
Deux types d'images sont plus fréquemment utilisés : les photographies aériennes et les images satellites. Rappelons qu'une image correspond à une représentation graphique d'une énergie électromagnétique reçue par un capteur, quel que soient la longueur d'onde ou le dispositif d'acquisition utilisé. Une photographie désigne plus particulièrement toute image captée et enregistrée sur une pellicule photographique. Ainsi, les photographies n'enregistrent habituellement que des longueurs d'onde entre à 0,3 et 0,9 μm soit le domaine du visible et infrarouge réfléchi (Puissant, 2003, CCTS, 2010). Cependant, le développement du numérique permet aujourd'hui, de percevoir l'ensemble de l'énergie électromagnétique.

Il faut préciser que les images ne se limitent pas aux photographies aériennes et aux images satellites, les cartes et les tableaux de données spatiales peuvent devenir des images (figure 16). La recherche de méthode permettant de restituer parfaitement la réalité en 3D à partir d'image aérienne se développe rapidement grâce à l'amélioration de la précision des images issues de la télédétection. A. Puissant (2003, p. 170) rappelle que le **passage de la HRS à la THRS** s'explique car « à une résolution décimétrique, le paysage sur une image peut être considéré comme « une texture » drapée sur un relief à basse fréquence spatiale (lissé, aplati) ; par contre, à une résolution métrique (et décimétrique), des variations d'altitude à haute fréquence spatiale apparaissent. Ainsi les faces cachées (bâtiments, arbres), les ombres portées et la troisième dimension des objets deviennent visibles. L'apparition de cette information **3D** correspond aux **résolutions inférieures à 3-4m** (taille moyenne des objets urbains). »

Parallèlement, la monoscopie permet d'utiliser une unique prise de vue pour déduire le relief d'une zone, c'est. Cette technique se base soit sur un modèle d'éclairage pour déduire le relief d'un objet (*shape from shading*) soit sur les ombres portées (*shape from shadow*). Néanmoins, le plus souvent, la stéréoscopie est utilisée, c'est-à-dire plusieurs prises de vues. Cette technique se rapproche de ce que fait le cerveau lorsqu'il perçoit des images.

Les données sur l'altitude des objets sont traitées sous forme de **Modèle Numérique de Terrain** (MNT), **de Surface** (MNS) ou **d'Élévation** (MNE). Aujourd'hui, les travaux de recherches s'orientent sur les reconstructions de MNE vectoriels, mais cela pose encore des nombreux problèmes techniques. De ce fait, les MNE « raster » sont plus courants (figure 64). Dans tous les cas, un MNE décrit l'altimétrie d'un objet (le sol et ce qu'il y a au-dessus

du sol – appelé sursol). L'altimétrie dans un MNE « raster » est décrite pixel par pixel, et la résolution est comprise entre 5cm. et 1m. (Ortner, 2004).



**Figure 64 : Modèle Numérique d'Élévation produit par InfoTerra
Résolution : 1 mètre, Date : 2000.**

À partir des années 90, les systèmes LASER ou LIDAR ont commencé à se démocratiser. Cette technique utilise une impulsion laser en direction du sol et mesure la différence de temps entre l'émission de l'impulsion pour déduire la distance entre le sol et l'appareil de mesure. Le résultat obtenu est un nuage de points 3D décrivant la surface du sol. Malheureusement ce système a encore un coût très élevé (Ortner, 2004).

Le **mode vecteur** permet de représenter un objet le plus fidèlement possible. Dans ce modèle de données « l'espace des coordonnées est continu et non discrétisé. Les objets géographiques sont représentés par des polygones, des lignes ou des points. Ces objets sont associés à des éléments réels du milieu » (Puissant, 2003, p.44). Les données vecteurs sont souvent issues de traitement d'images raster et peuvent présenter une topologie.

Moins consommatrices d'espace, la production de données vecteur, et notamment la détection des bâtiments en 3D à partir d'image aérienne et satellite, est devenue un axe de recherche majeur (Chehata, 2002, Fuchs, 2002, Taillandier, 2004, Ortner, 2004, Lafarge et Alii, 2005, 2006, 2008). Comme le signale F. Fuchs (2002, p.17), « la restitution automatique de modèles 3D de bâtiments, sous forme polyédrique, est un **problème très difficile** sur lequel de nombreuses équipes travaillent (ou ont travaillé) depuis plusieurs années ». En effet, les travaux sur ce thème de recherche sont nombreux, ils s'orientent tous vers **l'amélioration de la qualité des modèles (MNE) et reconstruction de scènes urbaines**, comme le laboratoire I3S (INRIA, CNRS, UNSA) au travers du projet Ariana. « L'objectif [de ce projet] est de fournir des outils de traitement des images, dans le but d'aider à la résolution des problèmes inverses dans le domaine de l'observation de la Terre et de la cartographie, en particulier aérienne et satellitaire »*. Les laboratoires MATIS (méthodes d'analyses et de traitement d'images par la stéréo-restitution), COGIT (conception objet et généralisation de l'information topographique) ou encore l'Ecole des Mines de Paris souhaitent également

Les problèmes inverses cherchent à déterminer les causes d'un phénomène à partir des observations expérimentales de ses effets.
Source : (10]

développer des méthodes de plus en plus puissantes pour fournir des modèles de scènes urbaines approchant le plus possible la réalité.

Les données tridimensionnelles, au format vecteur, sont donc envisageables aujourd'hui. Néanmoins, il faut préciser que la 3D peut être prise en compte de différentes manières. Nous développerons dans un autre paragraphe ce propos mais nous présentons ici les différents types de données sur la hauteur des objets afin de préciser les bases de données existantes car « si on peut aujourd'hui intégrer la troisième dimension, les applications travaillant sur ses liaisons avec les aspects descriptifs et géométriques, sont limitées par des restrictions dues à la modélisation plus ou moins performante » (Bordin, 2006, p.67).

2.1.2. Les données désagrégées

La production de données tridimensionnelles se généralise, cependant, la difficulté liée aux coûts de production limite l'exhaustivité spatiale de ces bases de données. Seul l'IGN propose une base de données dans laquelle la hauteur est un attribut (2D1/2). Depuis plusieurs années, l'IGN (2001) développe un Référentiel à Grande Echelle afin de répondre aux nouvelles problématiques et aux nouveaux besoins des acteurs du territoire. Le référentiel à grande échelle regroupe plusieurs composantes:

- des informations photographiques (BD ORTHO®)
- des informations topographiques (BD TOPO®)
- des informations cadastrales (BD Parcellaire®)
- des informations de repérage (BD ADRESSE®)

La composante image (raster) est constituée d'orthophotographies dont la résolution est de 50 cm., les zones urbaines, de par leur complexité, bénéficient d'une meilleure résolution de 10 à 30 cm. La composante cadastrale informe sur les limites des parcelles issues du Plan Cadastral Informatisé. Ainsi, cette base de données existe dans les deux formats : BD PARCELLAIRE® Image (plan cadastral numérisé) et BD PARCELLAIRE® Vecteur (plan cadastral vectorisé à partir des images).

Les autres composantes sont constituées de données au format vecteur. La composante de repérage regroupe l'ensemble des adresses ponctuelles sur tout le territoire national ainsi que le réseau routier. La composante topographique décrit le territoire national en trois dimensions à la précision métrique. Autrement dit, elle permet la description géométrique des éléments topographiques du territoire : les réseaux ferrés et routiers, les limites administratives, les bâtiments, l'altimétrie, les équipements, l'occupation du sol et la toponymie. Le thème « bâtiment » nous intéresse plus particulièrement dans le cadre des applications que nous développerons.

Grâce au RGE, l'IGN passe de l'inventaire à l'analyse du territoire. En effet, l'analyse en 3D, éclairée par la modélisation et la simulation d'aménagement ou d'aléas, permet de répondre aux nouvelles exigences en matière d'aménagement, d'urbanisme et de développement durable : notamment, améliorer la vie quotidienne des habitants, procéder à de la

géoprospective, aider à la prise de décision par une meilleure compréhension du fonctionnement de l'espace urbain.

Le RGE présente l'avantage d'être une base de données complète pour l'analyse du territoire mais manque de précision pour une modélisation réaliste du territoire. De ce fait, l'IGN développe actuellement une base de données de la volumétrie des bâtiments associée à un MNT très précis : BATI-3D®. Présenté comme un « formidable outil de communication », BATI-3D®, offre une modélisation 3D des zones urbaines dans laquelle la navigation en temps réel est possible (IGN, 2010a). Ce type de produit s'associe au progrès de la modélisation de la réalité virtuelle car en plus de la composante géométrique 3D des bâtiments, les façades sont texturées à partir d'images aériennes.

Parallèlement, l'IGN propose d'ajouter aux images aériennes, des images terrestres avec le développement d'un équipement Stéréopolis, une caméra haute résolution qui « image » les façades, la voirie et le mobilier urbain. À partir de ces images, l'IGN propose des « Modèles Numériques de Façades, des orthoimages de façades pour la texturation des modèles, des modèles de gouttières et des Modèles Numériques de Marquages Routiers pour le recalage fin de véhicule en milieu urbain » (Paparoditis et Alii, 2006, p.23).

En revanche, dans le domaine démographique et socio-économique, il n'existe pas de collecte systématique d'information selon le degré de verticalité, ce qui, par exemple, s'avère préjudiciable à l'appréciation d'un sujet tel que la ségrégation sociale verticale.

2.2. Les Systèmes d'Informations Géographiques: Utilité et limites

2.2.1. L'aspect multicritère et multiscale des SIG

L'utilisation de plus en plus importante d'informations spatialisées par des non-spécialistes a permis la généralisation des SIG.

Il faut noter que le développement rapide des SIG a entraîné une certaine ambiguïté sur le terme. La première définition française émane de l'économiste M. Didier qui le définit comme « un ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision ». Les Américains, quant à eux, les définissent comme « un système informatique de matériels, de logiciels, et de processus conçus pour permettre la collecte, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à référence spatiale afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion » (IGN, 2010b).

Dans cette thèse, un SIG est entendu comme un « Système informatique de matériels, de logiciels et de processus, conçu pour permettre la collecte, la gestion, la manipulation et l'affichage de données à référence spatiale, afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion.» (Comité fédéral de coordination inter-agence pour la cartographie numérique, Bordin, 2006).

À partir de ces définitions, le développement des SIG en 3D s'oriente vers **trois finalités** (figure 65) plus ou moins complexes mais qui tendent dans tous les cas à fournir une aide à la décision :

- offrir une « **bonne** » **visualisation** du réel
- **mettre en relation** des objets pour faire de l'analyse spatiale
- procéder à de la **simulation**

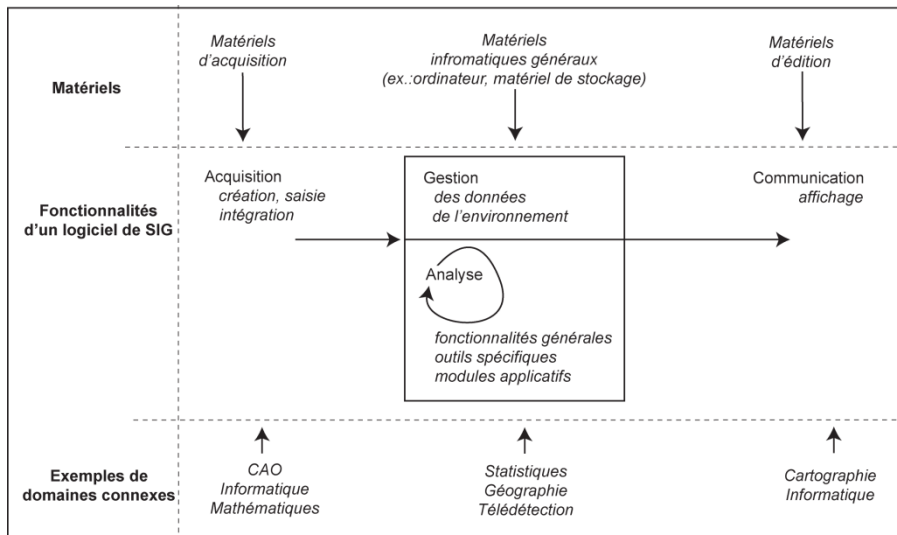


Figure 65 : Environnement des fonctionnalités SIG (Bordin, 2006).

D'un point de vue opérationnel, les SIG sont le plus souvent utilisés comme un outil d'archivage et de collectes de données afin de faire un inventaire et définir un état du territoire. Ainsi, la principale fonctionnalité du SIG est la cartographie. Pourtant, les SIG offrent d'autres fonctionnalités.

L'objectif est donc de dépasser les seules exploitations visuelles pour étudier les relations spatiales existant entre des informations ou des lieux voisins, et peut-être en déduire de nouvelles informations. En effet, « On a introduit avec les SIG, une étape conceptuelle supplémentaire : l'objet n'est plus traduit par une primitive pour laquelle on définit une représentation graphique, ni défini par l'association d'une primitive et d'un code nature caractérisé graphiquement. L'objet devient un objet géographique formé d'une composante géométrique, que l'on choisit de représenter graphiquement et d'une composante descriptive » (Bordin, 2006, p21).

Les relations spatiales entre les objets sont définies par une topologie. « Une information topologique est une information invariante par homéomorphisme, qui entre dans une analyse spatiale » (Bordin, 2006, p76). Elle porte sur la géométrie, mais ne concerne que les propriétés comme le voisinage, l'intersection, l'inclusion, la connexion, *etc.* Ainsi, la topologie donne une information sur le positionnement relatif des objets entre eux, alors que la géométrie donne une information de positionnement absolu lié à un référentiel.

L'apport des SIG grâce à ces deux composantes (attributaire et topologique) permet de procéder à des analyses simples grâce à un langage de requête. Autrement dit, il permet de mettre en lumière des objets, en fonction de ses attributs. Les requêtes simples sont donc outils d'observation de la composante géométrique ou sémantique et permettent de faire des inventaires et analyses thématiques.

Il existe également des requêtes plus complexes, assimilées aux fonctionnalités d'analyses, qui permettent de déduire et de calculer de l'information. Ces fonctions d'analyses sont souvent issues des modèles de l'analyse spatiale, par exemple l'autocorrélation spatiale (Bordin, 2006). Au-delà des fonctionnalités classiques du SIG – création/intégration et gestion des données, le couplage d'outils spécifiques ou de modèles applicatifs d'analyse spatiale permet de développer l'ensemble des méthodologies et des applications au sein du même environnement ; et ainsi, d'éviter les problèmes de compatibilité et d'interopérabilité de logiciels.

Nous concluons sur les différentes fonctionnalités des logiciels SIG. Pour mémoire, un SIG permet l'acquisition, la gestion, l'analyse et la visualisation de l'information géographique. L'acquisition peut être constituée de données créées ou saisies (digitalisation, modélisation des données – attributaire ou géométrique) et de données intégrées (import, géocodage *etc.*). L'ensemble des données acquises est ensuite géré au sein de l'environnement (système de référencement, échelle, visualisation) au moyen de requêtes (attributaires ou spatiales) simples. Lorsque l'objectif est de créer et de déduire de nouvelles informations, les fonctions d'analyse et de traitement sont sollicitées. La première forme de traitement est l'analyse thématique, c'est-à-dire la discrétisation de variables en fonction de leurs attributs et la visualisation de résultats. Les requêtes utilisées à ce niveau se complexifient, par exemple il est possible d'effectuer des requêtes topologiques – union, intersection, jointure sont utilisées, des calculs de distances et de caractéristiques géométriques (aire, périmètre...). Les logiciels SIG ont également développé des outils spécifiques aux traitements de certaines données (raster, 3D, GPS) et aux besoins des utilisateurs (calcul d'itinéraire, suivi en temps réel, mesure de l'irradiation solaire). Les analyses permettent donc de produire de nouvelles informations qui pourront être par la suite diffusées dans un objectif de communication de projet. Les logiciels permettent dans cette optique de mettre en valeur les résultats produits par la cartographie et la possibilité d'exporter dans un grand nombre de formats (Bordin, 2006). Dès lors, l'environnement SIG ne peut être considéré comme une boîte noire (Longley et Batty, 1996).

Du point de vue de l'analyse spatiale, l'espace est considéré comme un ensemble de lieux ou d'unités spatiales localisées, dans lesquels sont recherchées les relations entre la position spatiale de cet ensemble et les propriétés locales (cf. chapitre 1 paragraphe 4). Dans le cadre de cette recherche, la localisation est nécessairement tridimensionnelle. De plus, l'analyse spatiale cherche à déterminer les règles générales dans l'organisation de l'espace, et plus précisément, dans ce travail de recherche, en quoi la morphologie participe au fonctionnement

du système urbain et interagit avec lui. Cette problématique de l'analyse spatiale renvoie à la définition principale de la modélisation et du modèle dans la mesure où elle **met en évidence les formes** et les **structures spatiales** récurrentes de l'organisation de l'espace géographique. Cet objectif est mis en œuvre dans un chaînage de méthodes dans un environnement SIG.

2.2.2. SIG et modélisation 3D

Dans certaines disciplines comme la géologie, la géomorphologie ou l'hydrologie, l'objet d'étude n'est pas visible. À ce propos, Lachance (2005) explique que « les études géologiques commencent généralement sur le terrain puisqu'elles sont basées sur l'observation directe des phénomènes ». La modélisation tridimensionnelle est un apport considérable par rapport aux traditionnelles cartes et coupes géologiques. Tout d'abord, elle permet de représenter les deux dimensions simultanément : l'extension horizontale et la profondeur. Ensuite, la modélisation tridimensionnelle numérique s'appuie sur des outils mathématiques robustes et automatisés permettant une représentation réaliste à partir de données ponctuelles. Dans ce cas de figure, le terrain et sa représentation précise, simule une **forme de réalité virtuelle** qui est nécessaire pour la compréhension et la connaissance des objets.

Pour les objets visibles, la problématique est légèrement différente, dans la mesure où les données sont accessibles de manière exhaustive sur le terrain : néanmoins, certains facteurs doivent être pris en compte dans la modélisation urbaine en 3D (Shiode, 2001). En premier lieu, des facteurs internes doivent être évalués comme le degré de réalisme, les données utilisées, le degré de fonctionnalité, les possibilités d'analyses supplémentaires. Puis, des facteurs externes tels que les résultats attendus, le type de client et le coût.

Un certain nombre de chercheurs ont mis en avant le problème principal que l'on rencontre avec la modélisation 3D. Les méthodes de modélisation se sont développées tout d'abord dans le domaine de la DAO pour la représentation et la visualisation. Dans les SIG, il existe une distinction entre l'espace et les objets modélisés. Selon, RIG (2006), la dimension d'un objet renvoie au nombre d'axes nécessaires pour localiser des points les uns par rapport aux autres à l'intérieur de cet objet. En d'autres termes, c'est l'espace occupé par l'objet lui-même et pas par son rectangle englobant. Donc si l'on considère qu'il existe des dimensions de l'espace et des dimensions d'un objet, celles de l'espace sont toujours au nombre de 3 tandis que celles de l'objet sont au nombre de 0, 1, 2 ou 3 (RIG, 2006). Dans les SIG, les dimensions correspondent à celles de l'Univers tandis que dans la CAO, les dimensions d'un objet se mesurent en fonction de la dimension de l'espace qui l'englobe.

Ce type de modélisation n'avait pas pour vocation d'analyser les objets et de les mettre en relation. Puis, se sont développés les SIG qui permettent, eux de mettre en relation des bases de données, mais également de procéder à de l'analyse spatiale, mais qui ne gèrent pas la modélisation 3D. Cependant, la modélisation la plus utilisée dans les SIG est appelée **2D_{1/2}** ; elle correspond au stockage d'un attribut Z dépendant de la position X et Y des points d'un objet (Loubier, 2004). Cette méthode de modélisation est limitée pour analyser la relation spatiale entre les objets et même représenter certains éléments. Une évolution récente vers la

2D_{3/4} permet d'intégrer l'épaisseur des objets en stockant une altitude minimale et maximale (ex. BD TOPO®)

La solution proposée par B. Cambray (1994a) pour l'exploitation de la troisième dimension est encore la plus efficace. Elle consiste à représenter simultanément une couche en 2D, 2D_{1/2} et en 3D à l'aide de la relation topologique « posée sur ».

- La couche 2D correspond aux objets dont l'altitude n'est pas une propriété indispensable à la représentation.
- La couche 2D_{1/2} restitue la morphologie du terrain.
- La couche 3D permet de représenter des objets complexes pour lesquels l'altitude d'une propriété indispensable à leur représentation.

La principale difficulté est que les **opérations de topologie** ne peuvent être exécutées. Cela explique pourquoi les SIG du marché ne proposent pas de topologie spatiale à partir d'environnement 3D. En effet, l'analyse spatiale repose tout d'abord sur l'information métrique. Cette information est mesurée par des calculs s'appuyant uniquement sur les coordonnées des objets et, généralement, ils sont simples à réaliser : distance/orientation, longueur/périmètre/surface/volume, pente et visibilité. Mais l'analyse spatiale utilise également l'information topologique, liée aux données géographiques, qui est beaucoup plus complexe à traiter. L'analyse spatiale grâce à la topologie cherche à identifier les relations d'un objet par rapport aux autres objets de son environnement. La topologie est une branche des mathématiques qui étudie les déformations spatiales par des transformations continues (ex : la translation, la rotation et le changement).

Le développement des SIG est concomitant à celui du paradigme de la complexité. Ces

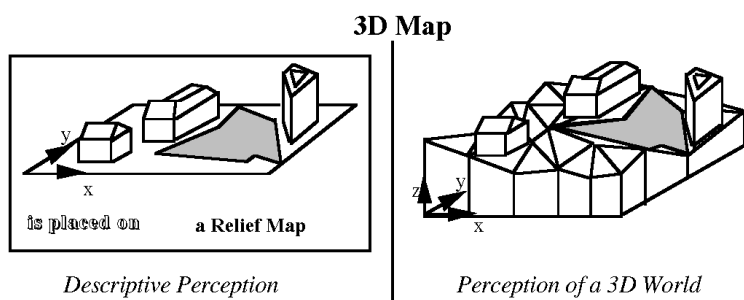


Figure 66 : Dualité de la perception de la carte 3D
(De Cambray, 1994a)

derniers permettent d'une certaine manière d'appréhender les phénomènes complexes et multidimensionnels. La modélisation a pour finalité d'expliquer la structure interne des phénomènes ainsi que leurs interactions. À la fin des années 1970, l'essor des théories et de la modélisation systémiques s'est accompagné du développement de nouveaux concepts et de principes de formalisation pour la structuration des données, leur gestion, mais aussi celle de

l'information spatiale et a-spatiale (thématique). François Bouillé (Pirrot, 2004) proposa alors, dans le cadre de sa thèse, d'utiliser la théorie des graphes et des hypergraphes, la topologie, et la théorie des ensembles pour appréhender les structures internes de l'information spatiale et thématique.

Aujourd'hui, dans les SIG, l'information spatiale est structurée selon un modèle topologique* à deux niveaux (figure 67). La topologie de réseau décrit, en premier lieu, la relation entre les

Il existe un autre modèle appelé spaghetti. Dans ce cas, chaque segment ou polygone est décrit indépendamment des autres. De ce fait, certains points et segments peuvent se superposer, se chevaucher, ou au contraire être séparés sans qu'aucun lien n'existe entre eux.

objets linéaires par leurs extrémités (appelées nœuds). Chaque segment (appelé arc) possède un nœud de départ et un nœud d'arrivée permettant de connaître la relation entre deux arcs, ainsi que son sens. Ensuite, la topologie de voisinage permet, à partir des arcs d'un polygone, de connaître ses voisins.

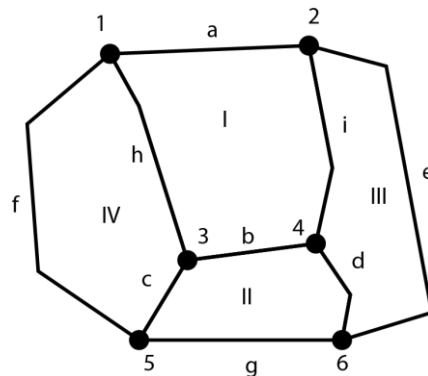


Figure 67 : Topologie dans un SIG (IAAT, 2003).

D'un point de vue technique, la structuration topologique grâce à ses propriétés de déformations continues permet lors d'une modification géométrique d'un objet de modifier aussi la forme de ses voisins. En parallèle, l'utilisation d'un modèle topologique garantit de garantir un niveau de qualité lors de la création des données. En effet, il existe une seule limite entre deux polygones, tous les arcs qui doivent être connectés le sont (IAAT, 2003).

Si le modèle topologique est bien défini, les SIG offrent par suite plusieurs outils d'analyse topologique sous forme de requêtes spatiales. Cinq types de relations ont été identifiées : proximité, intersection, inclusion, égalité et adjacence mais il existe plusieurs façons de déterminer les relations topologiques entre deux objets. Au cours des quinze dernières années, certaines propositions ont été faites (Lachance, 2005) : le modèle des quatre intersections par Pullar et Egenhofer, le modèle des neuf intersections de Egenhofer et Herring, et la « Dimension Extend Method » de Clementini.

Néanmoins, ces outils ont très vite montré leurs limites dans l'analyse spatiale en 3D, dans la mesure où les solutions logicielles ne permettent ni de stocker des objets volumiques ni d'utiliser des opérateurs géométriques 3D. Ainsi, une partie de la recherche s'oriente vers l'intégration d'opérateurs géométriques (métriques et topologiques) 3D dans les SIG (Billen et Zlatanova, 2003, Lachance, 2005), dans la mesure où les CAO n'ont pas cette vocation et permettent uniquement d'utiliser des opérateurs métriques.

L'opérabilité des SIG du point de vue de la troisième dimension a considérablement évolué. Les opportunités de ces outils sont nombreuses : base de données, modélisation informatique 3D *etc.* Néanmoins, du point de vue de l'analyse spatiale, ils restent encore limités. Les opérateurs topologiques, essentiels à l'analyse des interactions spatiales, ne gèrent que deux dimensions.

Pourtant, les outils proposés dans l'environnement SIG suffisent aux traitements envisagés dans ce travail. Pour l'analyse des impacts du volume urbain sur la durabilité urbaine, on peut s'appuyer sur les outils proposés.

3. Des données agrégées aux données désagrégées

Les perspectives offertes par les données à notre disposition, de nos jours, sont nombreuses. Méthodes, modèles et analyses réalisés à une échelle micro, s'appuient sur des données désagrégées et visent de plus en plus à l'analyse des comportements. En géographie, l'analyse des comportements doit faire émerger l'organisation spatiale qu'ils induisent mais qui les modèle également.

3.1. *Méthodes et modélisation d'analyse micro intégrant l'individu dans le cadre du développement durable.*

3.1.1. Emergence de l'approche individu-centré

Avec le transfert des **compétences en aménagement du territoire** de l'Etat vers les **collectivités locales** ont été transférées **aux acteurs locaux**, les pratiques d'urbanisme et d'aménagement ont évolué (cf. chapitre 3). Les collectivités sont de plus en plus demandeuses de partenariat avec les chercheurs. Devant l'artificialisation croissante de l'espace, et plus particulièrement l'urbanisation, la recherche en sciences humaines (géographie, sociologie, histoire, *etc.*) a focalisé l'attention sur l'espace urbain et ses dégradations.

Les monographies ont donc cédé très rapidement la place aux modèles urbains (cf. paragraphe 2.2 de ce chapitre). Les premières analyses urbaines se sont attachées à comprendre les relations entre les éléments constitutifs de la ville (économiques et sociaux), mais ont mis de côté le fonctionnement global du système urbain. Comme le notent, M. Thériault et F. Des Rosiers (2008, p.16), sur le « plan conceptuel, on sait que la ville peut être vue comme un ensemble de systèmes complexes imbriqués dans les mécanismes de fonctionnement résultant de la conjonction et de la concurrence de processus d'actions individuels [...] qui, une fois agrégés, peuvent fort bien aboutir à des résultats contre-intuitifs et à des conséquences globales plus ou moins néfastes pour l'agglomération urbaine des habitants : pollution, congestion, étalement, iniquité, ségrégations... ». Plus généralement, rappelons que des phénomènes interagissant à une échelle peuvent produire des phénomènes contre-intuitifs à une autre.

Aujourd'hui, la difficulté est de **comprendre ces processus d'actions individuels** sans lesquels l'explication du système urbain reste partielle. En effet, comme nous l'avons expliqué précédemment, certaines données ou certaines informations spatiales sont inexistantes ou difficiles à obtenir, sauf au prix d'un long et coûteux travail de terrain. Que ce soit pour une raison technique (précision et résolution des images, capacité informatique, *etc.*) ou éthique (protection des informations individuelles), les données disponibles sont souvent agrégées. Ce fait a entraîné un certain nombre de problèmes : l'erreur écologique, l'erreur factorielle ou encore les dérives spatiales dans l'analyse de l'autocorrélation (Thériault et Des Rosiers, 2008a).

Aujourd'hui, les **nouvelles technologies** en lien avec les **progrès de l'informatique**

permettent une maîtrise renforcée de l'information géographique. Par conséquent, il devient possible d'analyser l'impact des phénomènes géographiques sur le déroulement des processus individuels qui transforment les territoires car prendre en compte l'échelle micro, c'est connaître le **fonctionnement de l'individu en fonction de son territoire**. De ce fait, « l'ambition ultime consiste à prévoir (et non prédire) l'évolution des systèmes urbains évalués dans une perspective d'équité sociale et intergénérationnelle. » (Thériault et Des Rosiers, 2008a, p.278). Aujourd'hui, le degré de précision insufflé dans la modélisation est tel, que le développement de la réalité virtuelle est en construction. La technologie n'étant plus un obstacle, le niveau de désagrégation dépend de la problématique. D'ailleurs on assiste également à une désagrégation des unités spatiales permettant l'analyse. Puisqu'à travers la durabilité des territoires, semble émerger le quartier comme unité spatiale de référence (écoquartier/quartier durable).

Ces avancées, notamment les **données sur la volumétrie des objets urbains**, offrent de nombreuses opportunités d'analyses : la différenciation de l'espace urbain (la ségrégation verticale), l'analyse de la visibilité, des ambiances urbaines, de l'efficacité énergétique, donc de la qualité de vie *etc.* Les méthodes présentées ci-dessous portent essentiellement sur la qualité de vie. La différenciation verticale n'est pas encore une dynamique importante de l'espace urbain car la nécessité de densification n'est que très récente. Il faudrait, selon nous, suivre les évolutions sociales de la ville en ce sens dans la mesure où ce phénomène s'est déjà produit.

3.1.2. Le MAUP et la question de l'unité spatiale pertinente pour l'analyse de la durabilité urbaine

Une lecture et une analyse à plusieurs échelles exigent « une description fine de la réalité afin de maîtriser parfaitement le processus d'agrégation des données » (Thériault et Des Rosiers, 2008a, p.121). Ainsi, les analyses multiscalaires ont conduit à la construction de **données et de méthodes désagrégées** présentées dans la première partie de ce chapitre. Aujourd'hui, certaines informations sur l'environnement urbain (morphologie, climatologie) sont disponibles à une échelle très fine. Néanmoins, les données sociodémographiques ou celles concernant la mobilité sont référencées dans un maillage administratif qui ne convient pas toujours à l'observation des dynamiques urbaines. Ceci soulève de nouveau les Problèmes de l'Aire de l'Unité Modifiable (MAUP).

Tout d'abord, se pose la question du **choix de l'échelle d'analyse** des phénomènes géographiques car selon l'unité spatiale de référence choisie les résultats obtenus peuvent être différents. Parallèlement, le MAUP souligne le problème d'**agrégation des unités spatiales** et donc des données. En effet, des combinaisons différentes d'un nombre donné d'unités spatiales peuvent aussi produire des résultats très différents, car ces combinaisons produisent des formes différentes (Batty et Longley, 1996).

La nature des systèmes de zonages n'est pas divine ni fixe et ni unique* (Openshaw et Taylor, 1981); ainsi les données (micro) peuvent être agrégées en fonction de différentes unités spatiales. Plus les unités spatiales sont vastes, plus les données sont agrégées et moins elles expriment la variabilité intrinsèque des phénomènes étudiés surtout les processus socio-économiques. Une part importante de l'information est perdue à l'intérieur des unités spatiales (Charleux, 2005).

If the nature of zonage systems were such that they can be regarded as divinely given so that their constituent zones are uniquely meaningful fixed entities, there would be no problem.

L'analyse des données s'appuie sur des **unités spatiales arbitraires et modifiables**. S'il n'existe pas d'unité spatiale standardisée, les résultats des analyses dépendent (en partie tout au moins) de l'unité spatiale utilisée. S. Openshaw et P.J. Taylor (1981) soulignaient, que les résultats obtenus ne mesuraient pas uniquement la variation d'une quantité étudiée mais également les propriétés de l'unité du maillage qu'ils avaient imposée pour faire la mesure. « Le MAUP affecte les traitements statistiques car les résultats peuvent varier selon la forme et la finesse du maillage de collecte des données. La variance statistique des données n'exprime alors que la variabilité entre les unités spatiales et non la variabilité intra. Plus précisément, le MAUP intègre trois aspects majeurs qui interviennent dans les résultats de l'analyse statistique (Mahfoud et Alii, 2007). D'une part, à une échelle donnée, l'information de chaque objet spatial est la moyenne de l'information contenue dans les entités de base composant les objets, ce qui induit un risque de perte d'information selon le niveau d'agrégation retenu. D'autre part, comme l'a montré S. Openshaw dès 1984, pour un même nombre d'unités, les valeurs de différents modèles statistiques peuvent varier considérablement. En outre, le nombre de données et leurs distributions spatiales et statistiques jouent également un rôle non négligeable. A fortiori, l'analyse des données tridimensionnelles est concernée par ces trois aspects.

La figure 68 illustre différents volumes bâtis calculés à différents niveaux d'agrégation. L'analyse des informations issues de ces images produit divers messages. Lorsque l'on traite du volume bâti, le choix de l'unité spatiale dépend de la problématique traitée : l'analyse des densités pour la planification ou de la rugosité des formes urbaines ne se traitent pas à la même échelle car elles nécessitent une précision différente. L'analyse de la circulation des fluides au sein de l'espace urbain s'appuie sur l'étude de l'agencement des pleins et des vides ; de ce fait une connaissance précise des bâtiments et de leur position par rapport aux autres éléments est essentielle.

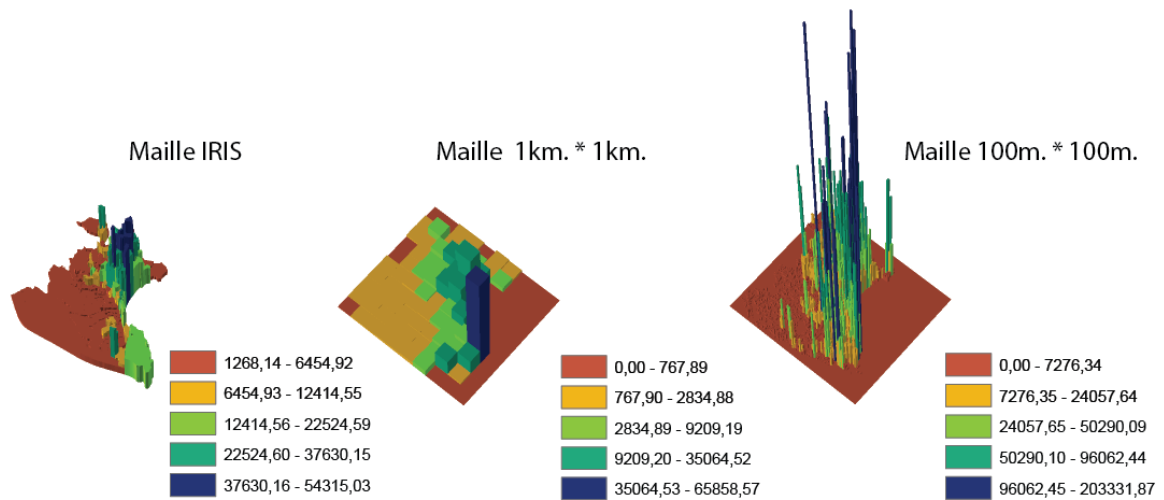


Figure 68 : Volume bâti moyen calculé à plusieurs échelles (Sevenet, 2013 d'après les données IRIS et BD TOPO®).

Le problème du MAUP est en quelque sorte démultiplié par la prise en compte ou non, sur une même unité de surface, d'informations liées à la verticalité, telles que les infractuosités existantes. Les différences se manifesteront alors en termes de rugosité, avec des incidences notables dans la modélisation de la circulation des fluides (air, pollution, sons...). De même l'analyse du comportement d'un phénomène, telle que la dispersion/concentration d'un polluant dans une rue, sera très différente selon la maille volumique considérée : bâtiment considéré en tant que bloc et délimité verticalement par la hauteur du toit ou bâtiment découpé en maille de hauteur régulière et intégrant la forme de la façade. Rares sont les prises en compte aussi précises de la morphologie intra-urbaine, et permettant de disposer, de facto, des données pour tester les effets du MAUP et son comportement en 3D.

Évidemment, le problème ne se pose pas si aucune donnée agrégée n'est utilisée. Les seules données fiables seraient-elles donc les **données désagrégées à la personne** ou au bâtiment ? La multiplication des données individuelles et ponctuelles permet en partie de s'affranchir des contraintes d'agrégation des phénomènes urbains. Mais le plus souvent les données sont déjà agrégées à la source, par les producteurs de données, en France, en raison de la protection des données individuelles (CNIL). Parallèlement les données agrégées présentent d'autres avantages : réduction de la taille des bases de données, analyse spatiale à l'échelle meso ou macro car les phénomènes géographiques naissent à cette échelle.

Pour choisir l'échelle d'analyse, il est nécessaire de sélectionner un système d'unité spatiale approprié. La figure 69 illustre deux exemples de modification d'une variable morphologique en fonction de l'échelle : d'une part, la surface est représentée à une maille de 100m. x 100m. puis 1km. x 1km. ; d'autre part, le volume est représentée sur les deux mêmes maillages.

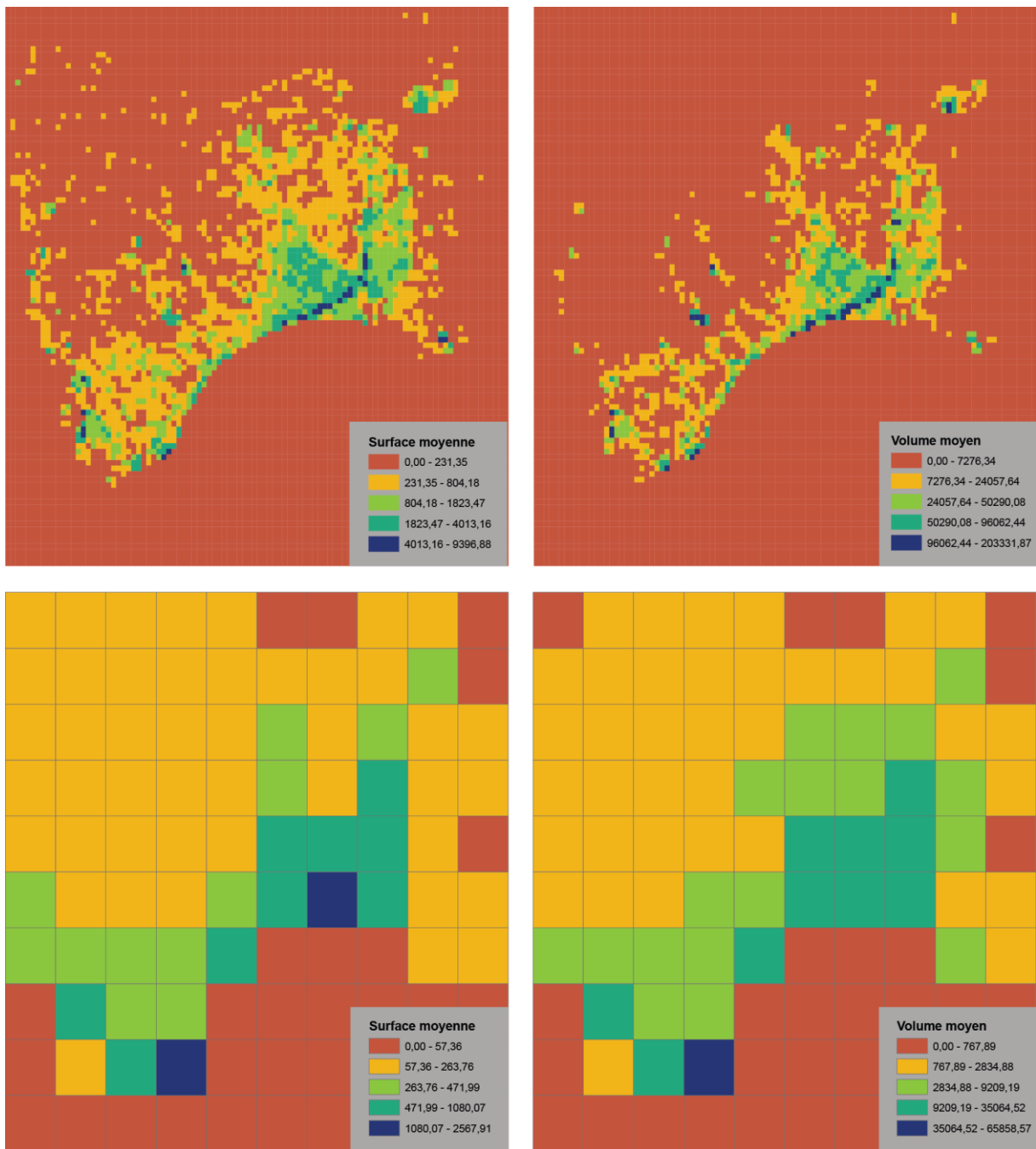


Figure 69 : Surface et volume moyens calculés à plusieurs échelles (Sevenet, 2013 d'après les données IRIS et BD TOPO®).

S. Openshaw (1981) est un des premiers à avoir proposé une procédure heuristique efficace (coefficient de corrélation, régression) qui peut optimiser n'importe quelle fonction générale en manipulant systématiquement le système d'unité spatiale. La méthode qu'il propose est de définir des unités spatiales propres à l'objet de recherche. Parallèlement, une autre méthode consiste à estimer le poids de l'effet de l'agrégation dans l'évaluation de la valeur des estimations statistiques. En ce sens, I. Mahfoud et *Alii* (2007) ont proposé une méthode pour étudier la diversité intra des données agrégées. « Un indice de végétation sur une image SPOT 5*5 mètres de résolution est calculé (image 1). Puis, est créée une image répartissant

aléatoirement ces mêmes pixels observés sur une zone de même taille (image 2). Deux images extrêmes sont également utilisées pour comparaison : une image de la diversité nulle (tous les pixels ont la même valeur, image 0) et une image de diversité « maximale » (tous les pixels sont différents, image 3). Les images 1 et 2 sont découpées en grilles de différentes résolutions, croissantes et imbriquées. Considérant les pixels de l'image initiale contenus dans chaque maille, 3 indices de diversités sont calculés. Les résultats donnent les moyennes, médianes et distributions statistiques des valeurs de diversité des mailles de chaque image. Ils permettent de mesurer l'ampleur et l'évolution de la sensibilité de ces indices à travers les échelles et selon les types d'images. Les écarts et les rapports entre les valeurs des diversités des trois séries sont examinés. Le concept d'« échelle pertinente » est alors introduit ». Cette échelle correspond à la résolution spatiale à laquelle l'écart entre la répartition observée et celle aléatoire est le plus grand, là où la diversité expliquée par l'espace est la plus discriminante.

Si l'on applique exactement les techniques et les choix décrits à une échelle, à un découpage différent, les résultats ne seront pas les mêmes. Par contre si l'on applique la méthode dans son ensemble (c'est-à-dire opérer des choix de techniques en fonction des données dont on dispose, de concepts, et de concordance des résultats sur le terrain), alors l'approche est robuste. C'est la différence fondamentale entre technique et méthode : la technique fournit des résultats différents en fonction du découpage, la méthode constitue la cohérence entre les concepts, les données et les techniques (Thériault et Des Rosiers, 2008b).

Pour sortir de l'impasse, S. Openshaw (Batty et Longley, 1996) voyait, dans le développement en analyse spatiale des bases de données numériques couplées aux SIG, la possibilité de créer **nos propres découpages représentatifs** de la distribution spatiale d'un phénomène. Dans cette optique, nous proposerons, dans la dernière partie, une méthode permettant de créer des découpages spatiaux à partir de l'analyse d'image.

Une autre solution est proposée par la géostatistique et son outil de base qu'est le variogramme, notamment utilisé en géographie urbaine par A. Dauphiné et C. Voiron-Canicio (1986), qui mesure le degré de dépendance entre une valeur et des valeurs situées dans un voisinage de taille croissante et range les échelles de structure décelées, de la plus petite à la plus grande.

Le problème lié à l'échelle des données socio-économiques implique nécessairement une incertitude sur la variabilité des phénomènes à l'intérieur des unités spatiales dans lesquelles ces données sont mesurées. Paradoxalement, le besoin de développer des méthodes et de produire de la connaissance à une échelle fine est très présent. L'approche totalement désagrégée, suggérée par A. Banos et T. Thévenin (Thévenin, 2001, Thériault et Des Rosiers, 2008a) constitue une autre solution. Il s'agit d'opter pour une désagrégation systématique des informations. Cette approche appliquée à la thématique des transports peut s'avérer utile pour d'autres thématiques. Deux modes de désagrégations peuvent être utilisés :

- une **désagrégation spatiale** : la localisation précise des unités spatiales choisies. Dans le cadre des transports, les centroïdes des unités spatiales sont remplacés par la localisation précise des générateurs de déplacements dans un système de référence géographique
- une **désagrégation des données socio-économiques** : la redistribution des informations collectées à l'échelle d'une unité spatiale en tenant compte de la répartition de la population assimilée à celle des bâtiments.

Cette méthode possède également ses limites : les données spatiales désagrégées existent déjà, néanmoins la désagrégation des données socio-économiques doit suivre une méthode statistique rigoureuse.

Malgré la désagrégation des données, il reste une incertitude. R. Shearmur et W. Coffey (Thériault et Des Rosiers, 2008b, p.48) expliquent qu'il existe « un principe d'incertitude irréductible, semblable au principe d'incertitude d'Heisenberg, qui veut que plus on s'approche de données économiques ponctuelles, moins on est certain de ce qu'on trouve en ces points ». Ces propos sont également valables pour d'autres données démographiques ou sociales. La variabilité dans le temps des phénomènes à l'échelle micro est telle que l'incertitude persiste et que la robustesse des résultats peut être remise en cause. Par conséquent, il est nécessaire d'intégrer que les données sont probables mais pas certaines.

4. Intégration de la 3D dans l'analyse spatiale

4.1. Modélisation des éléments du système urbain dans ses trois dimensions

Le terme de simulation est polysémique, néanmoins il renvoie toujours à une représentation des conditions du réel. En géographie, les conditions du réel sont modélisées pour mieux les comprendre mais également afin de faire de la prospective. Ainsi la simulation est une représentation du comportement d'un processus au moyen d'un modèle matériel dont on fait varier les paramètres et les variables qui sont les images de ceux du processus étudié (Larousse, 2010).

La mise en relation des bases de données et de la représentation cartographique des SIG offre un environnement privilégié pour la simulation en géographie et en aménagement. Rappelons que l'utilisation d'un SIG permet, outre la collecte et la gestion, l'analyse et la modélisation de différentes informations spatiales, de résoudre des problématiques d'aménagement. Ce type de SIG a pour vocation l'opérationnalité et l'aide à la décision. Actuellement, les nouvelles problématiques regroupées sous le terme de cadre de vie urbain sont analysées.

Les progrès de la modélisation géométrique 3D offrent la possibilité de simuler des processus verticaux : croissance urbaine, écoulement des fluides *etc.* « Si on peut aujourd'hui intégrer la troisième dimension, les applications travaillant sur ses liaisons avec les aspects descriptifs et géométriques, sont limitées par des restrictions dues à la modélisation plus ou moins performantes » (Bordin, 2006, p.67).

4.1.1. Estimation de potentiel: Interaction entre échelles micro et macro

La nécessité de décentraliser les **énergies renouvelables** à l'échelle des espaces urbains tel que le solaire photovoltaïque a conduit la mise en place d'une politique forte de communication afin de sensibiliser le grand public. Au-delà des modes de communication traditionnelle (presse, télévision, radio), la vulgarisation d'Internet a permis le développement d'outils d'estimation du **potentiel** économique d'une installation photovoltaïque individuelle*. Néanmoins, ces outils ne permettent qu'une évaluation au cas par cas. L'enjeu du développement des énergies renouvelables comme l'énergie solaire est à la fois global et local : global, car la lutte contre le réchauffement climatique et les gaz à effet de serre doit être mondiale ; local, car l'énergie qu'elles produisent, couvre des besoins souvent inférieurs au territoire régional. Les études menées jusqu'à aujourd'hui reflètent ce double niveau. Les objectifs fixés lors des différents sommets mondiaux ou européens nécessitent une estimation du potentiel de production électrique par les énergies renouvelables.

L'Agence Internationale de l'Energie (IEA) propose aux pays membres, un accompagnement pour la politique énergétique ; elle a notamment conduit plusieurs études sur **l'estimation du potentiel** technique du **photovoltaïque** intégré aux toits ou aux façades, grâce à l'évaluation de certains facteurs (seuil de rentabilité économique par exemple). Elle fonde sa méthodologie

<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps3/pvest.php>,
ou
<http://ines.solaire.free.fr/pvreseau.php>

sur **une typologie fonctionnelle des bâtiments** (résidentiels, agricoles, industriels, commerciaux et autres). Pour chaque type de bâtiments, elle prend en compte la surface bâtie et applique des ratios correspondant à la part de toit (et de façade) utilisable en fonction de cette surface bâtie. Ce ratio s'appuie sur les travaux de Gutschner et Nowak (1998, 2004). L'intérêt est que ce ratio tient compte des conditions architecturales (historique, technique, effet d'ombre...) et de l'ensoleillement. Cette méthode intéressante n'est, néanmoins, pas automatisée et manque de transparence sur l'origine des données.

Une autre méthode, proposée par S. Izquierdo, M. Rodrigues et M. Fueyo (2008), vise à estimer le **potentiel technique des systèmes photovoltaïques**, intégrés en **Espagne** par **extrapolation** des résultats obtenus à partir de la BD Corine Land Cover La rareté et l'hétérogénéité des données couvrant l'ensemble du territoire espagnol* ont conduit les auteurs à développer une méthode avec une double démarche : descendante puis ascendante. En effet, l'analyse part de données disponibles et pertinentes (population et occupation du sol) à l'échelle nationale, pour définir **une typologie des bâtiments** en fonction de leur **compacité**. Dans chaque type de bâtiment, est sélectionné un échantillon représentatif statistiquement. Les zones urbaines sélectionnées pour chaque type sont ensuite étudiées plus précisément afin de calculer un certain nombre de paramètres nécessitant une analyse à l'échelle du bâtiment (zones d'ombres, types de toits, obstacle, *etc.*). Les paramètres obtenus permettent d'extrapoler les résultats sur l'ensemble du territoire national. Les résultats qu'ils obtiennent sont très encourageants car l'erreur est de 10% sur le calcul de la surface construite et de 32% sur la surface de toits disponibles.

Ce constat peut être fait pour la France également.

Les résultats obtenus dans ces deux études ont permis de **mettre en évidence certains facteurs essentiels** à l'évaluation du potentiel de l'énergie solaire. Pour la superficie des zones urbanisées, connaître le nombre et la hauteur des bâtiments, et la densité de population, les typologies des constructions s'avère indispensable tandis que pour la superficie des toits utilisables, ce sont l'orientation, l'inclinaison, la localisation, l'ombre et les considérations historiques.

Néanmoins, certains problèmes persistent. Tout d'abord, la mesure de l'irradiation solaire s'appuie sur une méthode de calcul longue et fastidieuse. Puis, les données utilisées pour calculer les paramètres permettant d'estimer la surface de toit disponible sont peu explicitées : le cadastre est utilisé pour mesurer l'emprise au sol réel des bâtiments, des photographies aériennes pour les caractéristiques des toits et les coefficients sont issus de la connaissance des experts. Pourtant, à l'heure actuelle, il est possible de disposer de données fines sur les caractéristiques des toits.

4.1.2. Modélisation 3D et simulation d'impact

Le chapitre 3 a montré que le quartier constitue l'échelle d'intervention privilégiée pour instituer les principes du développement durable. Ainsi se sont développées des recherches pour les quartiers durables ou éco-quartiers. Les objectifs sont divers : réduction de la production des déchets, de la consommation énergétique et de l'eau, promotion des modes de transports doux (transports en commun, vélo, marche à pied *etc.*), ou encore développement de la biodiversité.

Dans cette optique, des méthodes ont été développées, du **potentiel de l'énergie solaire à l'échelle d'un quartier**, dans le canton de Fribourg (Gutschner et Nowak, 1998, Compagnon, 2004) et de Genève (Nowak 2004). L'objectif est de proposer une méthode pour quantifier le potentiel de façades et de toits en zone urbaine (les effets de la géométrie – plan et orientation – des bâtiments) pour le chauffage solaire et la production d'électricité. Cette estimation peut ensuite faire l'objet d'une analyse prospective afin de proposer de nouvelles formes urbaines favorisant une réception d'énergie solaire maximum (Compagnon, 2004).

Les méthodes développées à ces échelles se veulent très précises dans leur estimation, que ce soit au niveau du calcul de l'irradiation ou de l'intégration des caractéristiques morphologiques. Néanmoins, la prise en compte de ces dernières n'est souvent trop rapidement explicitée. De manière générale, toutes les méthodes soulignent le rôle des experts pour définir la part de surface utile (que ce soit au niveau des toits ou des façades). Ceux-ci estiment ce ratio à partir d'images aériennes : l'emprise au sol est délimitée, puis l'inclinaison du toit est estimée afin de calculer la surface de toit réellement disponible car un toit plat a une surface qui correspond à l'emprise au sol mais celle d'un toit incliné peut être supérieure (tableau 7)

Inclinaison	Largeur	Hauteur	Longueur	Catégories retenues	Coefficient de surface réelle
0	1	0	1	Plat	1
10	1	0,2	1,02	Inclinaison modeste	1,1
20	1	0,35	1,06		
30	1	0,56	1,15		
30	1	0,56	1,15	Inclinaison moyenne	1,3
40	1	0,85	1,31		
50	1	1,2	1,56		
50	1	1,2	1,56	Inclinaison forte	1,6
60	1	1,73	2		
70	1	2,74	2,92		

Tableau 7 : Valeurs relatives de la toiture (Nowak, 2004).

Ce type d'analyses est d'une grande précision mais reste long et fastidieux à réaliser à l'échelle d'une ville ou bien d'une région. Il est nécessaire de choisir des zones représentatives afin d'extrapoler les résultats à une échelle supérieure.

Parallèlement, la problématique de **l'efficacité énergétique** des bâtiments est au cœur des projets de renouvellement urbain. Les secteurs tertiaire et résidentiel correspondent à environ 40% de la consommation d'énergie et 18% des émissions de gaz à effet de serre (GES) ; sachant que les logements dans le parc bâti ancien émettent deux fois plus que les logements neufs. (Siret et *Alii*, 2003, Musy et *Alii*, 2004). Ce constat renforce la nécessité de renouveler le parc bâti, non seulement pour préserver les espaces naturels mais également pour améliorer la qualité environnementale à l'intérieur de l'espace urbain.

En outre, même si des innovations existent actuellement pour améliorer les techniques de construction et les performances énergétiques des bâtiments, celles-ci dépendent également des conditions climatiques environnantes. En effet, de nombreux travaux montrent que les **îlots de chaleur urbaine** sont à la fois les causes et les conséquences de l'augmentation de températures, surtout en été. Dans la mesure où la densification urbaine associée à l'utilisation excessive de matériaux à forte absorptivité solaire favorise le développement d'un îlot de chaleur.

Dans le même cadre, le Centre de Recherche Méthodologiques d'Architectures, soutenu par l'ADEME, a développé une recherche sur le développement de méthodes de diagnostic sur les potentialités d'évaluation environnementale (figure 70).

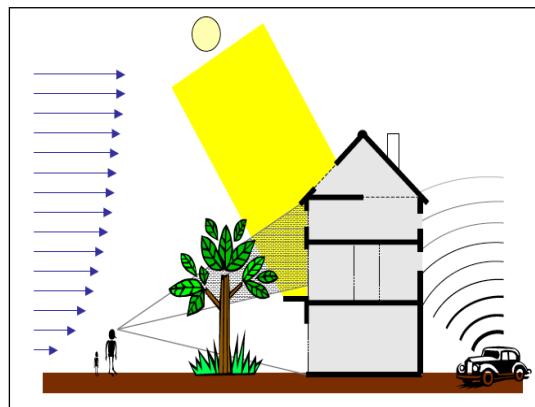


Figure 70 : Interactions entre qualité environnementale et bâtiment (Ramos, 2003).

Les limitations des SIG ont conduit au développement de simulation en 3D assez simple. Cependant, certains chercheurs ont proposé des simulations plus complexes en **couplant** le modèle 3D avec **des logiciels de simulation thématiques**. Le CERMA, notamment, s'est orienté vers le développement de SIG 3D afin d'évaluer la qualité environnementale des bâtiments et du quartier auxquels ils appartiennent (Siret et *Alii*, 2003, Musy et *Alii*, 2004, RIG, 2006). Un diagnostic environnemental des bâtiments implique une connaissance fine de la géométrie et des processus physiques qui entrent en jeu, ainsi pour l'analyse du bruit, le CERMA utilise MITHRA® du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment et pour l'analyse de l'ensoleillement, leur propre logiciel SOLENE®. Les SIG 3D mis en place par le CERMA, informent les objets bâtis avec des attributs comme le nombre d'étages,

l'orientation, la présence de balcon *etc.* qu'ils couplent avec des modèles de simulation thermiques ou sonores et des modules de visualisation 3D (figure 71).

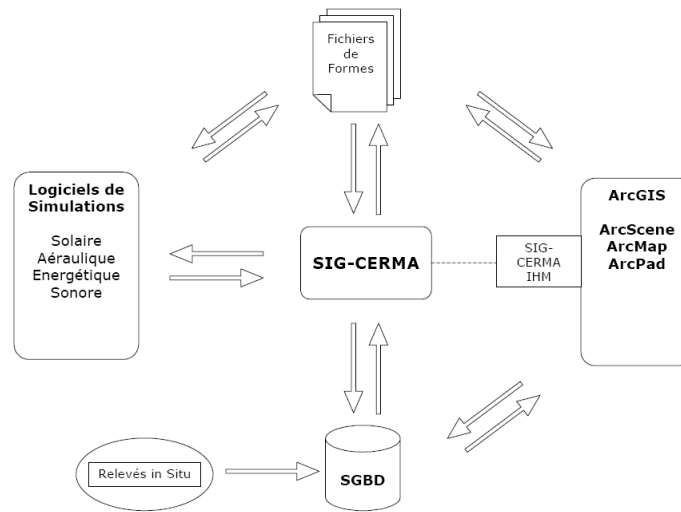


Figure 71 : Organisations générales de la démarche modélisatrice (Musy et Alii., 2004).

L'objectif est de proposer une plate-forme SIG 3D environnementale pour évaluer et simuler les projets urbains. Les analyses et les simulations portent donc sur des espaces restreints, la faible disponibilité des données rend difficile la généralisation. Cet outil expose les multiples aspects environnementaux du bâti ainsi que les améliorations possibles dans une démarche prospective. C'est donc un instrument de communication et d'aide à la décision.

4.1.3. Ambiances urbaines

Les **potentialités environnementales des bâtiments** décrites ci-dessus renvoient à la notion d'ambiances urbaines au sens des **qualités physiques de l'environnement** qui permettent d'évaluer un **degré de confort ressenti** par les individus. L'environnement sonore, les conditions d'ensoleillement, de pollution et de ventilation sont autant de facteurs qui peuvent être analysés (Xiaa et Qing, 2004). Néanmoins, les recherches actuelles sur les ambiances (urbaines) ont dépassé la simple évaluation des phénomènes physiques par une approche dite sensible, prenant en compte les sensations de l'homme dans un environnement architectural ou urbain (Drodz et Alii, 2008). Ainsi, la définition de la notion d'ambiance peut être élargie à « une atmosphère matérielle et morale qui environne un lieu, une personne » (Basile et Bordin, 2005)*. L'ambiance urbaine est donc au croisement de la technique et de la recherche, des sciences dures et des sciences humaines et sociales. Il existe donc de nombreuses méthodes d'analyse de l'ambiance mais qui sont encore très segmentées selon la thématique traitée (son, lumière, air...). Selon T. Le Jeannic (2007), « dans leur immense majorité, les Français trouvent leur quartier agréable à vivre. Pourtant, cela ne les empêche pas d'émettre des critiques : dangers de la circulation, difficultés pour garer la voiture, manque d'animation, de commerces, pollution, bruit *etc.* ».

En 2006, 45% des français sont gênés par les dangers de la circulation mais parallèlement 39% se plaignent du manque de places de stationnement (le manque de transports en commun

Amphoux P., Thibaud J-P., Chelkoff G. (2004), *Ambiances en débat*. Bernin (France) : A la croisée, 309p., cité in Basile et Bordin (2005)

n'arrivant qu'en dixième position). En second lieu, le manque d'animation, de commerces et d'activités pour les jeunes ainsi que la délinquance et les incivilités sont soulignés pour 28 à 30 % de la population, juste devant la pollution, le manque d'équipements sportifs et le bruit. C'est ainsi que M. Basile et P. Bordin (2005) analysent l'ambiance urbaine au travers d'indicateurs illustrant l'animation de l'espace public notamment à partir des commerces (type d'activités, horaires d'ouverture, répartition spatiale *etc.*). Dans le troisième groupe de critiques supérieures à 20 % apparaissent le manque d'équipements liés à la petite enfance, le manque d'espaces verts, ou encore l'environnement du quartier dégradé par la saleté et le manque d'entretien.

Le Centre de Recherche Méthodologique d'Architecture et le centre de recherche sur l'espace sonore et l'environnement urbain forment l'Unité Mixte de Recherche « Ambiances architecturales et urbaines ». Comme nous l'avons déjà noté dans le paragraphe précédent, le CERMA travaille plus particulièrement sur l'ensemble des phénomènes physiques qui ont trait à la perception sensible et à la modification de l'environnement construit et du confort : lumière, chaleur, vent, son *etc.* Le CRESSON se focalise essentiellement sur la qualité sonore des espaces publics au travers de méthodes plutôt qualitatives basées sur l'espace vécu (Balaÿ et Buffet, 2001). Le bruit est un des « fléaux » assimilés à l'espace urbain, pourtant, il peut être également considéré comme une de ses caractéristiques et ne pas constituer une réelle gêne (Roulier, 1999). Ainsi, le bruit des voitures est fonction de la morphologie de l'espace, la quantité de véhicules, l'éloignement de la source d'émission *etc.* Néanmoins, les différenciations spatiales de l'espace urbain conduisent à la multiplication des sources sonores, ainsi le bruit des moteurs se mêle aux chants d'oiseaux. En effet, la présence de parcs et de jardins apporte tranquillité et sonorités naturelles. Ce sont des enclaves au milieu du bruit de la circulation qui constituent des îlots de calme pour les piétons. L'espace sonore peut être modifié à plusieurs échelles mais est toujours fonction de la forme des objets (site, bâtiment/rue, matériaux *etc.*).

4.2. Analyse spatiale et traitement SIG

La recherche sur la modélisation tridimensionnelle s'est développée autour de la problématique d'une représentation réaliste des objets. Ainsi les progrès ont, dans un premier temps, porté essentiellement sur les outils, les modeleurs DAO et leurs liens avec les SIG (PSIG, 1994). L'augmentation progressive de la capacité des ordinateurs et la puissance de calculs ont permis jusqu'à présent de modéliser des objets de petites tailles mais aujourd'hui, il semble envisageable de modéliser une portion de l'espace. Par conséquent, toutes ces innovations technologiques conduisent la recherche à développer de nouveaux outils d'analyse de l'espace : SIG 3D (De Cambray, 1994a et b, De la Losa, 2000, Ramos 2003, Lachance, 2005) et d'environnements urbains virtuels (Thomas, 1999, Perret, 2006, Banos et Thenevin, in Thériault et Des Rosiers, 2008a). Cette liste ne peut être exhaustive tant ces travaux sont rattachés à des programmes de recherches importants et tant la recherche dans ce domaine est riche.

Comme nous l'avons déjà expliqué, un des freins à l'automatisation et à l'application des modèles développés est la **rareté des données géographiques en 3D** car elles sont coûteuses. Les données géographiques font référence à la description d'objets, d'évènements, de phénomènes spatialement référencés, localisés par rapport à la surface de la Terre (Puissant, 2003). La cartographie est le moyen de représenter à échelle réduite la surface totale ou partielle du globe terrestre. Ainsi, le système de référencement spatial est traditionnellement un positionnement en longitude et en latitude, donc en 2D, et est lié à un système de projection*. Le développement des données en format numérique a permis de traiter plus rapidement un grand volume de données automatiquement. De plus, les progrès des capteurs ont permis une plus grande précision et une automatisation dans la collecte des données

La troisième dimension apparaît dans ce cas comme un support de communication ou de pédagogie pour **aider à la concertation et à la décision**. (Loubier, Joliveau, Silva et Alii, 2008). Par exemple, V. Silva et Alii (2008), de l'Ecole Polytechnique de Lausanne, ont présenté un logiciel de simulation 3D pour fournir une aide à la décision efficace sur l'impact de projets d'aménagement et d'architecture. Ce logiciel est couplé à un système multiagent. Du point de vue paysager, la 3D est prise en compte dans la perception de la visibilité et de l'ensoleillement. De même, le Londres virtuel a été conçu de manière à ce que les utilisateurs puissent découvrir et redessiner leur environnement dans le cadre d'une démarche participative. (Batty et Hudson-Smith, 2005). Les premiers résultats montrent une amélioration de la communication et de la participation du public au débat public dans le cadre de l'aménagement ou de l'urbanisme.

4.3. La 3D dans les démarches participatives

Comme le précise B. Villalba, « le concept de ville durable suppose d'adhérer à une croyance (la durabilité) et à une méthode (la concertation) afin de parvenir à des effets induits, c'est-à-dire qu'en adoptant certaines conduites positives, nous mettrions en place un cycle vertueux, qui permettrait de réguler les contingences négatives liées à la vie urbaine » (Villalba, 2009). La démarche participative, ou en tout cas la phase de concertation, est devenue obligatoire depuis l'introduction du développement durable.

Du fait du **caractère cognitif des formes urbaines** (cf. chapitre 2), il est important de souligner l'intérêt de la **participation des habitants** dans le **processus de décision** pour éviter qu'ils ressentent toute transformation comme une agression de leur corps* (Paquot et Younès, 2004).

L'intégration des citoyens dans l'aménagement de leur espace de vie a produit des résultats intéressants, en tout cas dans l'acceptation du projet. En effet, certains attribuent la réussite de la construction du quartier Vauban à Fribourg (Allemagne) à la forte participation citoyenne au projet, permettant la constitution de nombreux *Baugruppen* qui signifient groupes de construction. La participation se déroule lors de la création du quartier afin de proposer aux habitants de construire leur environnement. Ils se regroupent pour définir l'organisation de

Correspondance mathématique ponctuelle, continue et généralement biunivoque entre les points d'un ellipsoïde et les points du plan.

Pour l'auteur, l'architecture (d'un bâtiment) constitue l'extension de l'enveloppe du corps.

leur îlot ou de leur immeuble au cours de multiples réunions et transmettent leur projet à un maître d'œuvre. Les avantages de cette démarche sont multiples : créer des relations de voisinages, faire des économies d'échelle sur les coûts, mettre en commun certains équipements. Le succès de cet espace de discussion et d'échange entre les habitants permet de remettre en question l'idée selon laquelle les experts sont omniscients et porteurs de l'intérêt général ; « l'expert ne fonctionne, comme tout être humain, qu'avec une rationalité limitée à ses objectifs et ces méthodes » et d'admettre que les habitants sont également porteurs d'une vérité (Piron, 2003, p.62).

La **représentation tridimensionnelle** est souvent considérée comme un bon **vecteur de communication** pour les projets d'aménagement et d'urbanisme. L'utilisation de la 3D s'est largement répandue au cours des dernières décennies, avec notamment la maquette 3D. Avoir une maquette numérique est le rêve de chaque élu qui veut promouvoir son territoire. De plus en plus de collectivités territoriales se sont dotées, pour tout ou partie de leur territoire, d'une représentation très réaliste (Paris, Londres, Philadelphie mais également Cannes, Rennes, etc.). L'objectif principal est de disposer d'un outil de communication à destination des administrés. En effet, la maquette numérique permet une visualisation très réaliste de ce que peut être la ville (trafic en direct, localisation des services, cartographie des nuisances sonores) et son devenir, en y insérant les aménagements futurs. Le succès de cette technologie dépasse largement le cadre scientifique et technique (Joliveau, 2004).

L'intérêt de ce type d'images est l'**interactivité**. Elle offre la possibilité à l'utilisateur d'explorer et de découvrir un territoire ou un projet. Ceci distingue la maquette numérique d'une simple image en 3D. Ainsi, la représentation en trois dimensions est la transcription de la vue vers le toucher puisque, par l'interactivité, il est possible de s'approcher d'objets que l'on ne peut pas toucher. « Cette sensation tactile autant que visuelle est ce qui rapproche les maquettes numériques des maquettes matérielles. » (Joliveau, 2004, p.404). Ainsi la maquette numérique offre la possibilité de saisir une nouvelle réalité et de nouvelles perceptions. « La visualisation de paysages numériques sur un écran n'a pas vocation à simuler une expérience réelle d'immersion paysagère ou à se substituer à une perception directe. Elle doit s'envisager comme une nouvelle expérience, un mode inédit de parcours d'un territoire déjà connu par la présence physique » (Joliveau, 2004, p.404). La construction de représentations 3D suffisamment réalistes permet d'évoquer les territoires concrets, mais elles sont suffisamment dynamiques et évolutives pour permettre discuter collectivement des projets à élaborer.

Un certain nombre de recherches portant sur la géogouvernance* s'intéressent à la modélisation 3D et aux maquettes virtuelles qui sont de outils puissants de politique publique et de gestion du territoire qui permettent une meilleure compréhension des projets d'aménagement, la concertation et l'aide à la décision. M. Batty (2000) explique à ce sujet que « la visualisation est peut-être la plus importante de toutes les activités du processus de design à être affectée par le développement des technologies numériques »*. En effet, les

Démarche s'appuyant sur l'utilisation des méthodes et des outils de l'analyse spatiale, destinée à mettre à la portée de tous les acteurs concernés une information territoriale pertinente, tout au long de la chaîne de construction d'un projet de territoire.

« Designers or anyone who has an interest in the environment can log on, appear as avatars in such a world, converse with other users/designers who also appear as avatars, and engage in structured design and problem-solving with others »,

représentations tridimensionnelles sont souvent plus faciles à interpréter pour les non-experts (élus et citoyens) qui sont aujourd'hui intégrés dans le processus de décision (Frédéricque et *Alii*, 2008)

Déjà en 1998, M. Batty (1998) envisageait de coupler les techniques de conception assistée par ordinateur (CAD), systèmes d'informations géographiques (SIG) et la réalité virtuelle pour développer une sorte de monde virtuel qui serait à **redessiner de manière collective**. L'idée est que « toutes les personnes ayant un intérêt pour l'environnement pourraient se connecter, apparaître en avatars dans un tel monde, converser avec les autres utilisateurs qui apparaîtraient aussi en avatar, et engager dans un design structuré, la résolution de problèmes avec les autres »* (Batty et *Alii*, 1988, p.25).

"The visualization is perhaps the most significant of all activities in the design process to have been affected by the development of digital technologies."

Cet engouement pour la maquette 3D n'est pas sans risque. Le danger majeur est la possibilité d'obtenir une grande quantité d'informations, de monographies numériques mais sans utiliser les réelles potentialités des données ainsi créées pour de l'analyse spatiale. « Nous touchons là à une segmentation des métiers de la planification. Alors que la **cartographie** est du côté des **outils techniques**, les **maquettes virtuelles** relèvent des **outils de communication**, qui obéissent à des logiques politiques et budgétaires différentes » (Joliveau, 2004, p.402). La maquette numérique est une forme de représentation de l'espace pour laquelle il faut opérer des choix lors de sa construction. Ce succès public est aussi grand que la méfiance des intellectuels, des universitaires et des chercheurs en sciences sociales, nombreux à être agacés par la logique de séduction qu'ils prêtent à ces produits. La maquette numérique est un outil d'analyse scientifique.

Vodoz L. 2001, *NTIC et territoires. Enjeux territoriaux des nouvelles technologies de l'information et de la communication*, Presses polytechniques et universitaires romandes.

Joliveau (2004, p.402) souscrit aux critiques faites par Vodoz* à propos des représentations numériques tridimensionnelles du territoire ». Les nouvelles technologies sont souvent considérées comme bienfaitantes pour le progrès de la société. Mais leurs opposants considèrent que « les nouvelles visualisations informatiques créeraient un **risque de confusion généralisée** entre la représentation et le représenté, le virtuel et le réel » (Joliveau, 2004, p.102). Autrement dit, le degré de réalisme est tel qu'une certaine confusion peut s'installer chez les spectateurs qui ne distingueraient plus ce qui est réel et ce qui est simulé.

En s'appuyant sur *Simulacres et Simulation* de Baudrillard, M. Batty et A. Hudson-Smith (2005) présentent le Londres Virtuel comme un simulacre, c'est-à-dire une simulation d'une simulation, un modèle de modèles. Dans le contexte urbain et le domaine du numérique, il est facile de transférer cette conception. Le simulacre urbain est, dans ce cas, une multitude de couches d'abstraction accumulées à partir des données brutes détectées, perçues et expliquées grâce à la simulation de la forme urbaine et de la structure. Les techniques de représentation de la ville sont utilisées depuis longtemps. Soit la représentation porte sur la géométrie de la ville et s'appuie sur la CAD, ce sont des modèles numériques iconiques. Soit les fonctions géographiques et économiques sont représentées en utilisant les modèles des mathématiques symboliques.

Grâce aux progrès techniques, ces modèles se sont mêlés pour donner des modèles mathématiques qui se présentent comme des modèles iconiques, et *vice-versa*. Plus important, peut-être, comme les ordinateurs sont voués à être utilisés pour tout (extraction de données satellitaires, modélisation, visualisation, implantation des utilisateurs virtuellement dans un processus), les modèles 3D sont voués à être représentés dans des modèles, le monde dans le monde. C'est le simulacre : les villes virtuelles dans des villes virtuelles où une telle implantation truque le processus de façon curieuse mais enrichissante (Batty et Hudson-Smith (2005). Pour aller plus loin même, le spectateur ou l'utilisateur peut alors croire que tout est possible.

Mais pour Vodoz, ce n'est pas cette confusion entre le réel et le simulacre qui semble l'inquiéter mais plutôt la capacité de ces visualisations à susciter, voire à imposer une vision du territoire et ainsi faire douter le spectateur de « ses perceptions, de son territoire et de ses valeurs. Comme le rappelle T. Joliveau (2004, p.405), « les vues 3D ne sont ni plus ni moins manipulatrices que tous les médias qui ont servi et servent encore à représenter l'espace ». Ainsi la communication par la maquette numérique pourrait favoriser la manipulation. Pourtant selon M. Lussault*, l'existence d'un réel « donnée » n'existe pas. L'espace offert par toute image n'est pas seulement une représentation spatiale, c'est aussi de l'espace support de discours et de pratiques spatiales des opérateurs (Revue urbanisme, 2007, p. 69). Si le réel est déjà un simulacre comme semble le penser M. Batty et A. Hudson-Smith (2005), c'est-à-dire une représentation qui serait propre à chacun alors, une perception ne peut pas en fausser une autre, surtout quand l'observateur est appelé à modifier la maquette en fonction de ses représentations.

Cité par T.Joliveau
(2004, p.405)

Au-delà de la découverte d'un espace, l'image animée devient familière, les lecteurs peuvent se l'**approprier**. Selon cette idée, la modélisation tridimensionnelle participative (Rambaldi, 2000; Bersaloo, Zingapan, 2004, Rivière et Alii, 2010) commence à se généraliser. Cette méthode s'appuie sur un outil spatial de la démarche participative : la maquette matérielle. L'objectif est similaire à celui des cartes mentales : connaître les perceptions spatiales des habitants enquêtés à partir d'une maquette en relief. « Cette maquette parfaitement matérielle apparaît comme un moyen efficace de réfléchir dans l'espace dans un contexte peu alphabétisé » (Joliveau, 2004, p.403), ou même pour un public peu familiarisé avec la cartographie. En effet, la représentation matérielle de son territoire permet de l'identifier.

Le problème qui persiste souvent est que la phase de concertation est peu suivie, elle n'attire souvent qu'une petite partie des habitants, qui n'est pas de ce fait représentative de la population. L'utilisation des SMA permet de « remplacer » la phase de concertation. En effet, les SMA permettent d'intégrer les réactions des individus face à un ou des changements urbains (Frankhauser et Alii, 1996, Silva et Alii, 2008). Chaque individu calcule son degré de satisfaction en fonction de ses désirs. Leurs réactions se traduisent par des réponses à des questions telles que: Suis-je satisfait de la proximité avec les services dont j'ai besoin ? Suis-je satisfait de la qualité de mon environnement ?

Conclusion de chapitre

La recherche de l'optimalité des espaces urbains peut s'avérer difficile compte tenu de toutes les interactions qui s'y déroulent. La **notion d'échelle est au cœur de ce chapitre** ainsi que tout ce qu'elle implique pour l'analyse des formes urbaines sous l'angle de la durabilité.

Les **théories et concepts** présentés dans ce chapitre, proposent des **clefs** pour comprendre l'intérêt de l'analyse multiscalaire de l'organisation urbaine pour son optimisation. Le principe de l'**autosimilarité**, concept majeur de la théorie des fractales, permet la formalisation la reproductibilité des formes à l'infini. Toutefois, il existe des seuils, des échelles au-delà desquelles ce phénomène disparaît ou se modifie. La quasi-autosimilarité ou l'autosimilarité adapte ce principe à ce type de phénomène. L'analyse par **multifractales** et la **Théorie de Relativité d'Echelles** offrent une solution pour comprendre les objets qui ne répondent pas strictement au principe d'autosimilarité. Ces nouvelles méthodes visent à comprendre le rôle des échelles dans l'organisation spatiale des phénomènes en allant du système global vers le local.

La **loi Constructale**, développée par A. Bejan, prend le contre-pied et propose une méthode permettant d'analyser les contraintes locales pour produire un système global optimisé. L'intérêt de cette méthode réside plus dans sa vision d'ingénierie que dans la compréhension des formes existantes. Dans des problématiques d'aménagement et d'urbanisme, cette méthode permet de produire des formes plus optimales et donc plus durables. La forme idéale au niveau du bâtiment n'apparaît pas duplicable à toute la ville. La maîtrise de l'étalement urbain implique une intervention sur les zones bâties existantes. Cependant, la loi Constructale, bien que peu utilisée en géographie, offre un cadre de réflexion approprié à cette question par l'optimisation des formes urbaines sous contraintes de garantir la qualité de vie des habitants.

Actuellement, les **méthodes et modèles** conçus à **l'échelle micro orientés individu** se développent. Les acteurs locaux possèdent de plus en plus de compétences. Pour cette raison, ils réclament davantage de méthodes permettant de comprendre les processus qui se déroulent dans leur domaine et sur leur territoire de compétence. Les nouvelles technologies en lien avec les progrès de l'informatique permettent aujourd'hui de comprendre le fonctionnement de l'individu en fonction de son territoire. Ces nouvelles démarches reposent la question de l'unité spatiale pertinente. Certaines données ne nécessitent pas une désagrégation à l'individu ou à une échelle extrêmement précise. Le décalage existant entre données désagrégées et données agrégées soulève la question du choix de l'échelle d'analyse. Les solutions proposent soit de tout désagréger, soit de développer le découpage propre à chaque analyse. Ce problème est particulièrement sensible lorsque qu'on veut traiter des formes urbaines en 3D, leur complexité nécessite une donnée métrique coûteuse et difficilement gérable pour certaines analyses.

La question de l'analyse des formes urbaines dans toutes leurs dimensions souligne la nécessité de disposer de **données fines** sur l'espace analysé. L'évolution vers des **données**

tridimensionnelles extrêmement précises et exhaustives permet de s'affranchir d'une partie de la pratique du terrain. Même si le développement de telles données est en cours, la plupart des données standardisées sont proposées en 2D1/2.

La démocratisation du système d'information géographique rend accessible l'information spécialisée pour des non-spécialistes, le SIG offre ainsi, une plate-forme commune entre acteurs locaux et scientifiques. Les niveaux d'analyse qu'il permet dépendent de sa finalité : une bonne visualisation, la mise en relation d'objets spatiaux ou la simulation de phénomènes. La troisième dimension est utilisée principalement pour la visualisation des espaces géographiques. Pourtant la hauteur des éléments peut être intégrée à l'analyse dans la mesure où les SIG intègrent la 2D1/2 voir la 2D3/4. Néanmoins, le manque d'opérateurs topologiques, essentiels en analyse spatiale, limite ses capacités.

En outre, les limites actuelles des SIG n'ont pas empêché le développement d'**applications intégrant les formes urbaines dans leurs trois dimensions**. Plusieurs études ont permis de mettre en évidence les facteurs morphologiques essentiels tels que l'orientation et la pente du toit, la hauteur des bâtiments, la compacité *etc.* Cependant, ces études ne se sont pas appuyées sur des données 3D standardisées mais sur des typologies de bâtiments. D'autres études proposent d'utiliser les données 3D pour procéder à de la simulation d'impact. Estimation du potentiel solaire ou mesure de l'efficacité du bâtiment à l'échelle d'un quartier, ou encore estimation et modélisation des îlots de chaleur ne font pas uniquement appel à des SIG, ils s'appuient également sur des logiciels de simulation thématique. Ces analyses tendent vers une modélisation globale des ambiances urbaines : ensoleillement, nuisances sonores, qualité de l'air, efficacité énergétique, voire production d'énergie.

Les potentialités offertes par la troisième dimension en analyse spatiale sont nombreuses mais restent toutefois limitées par l'absence d'opérateurs topologiques et par le coût des données à très haute résolution spatiale. Néanmoins, les simulations et les analyses présentées dans ce chapitre permettent aux acteurs et aux scientifiques d'obtenir des réponses aux problématiques actuelles. Ainsi, les méthodes développées favorisent le processus de concertation et l'aide à la décision.

Conclusion de la deuxième partie

Cette deuxième partie a été consacrée à l'espace urbain sous l'angle de la durabilité. Dans un contexte où l'espace urbain est au cœur des débats, car le mode de croissance urbaine pratiqué ces dernières décennies est considéré comme incompatible avec les conditions d'un **développement durable** (disparition de la biodiversité, raréfaction des ressources naturelles, dégradation de la qualité de vie des habitants, *etc.*) ; dès lors, les espaces urbains sont soumis à de **nouvelles contraintes** :

- lutter contre la mise en compétition des différentes fonctions et
- trouver un équilibre entre les deux formes de développement en s'appuyant sur leur complémentarité.

Quelles sont les transformations attendues de l'espace urbain ?

Aucune forme de croissance n'est mieux qu'une autre puisqu'elle répond à une logique socio-spatiale à un moment donné, mais les formes de l'espace urbain doivent être adaptables pour être durables.

Trouver l'organisation urbaine optimale dans le contexte du développement durable n'est pas chose aisée tant le modèle est remis en question. Le développement de la mobilité ainsi que l'évolution des modes de vie des habitants ne vont pas dans le sens d'une maîtrise de l'étalement urbain. Dans ce contexte, plusieurs alternatives ont été proposées : ville **multipolaire**, « **ville cohérente** », « **ville fractale** », ces modèles s'organisent autour des notions de proximité, de compacité et proposent une organisation urbaine en fonction des besoins des habitants, notamment le besoin d'espaces verts, de loisirs, les lieux de consommations *etc.* Ils s'appuient sur les emboîtements d'échelle et l'optimisation, c'est-à-dire trouver une cohérence entre l'individu et la ville *via* tous les niveaux intermédiaires (bâtiments, îlots, quartiers *etc.*). L'autosimilarité, la Théorie de Relativité des Echelles et la loi Constructale offrent des pistes de réflexion pour comprendre l'espace urbain et produire une ville durable optimale.

Au cours du temps, la qualité de vie a été portée au cœur des débats sur la durabilité urbaine. Le caractère cognitif des formes urbaines nécessite l'implication et la participation des habitants à tout processus de leur modification. Les travaux sur la qualité de vie, le dialogue et la concertation fournissent des éléments de réponses sur les conditions d'adaptabilité des espaces urbains et d'adhésion des populations concernées aux changements urbains.

Parallèlement, les acteurs locaux possèdent de plus en plus de compétences et, de ce fait, ils réclament davantage de méthodes pour comprendre les processus qui se déroulent sur leur domaine et leur territoire de compétences.

La représentation tridimensionnelle, que ce soit par une maquette numérique ou matérielle, est un bon vecteur de communication dans ce contexte. Son interactivité permet une immersion et une visualisation précise du changement opéré. Par ce biais, les acteurs locaux peuvent s'approprier leur nouveau territoire. Cependant, le risque de confusion doit être évité en

proposant une maquette centrée sur les principaux enjeux.

La démocratisation du SIG rend accessible, aux non-spécialistes, l'information spécialisée ou thématique. Le SIG offre, ainsi, une plate-forme commune aux acteurs locaux et aux scientifiques. En outre, il permet de réaliser différents niveaux d'analyse, de la visualisation de données, la mise en relation d'objets spatiaux, à la simulation de phénomènes. A l'heure actuelle, la troisième dimension est utilisée principalement pour la visualisation des espaces géographiques. Pourtant la hauteur des éléments peut être intégrée à l'analyse, dans la mesure où les SIG intègrent la **2D_{1/2}** voire la **2D_{3/4}**. Néanmoins, le manque d'opérateurs topologiques, essentiels en analyse spatiale, limite ses capacités. De manière concomitante, le progrès technique a permis la création de données tridimensionnelles extrêmement précises et exhaustives qui permettent de s'affranchir d'une partie de la pratique du terrain.

En outre, les limites actuelles des SIG, parfois couplés à des logiciels de simulations, n'ont pas empêché le développement d'applications intégrant les formes urbaines dans leurs trois dimensions. Potentiel d'installation en énergies renouvelables, simulations d'impact, analyse spatiale, toutes ces analyses tendent vers une modélisation globale des ambiances urbaines : ensoleillement, nuisances sonores, qualité de l'air, efficacité énergétique, voire production d'énergie. Même si les méthodes sous SIG restent limitées par l'absence d'opérateurs topologiques et par le coût des données à très haute résolution spatiale, les simulations et les analyses présentées permettent aux acteurs et aux scientifiques d'obtenir des réponses aux problématiques actuelles. Ainsi, les méthodes développées favorisent le processus de concertation et l'aide à la décision.

Partie 3.

A la recherche des relations
entre morphologie et
durabilité intra-urbaine.
Application à Nice

Introduction de la troisième partie

Au fil des pages, l'intérêt de la troisième dimension dans l'analyse de l'espace urbain a été démontré autant par son lien avec la morphologie, les processus qui lui ont donné naissance et le font évoluer, que par le contexte actuel du développement durable.

La Partie 3 présente donc plusieurs applications pour répondre à cette problématique. L'objectif global est de proposer des méthodes d'analyses des formes intra-urbaines au regard de leur durabilité.

Trois analyses interrogent la pertinence de la troisième dimension en analyse spatiale (cf. chapitre 5). La première porte sur une méthode d'analyse de l'évolution des formes urbaines en trois dimensions ayant pour but de déterminer le rôle joué par la troisième dimension dans l'explication des dynamiques urbaines et de confronter les formes intra-urbaines aux principes urbanistiques actuels.

La seconde a pour objet de détecter les tissus urbains au sein de l'espace urbain. Préalablement, il convient de déterminer les variables morphologiques nécessaires à ce travail. Mais quelles méthodes appliquer ? Plusieurs méthodes de caractérisation des formes urbaines tridimensionnelles sont exposées et testées afin de détecter des types-morphologiques de tissus urbains.

Le chapitre 6 souhaite confronter cette typologie, et plus généralement les formes urbaines, aux objectifs du développement durable et aux normes de qualité de vie actuelle. Quels indices ou indicateurs permettent-ils de rendre compte à la fois de la morphologie et de principes du développement durable ? Pour ce faire, plusieurs indices sont créés en relation avec ceux qui existent déjà. Le tissu urbain est-il réellement le volume élémentaire représentatif de la durabilité urbaine ? Quelle échelle est pertinente ? Chaque type est confronté à des indicateurs de développement durable pour évaluer sa pertinence.

Chapitre 5. Caractériser la forme intra-urbaine en 2D et 3D

*« La Forme [...] traduit en langage visible structures et plus universelles, tellement universelles qu'elles
seraient celles de l'univers... »
René Huyghe, Extrait de Formes et Forces*

Ce chapitre porte sur la caractérisation des formes intra-urbaines par leurs trois dimensions, car elles sont au cœur des problématiques du développement durable (cf. chapitre 3). Nous postulons que les tissus urbains caractéristiques de formes intra-urbaines constituent le volume élémentaire représentatif. Ce chapitre a, donc, pour objectif de proposer une méthode de détection des tissus urbains pour l'analyse de la durabilité.

L'analyse des formes urbaines en trois dimensions se décompose en deux volets. Le premier est consacré à l'examen des transformations morphologiques des villes, opérées au cours de la dernière décennie, dans l'optique de confronter leur évolution aux préconisations relatives au développement durable.

Le deuxième volet porte sur la caractérisation des formes urbaines, en trois dimensions. L'intérêt et les limites des classifications existantes sont tout d'abord discutés. Si de nombreuses typologies de formes urbaines sont aujourd'hui disponibles, chacune d'elles est relative à un domaine particulier ou spécifique à une question donnée : paysage, pollution de l'air, nuisances sonores, groupes sociaux, *etc.* Or, notre objectif est de construire une typologie des formes de tissus bâtis qui soit généralisable et reproductible à différentes thématiques. Nous présentons les principes sur lesquels la typologie est construite ainsi que la chaîne de traitements reposant sur l'analyse spatiale et l'analyse d'images par la morphologie mathématique.

1. Évolution urbaine de Nice entre 1999 et 2007

1.1. Présentation des données : précautions d'emploi

Nous disposons de la couche « Bâtiments » de la BD Topo ® de l'Institut Géographique National, de 1999 et de 2007. Malgré un éditeur commun, cette base de données n'est pas identique pour les deux années, tant au niveau des champs attributaires que de la géométrie des objets. Cela s'explique par la différence des sources de données et de leur qualité. Un travail d'harmonisation (géométrique et sémantique) entre les deux bases de données a donc été effectué.

Alors que du point de vue géométrique, les bâtiments sont identiques entre 1999 et 2007, ils ne le sont pas d'un point de vue topologique. Il est donc, *a priori*, impossible de travailler à partir de requêtes spatiales.

De plus, il existe un champ attributaire dans la BD 2007 qui caractérise la géométrie et qui précise le type d'acquisition (photogrammétrie, « BD version antérieure » *etc.*). Par ailleurs, le champ « Nature » a été modifié.

Un traitement manuel a donc été entrepris pour caler les bâtiments de 1999 par rapport à ceux de 2007. Cette opération très longue présente plusieurs avantages : la possibilité de faire des requêtes spatiales, et d'analyser l'évolution du volume bâti.

Du point de vue sémantique, le tableau 8 montre des différences dans la toponymie des bâtiments, par conséquent une catégorisation est proposée pour harmoniser les types. La mise à jour sera effectuée sur les données de 1999.

Années	Catégories	Nature				
2007	Administratif	Mairie	Préfecture			
	Autre	Arène	Théâtre antique	Autre	Fort, blockhaus, casemate	
	Industriel, agricole ou commercial	Autre	Bâtiment agricole	Bâtiment commercial	Bâtiment industriel	Serre
	Religieux	Religieux				
	Sportif	Bâtiment sportif	Tribune			
	Transport	Gare	Péage			
1999	Administratif					
	Autre	Arène	Bâtiment quelconque	Construction légère		
	Industriel, agricole ou commercial	Bâtiment industriel ou agricole	Construction spéciale	Serre		
	Religieux	Autre bâtiment religieux	Bâtiment religieux catholique	Bâtiment religieux israélite	Bâtiment religieux réformé	
	Sportif	Salle de sports	Tribune			
	Transport					

Tableau 8 : Harmonisation des nomenclatures de 1999 et de 2007* (Sevenet, 2013).

Vert = Noms équivalents, Rouge = Noms différents

Pour les deux dates, les catégories sont strictement identiques ; par contre, les classes de nature de bâtiments ont complètement changé. En 1999, les catégories « administratif » et « transport » ne sont pas identifiées, nous les ajouterons manuellement si le bâtiment est toujours le même en 2007. Compte tenu des différences entre les deux dates de la base de données, la fiabilité des résultats n'est pas garantie. Néanmoins, le développement d'une méthode d'harmonisation des données apparaît nécessaire dans la mesure où les nouvelles directives européennes (INSPIRE) incitent à l'harmonisation des bases de données. L'intérêt est également de pouvoir appliquer cette méthode à d'autres espaces urbains étudiés aux mêmes dates.

Catégories	Nombre de bâtiments en 1999	Nombre de bâtiments en 2007	Evolution entre les deux années
Administratif	4	4	0
Autres	22250	22931	681
Indus., Agri., Com.	1819	1502	-317
Religieux	89	86	-3
Sportif	31	70	39
Transport	14	15	1
Total	24207	24608	401

Tableau 9 : Evolution des catégories de bâtiments de Nice entre 1999 et 2007 (Sevenet, 2013).

Nous disposons de la BD Alti® (2001) de laquelle nous pouvons déduire la hauteur des bâtiments. Le traitement manuel de calage permet, dans un premier temps, d'attribuer la valeur hauteur des bâtiments identiques entre 1999 et 2007.

Les polygones bâtis sont découpés, en nœuds puis en points. L'extraction des valeurs du MNT est faite à partir des points, puis on calcule la moyenne de l'altitude de tous les points de chaque bâtiment*.

La BD Topo® de 1999 référence pour chaque bâtiment une valeur d'altitude minimum et maximum. Pour définir la hauteur des bâtiments, il faut déduire de ces valeurs l'altitude. Afin de déterminer laquelle des deux est la valeur la plus proche du réel, nous nous appuyons sur les bâtiments identiques entre les deux années : la valeur qui sera la plus proche de la hauteur déterminée en 2007 sera choisie. La moyenne des hauteurs est de 9.6, celle des H_max est de 9,7 et celle des H_min de 6 ; par conséquent le H_max semble le plus juste.

Certaines valeurs sont négatives, cela provient sans doute d'un manque de précision du MNT, la BD Alti® a une résolution de 50m, certains microreliefs ne sont donc pas pris en compte. La hauteur 0 est attribuée à ces bâtiments.

Passer par les
centroïdes nous
fait perdre de
l'information pour
les grands
bâtiments

		1999	2007	Différence
Nombre de bâtiments		24207	24608	+ 401
Surface (m²)	Somme	9267293	9324585	+ 57292
	Moyenne	383	379	- 4
Hauteur (m.)	Moyenne	10,01	10,07	+ 0,07

Tableau 10 : Evolution de la forme urbaine – hauteur et surface au sol – de la commune de Nice (Sevenet, 2013).

1.2. Analyse de l'évolution du bâti

Pour connaître précisément la dynamique des bâtiments à Nice, il faut opérer plusieurs requêtes spatiales présentées ci-dessous.

Requêtes spatiales utilisées pour identifier les types de changements:

Construction :

- Sélectionner le bâti de 2007 identique à celui de 1999
- Inverser la sélection
- Sur cette sélection, sélectionner le bâti qui intersecte celui de 1999
- Inverser la sélection

Destruction :

- Sélectionner le bâti de 1999 identique à celui de 2007
- Inverser la sélection
- Sur cette sélection, sélectionner le bâti qui intersecte celui de 2007
- Inverser la sélection

Reconstruction :

- Sélectionner le bâti de 2007 identique à celui de 1999
- Inverser la sélection
- Sur cette sélection, sélectionner le bâti qui partage un segment avec celui de 1999
- Inverser la sélection

Refaire la même opération avec le bâti de 1999

Changement de catégorie :

- Joindre le bâti identique de 1999 à celui de 2007
- Calculer la différence des numéros de catégories entre les deux années
- Sélectionner les bâtiments dont la différence n'est pas égale à 0

Le premier constat à la lecture du tableau 11 est la différence dans l'évolution des catégories du bâtiment. Les chiffres du tableau 9 diffèrent de ceux du tableau 11. Cela indique que des bâtiments considérés comme identiques du point de vue morphologique ont changé de catégorie ou que cette dernière a été mal identifiée en 1999.

Un deuxième constat est la différence entre la hauteur moyenne des bâtiments « détruits » et celle des bâtiments construits. Ceci peut s'expliquer de deux manières. Premièrement, la hauteur des bâtiments détruits a été calculée à partir du MNT qui manque de précision, ainsi certains bâtiments ont une hauteur nulle. Deuxièmement, une grande part des bâtiments détruits appartient à la catégorie industrielle et ce sont des serres donc de faible hauteur.

Bâtiments	Détruits	Construits	Différence
Catégorie			
Administratif	0	0	0
Autres	732	1413	+ 681
Indus., Agri., Com.	462	176	- 286
Religieux	3	1	- 2
Sportif	0	8	+ 8
Transport	0	1	+ 1
Total	1197	1599	+ 402
Forme			
Superficie totale (m ²)	501544	558767	+ 57223
Superficie moyenne (m ²)	419	349	- 70
Hauteur moyenne	5,41	7,62	+ 2,21

Tableau 11 : Comparaison entre les bâtiments construits et détruits sur la commune de Nice entre 1999 et 2007 (Sevenet, 2013).

Deux types de transformations du bâti ont été analysés (construction – apparition ; destruction – disparition), mais il est possible d’en détecter cinq par des requêtes spatiales (théoriquement) :

- Construction : bâtiment qui existe en 2007 mais pas en 1999
- Destruction : bâtiment qui existait en 1999 mais a disparu en 2007
- Construction/reconstruction : bâtiment existant aux deux dates mais dont la forme est différente
- Changement de catégorie : bâtiment identique aux deux dates mais dont l’attribut « catégorie » a changé.

Changement	Nombre de bâtiments en 1999	Nombre de bâtiments en 2007
Construction	x	1320
Destruction	830	x
Con/Destruction	367	279
Total	1197	1599
Catégorie	167	

Tableau 12 : Transformations des bâtiments niçois entre 1999 et 2007 (Sevenet, 2013)

La différence qui existe entre le nombre de bâtiments détruits et reconstruits entre 1999 et 2007 s’explique par la densification du bâti : des petits bâtiments ont été détruits pour laisser place à un bâtiment plus grand.

« Etat des bâtiments en 2007 reconstruits en 2007 » signifie que les spécifications données sont valables pour les bâtiments de 2007, tandis que « Etat des bâtiments en 1999 reconstruits en 2007 » correspond aux spécifications des bâtiments de 1999. Par exemple, deux bâtiments de 1999 ont pu être reconstruits en un seul et la superficie d'un bâtiment reconstruit peut avoir changé.

Nombre de bâtiments	Construction	Etat des bâtiments en 2007	Etat des bâtiments en 1999	Destruction
		reconstruits en 2007	reconstruits en 2007*	
Catégorie				
Administratif	0	0	0	0
Autres	1185	224	228	508
Indus., Agri., Com.	128	140	48	322
Religieux	0	3	1	0
Sportif	6	0	2	0
Transport	1	0	0	0
Forme				
Superficie totale (m²)	399470	243310	159298	258234
Superficie moyenne (m²)	303	663	571	311
Hauteur moyenne	7,23	7,8	9,45	4,35

Tableau 13 : Répartition des catégories en fonction des types de transformations* (Sevenet, 2013).

Au regard des attributs de forme simples (hauteur et superficie) du tableau 13, les opérations de reconstruction attestent de la densification. Même si la superficie totale des nouvelles constructions est plus importante que celle des reconstructions, respectivement 399470 m² et 159298 m², si la superficie des bâtiments détruits est soustraite (258234 m²) et celle des destructions/reconstructions est ajoutée (243310 m²), la Ville de Nice est majoritairement reconstruite sur elle-même. De plus, les bâtiments reconstruits ont en moyenne des superficies ou des hauteurs plus importantes (571 m² et 9,45 m) que celle des opérations de constructions sur sol nu (303 m² et 7,23 m.). De même, les bâtiments qui ont été détruits depuis 1999 (pour être reconstruits) montrent une emprise au sol moyenne plus importante et une hauteur moyenne plus faible que les bâtiments reconstruits. Cette analyse atteste de la « verticalisation » de la forme urbaine : moins consommatrice d'espace (2D) mais plus haute.

1.3. Localisation des transformations du bâti

La figure 72 localise les transformations du bâti entre 1999 et 2007. Les transformations des bâtiments semblent être regroupées. Cette hypothèse est attestée par l'analyse du voisinage (Average Nearest Neighbor Distance, ArcGIS©).

L'indice de proximité du voisinage est exprimé grâce au ratio de la distance observée divisée par la distance attendue qui est la moyenne de la distance entre les voisins et celle d'une hypothétique distribution aléatoire. Si l'indice est plus petit que 1 la distribution est regroupée, sinon elle tend vers la dispersion. Ainsi, la distribution des transformations du bâti tend à être agrégée puisque l'indice est inférieur à 1 avec un intervalle de confiance d'au moins 99% (figure 72).

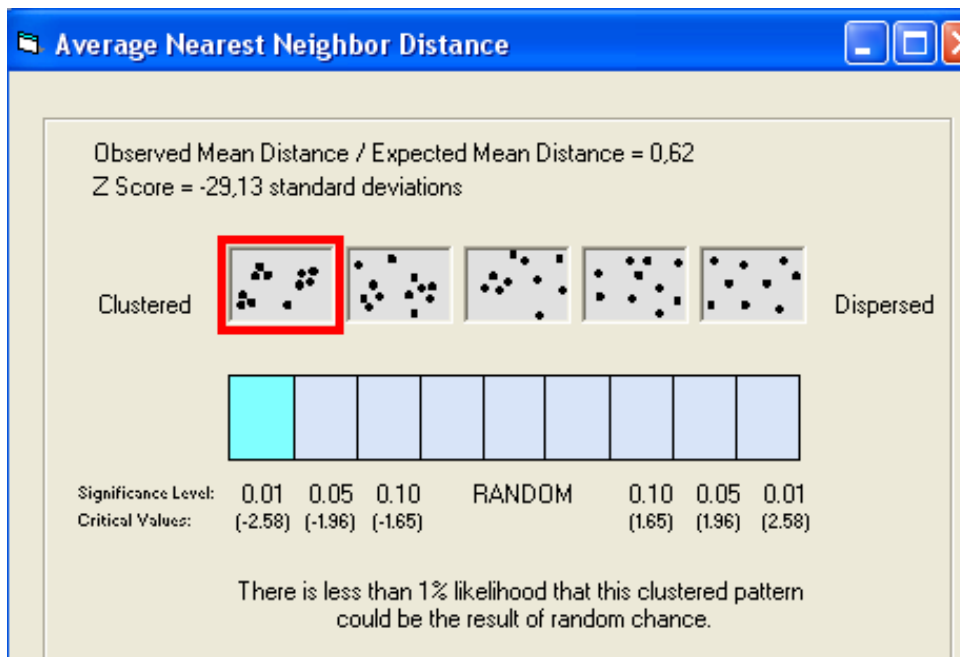


Figure 72 : Sortie graphique du calcul de l'indice de proximité du voisinage (Sevenet, 2013).

Les transformations se situent en majorité en périphérie de la ville. Il peut y avoir plusieurs explications à cette localisation (figure 73) :

- Les réserves foncières sont plus importantes en périphérie car cette zone a été plus récemment urbanisée et les densités bâties y sont plus faibles
- La périphérie de Nice est une zone collinaire. L'implantation de nouveaux bâtiments résidentiels s'expliquerait par la vue sur mer dont S. Robert (2009) a montré qu'elle est un critère important dans le choix de localisation des résidences.

Dans la deuxième partie, nous avons insisté sur les transformations du bâti attendues dans les prochaines années. Compte tenu des principes du développement durable, et de la mise en place d'un dispositif législatif, notamment la loi SRU du 3 décembre 2004, les dynamiques de densification et de reconstruction de la ville sur la ville devraient être observées depuis 2000. Pourtant, d'après la figure 73, les transformations semblent se concentrer dans des zones peu ou pas urbanisées. Pour affiner cette observation, nous avons défini un maillage permettant de mesurer la surface urbanisée. La taille d'une maille est de 200 mètres (taille de la mesure de la continuité du bâti pour l'INSEE). La somme des surfaces – emprises au sol par maille est calculée pour les deux années. Le coefficient de corrélation entre les surfaces urbanisées est de 0.97, autrement dit, la valeur des surfaces urbanisées de 2007 s'explique à 95 % par la valeur de la surface urbanisée de 1999. Mais ce chiffre n'est pas surprenant dans la mesure où il y a peu de changement. Néanmoins, le coefficient de corrélation calculé entre les deux années uniquement sur les transformations est de 0.94 ; soit un coefficient de détermination de 0.90.

Cela signifie que la tendance ne s'est pas inversée. S'il y a eu des changements de destinations, nous ne pouvons pas les connaître. Ce type de transformations correspond

traditionnellement à une faible part de l'ensemble des transformations car il implique des moyens financiers plus importants (Piron, 2003). Néanmoins, la figure 73 montre bien que les transformations se font essentiellement dans la périphérie (la zone la plus grisée constituant le centre-ville, plus dense).

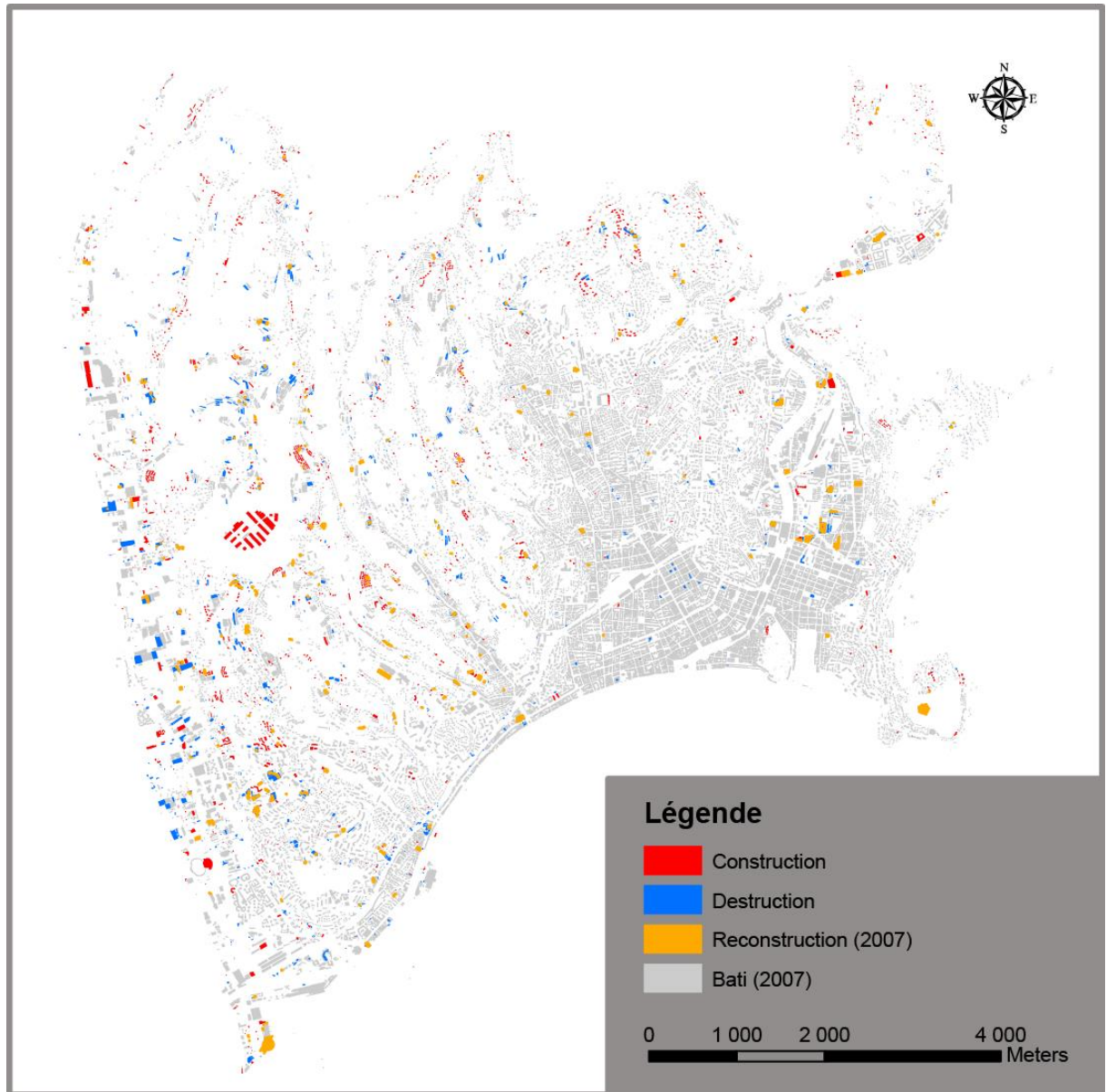


Figure 73 : Localisation des transformations du bâti entre 1999 et 2007 (Sevenet, 2013).

Il convient toutefois de signaler une limite à l'analyse : le manque de précision. En effet, la densité du centre-ville empêche de percevoir les changements. Etant donné, la configuration urbaine dans cette zone, les bâtiments apparaissent comme agrégés, ainsi si un bâtiment est détruit et remplacé, la forme du nouveau sera pratiquement identique à l'ancien (figure 74).

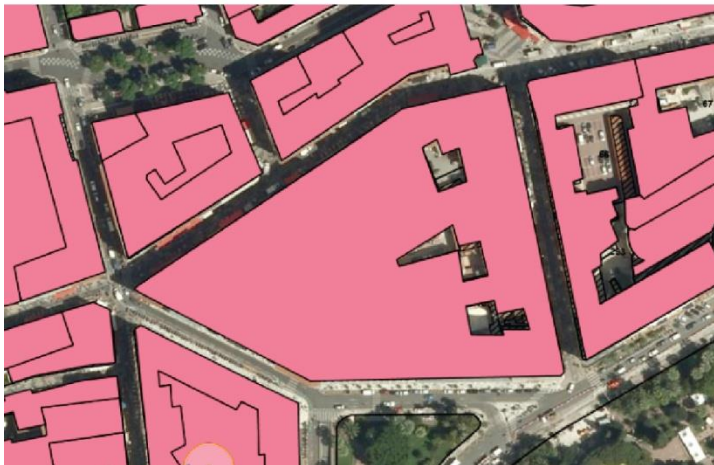
Photographie aérienne



Cadastre



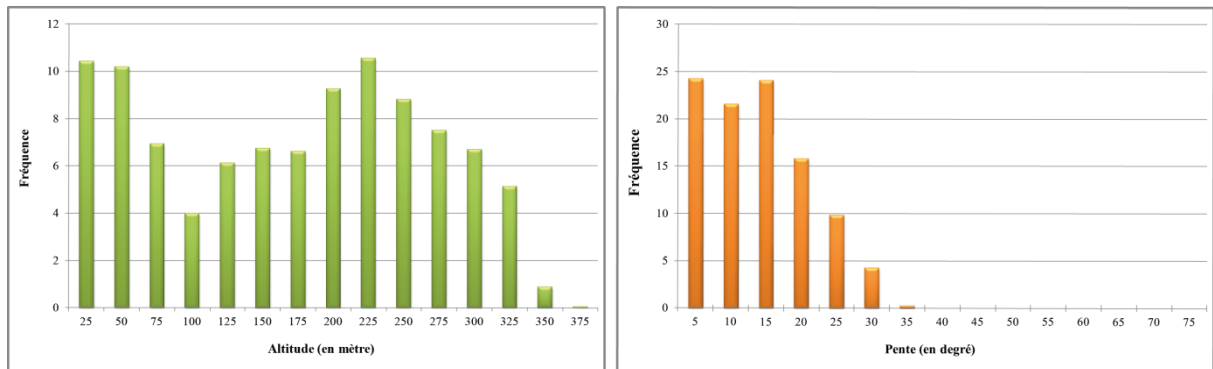
BD TOPO®



**Figure 74 : Problème d'agrégation des bâtiments en zone dense sur la BD TOPO®
(Source : Géoportail de l'IGN, 2013).**

La catégorie « autres » est celle qui constitue la plus grande part des transformations du bâti. Par déduction, elle inclut essentiellement, les bâtiments dont la fonction peut être résidentielle, et dans une moindre mesure l'activité de bureaux. La localisation des bureaux est, d'un point de vue théorique, souvent centrale pour la proximité des réseaux, la figure 73

localise les transformations essentiellement dans la périphérie. Par conséquent, les transformations des bâtiments de catégorie « Autres » concernent essentiellement la fonction résidentielle. Ainsi, il semble intéressant d'analyser plus particulièrement cette dynamique.



Graphique 1 : Les nouveaux bâtiments résidentiels en fonction de l'altitude et des pentes (Sevenet, 2013).

Les nouveaux bâtiments se répartissent sur deux zones géographiques (figure 73 et graphique 1) : la plaine littorale dont l'altitude est inférieure à 50 mètres (21%), plus particulièrement dans la plaine du Var à l'ouest de la ville (figure 73), et les collines, plus particulièrement entre 175 et 250 mètres (29%). La morphologie des nouveaux bâtiments est liée à celle du relief. En effet, l'emprise au sol moyenne d'un nouveau bâtiment dans la plaine est de 594 m² alors que dans les collines, elle est de 215 m². De plus, 96% des nouveaux bâtiments construits en plaine ont une emprise au sol inférieure à 500 m², contre 74% construits sur les collines.

L'altitude semble expliquer pour une partie la localisation des nouveaux bâtiments. Au regard des pentes, il semble que la construction de nouveaux bâtiments sur les collines se fasse plutôt sur les contreforts. La figure 73 montre que la plupart des nouvelles constructions sont localisées sur des pentes inférieures à 15° ce qui ne semble pas incongru dans la mesure où il est plus difficile techniquement de construire sur des pentes importantes. Néanmoins il faut noter, que 24% de ces bâtiments ont été construits sur des pentes comprises entre 10 et 15°. La résolution du MNT à partir duquel a été dérivée la carte des pentes est de 50m, il est donc impossible de tenir compte des micros reliefs (notamment les replats) qui permettent la construction d'un édifice. Cependant, la valeur de la pente est à analyser qualitativement, les bâtiments situés sur ces pentes, sont sur les contreforts des collines et peuvent ainsi bénéficier d'une meilleure vue, notamment celle de la mer. Par conséquent, il est intéressant, à ce stade, d'analyser une possible relation entre les nouvelles constructions et la vue sur la mer.

D'après S. Robert (2009), le terme «vue côtière» serait plus approprié pour cette définition, mais moins séduisant.

Comme cela a été expliqué précédemment, la vue sur mer est un critère important dans le choix de localisation résidentielle. Il faut préciser que la « vue mer » désigne ici « un paysage visible depuis la terre dans lequel figure la mer » (Robert, 2009, p.70)*. Ainsi la définition de la vue retenue est « ce qui se présente au regard, en particulier espace qu'on peut voir d'un point déterminé » (Larousse, 2010). Dans cette analyse, le point de vue est associé aux

nouveaux bâtiments, l'espace visible à la zone de visibilité. Cette dernière dépend des obstacles qui se dressent dans le champ de vision, ils peuvent être de différents types : relief, bâtiments, végétation, pylônes, *etc.* Afin de définir une zone de visibilité, il faut tenir compte du relief et des éléments au-dessus de ce relief*.

L'analyse suivante s'est appuyée sur la méthode développée par Robert (2009). Afin d'analyser les espaces visibles depuis la mer, un maillage de points espacés de 200 m. situés sur la mer (Baie des Anges) dans une zone de 1km depuis le trait de côte a été créé pour procéder à l'analyse de visibilité. En effet, plus une zone (sur terre) est visible de la mer, plus cette zone offre une « bonne » vue sur la mer. Ainsi, le résultat attendu est la somme des zones visibles. L'outil disponible dans l'environnement ArcGIS® procède à l'analyse point par point. Un programme a été développé afin d'analyser la visibilité depuis l'ensemble des points et produire une carte représentant les zones les plus visibles depuis la mer (figure 75).

L'image résultat (figure 75) montre que la bande maritime de 1km est visible principalement du littoral et des premiers contreforts des collines, surtout dans la partie Est de la ville. 28% de ces bâtiments bénéficient d'au moins un point de vue sur la mer dans bande de 1km. Afin d'approfondir l'analyse, nous avons estimé la vue dont bénéficiaient les nouveaux bâtiments avec la même méthode décrite ci-dessus, excepté que les points de vue choisis sont les centroïdes* des bâtiments et pas la mer. L'image présentée ci-dessous (figure 75) indique deux zones de visibilité privilégiée : la plaine du Var et la mer éloignée.

Le modèle « tridimensionnel » utilisé représente le relief et les bâtiments (sont donc exclus les autres éléments du sur-sol).

Passer par les centroïdes nous fait perdre de l'information pour les grands bâtiments.

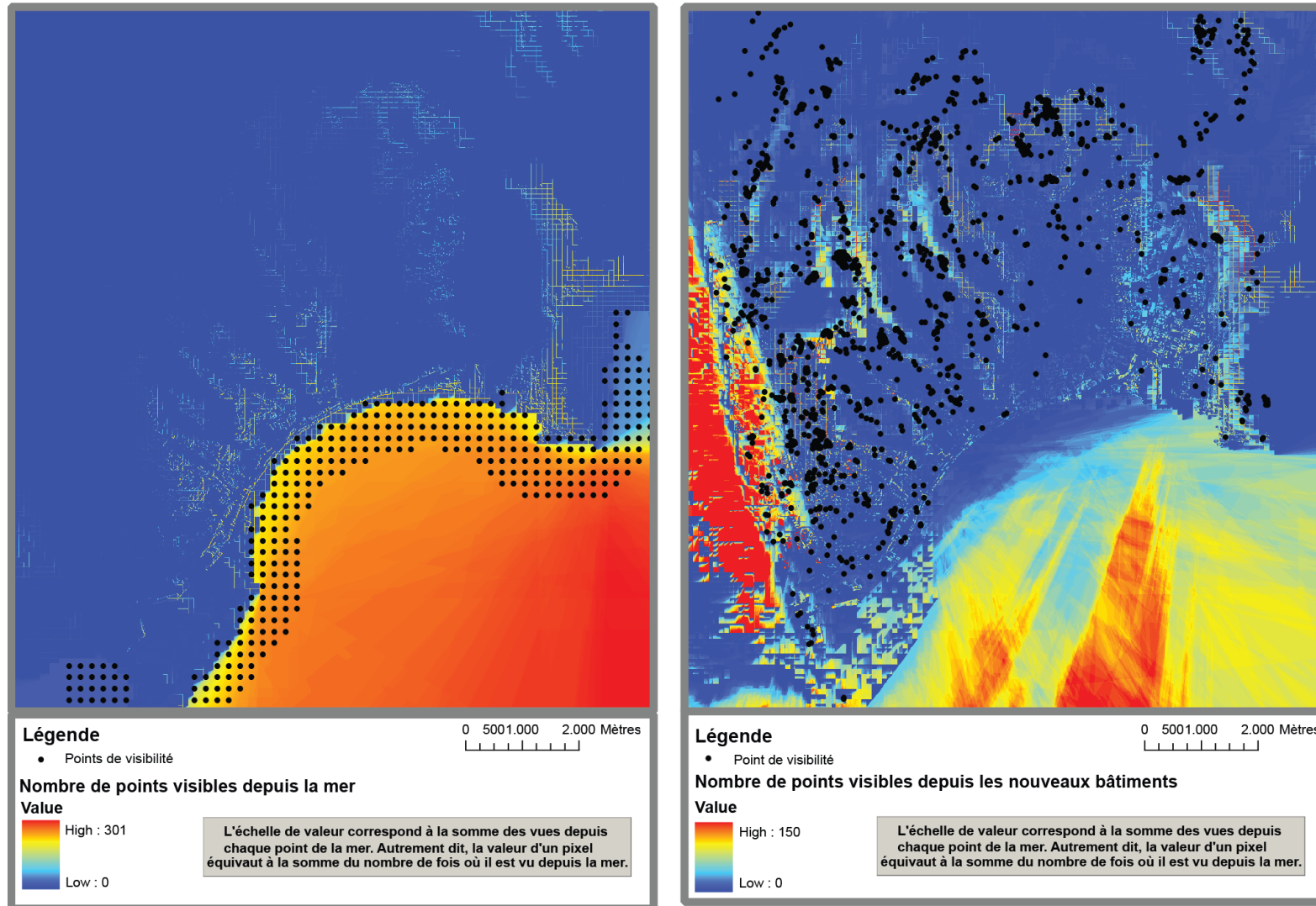


Figure 75 : Zone de visibilité depuis la mer et depuis les nouveaux bâtiments en 2007 (Sevenet, 2013).

2. Caractériser des formes du bâti

Différents types d'analyses sont conduits au regard des grands objectifs de la durabilité. Plusieurs villes dont Paris (IAU 2009), Bordeaux (a-urba 2002), Nantes (AURAN 2005) *etc.*, ont instauré une classification des formes urbaines afin de trouver un modèle d'habitat réunissant les qualités d'un habitat compact et celles d'un espace public agréable à vivre.

Du point de vue méthodologique, presque toutes ces études prennent appui sur une **sélection de sites** faite par des experts. La connaissance du terrain d'étude leur permet d'identifier quelques sites représentatifs d'un territoire. Il n'y a donc pas de détection automatique des formes urbaines sur l'ensemble du territoire. Ensuite, chaque site est évalué au travers d'une **grille d'indicateurs morphologiques** (nombre de niveaux, ratio entre emprise bâtie/ emprise non bâtie, Coefficient d'Occupation du Sol), **socio-économiques** et/ou **démographiques** (ex : nombre de logements par hectare). Certaines études proposent également une **lecture qualitative** de ces sites au travers de leur histoire et de leurs différentes fonctions.

Seule la Communauté d'Agglomération d'Avignon se base sur la densité de logement par hectare calculée sur l'ensemble du territoire en fonction d'une grille raster (Grand Avignon, 2009).

La **reproductibilité** de ces méthodes sur tout le territoire est **difficile**. Tout d'abord, faire une sélection de quelques sites implique une connaissance fine des formes urbaines de chaque territoire analysé. Chaque territoire est **partiellement couvert** par l'étude. Il faut noter que l'étude proposée par la Communauté d'Agglomération d'Avignon couvre l'ensemble de son territoire. Par conséquent, elle constitue une des méthodes développées ci-après.

En outre, **la densité n'est utilisée que a posteriori**. Néanmoins, certains territoires, tels que la ville de Marseille ou la région Ile de France, ont **classé également les sites représentatifs** des types de formes urbaines en fonction de la densité. La classification produite peut être réutilisée pour détecter automatiquement les types de formes urbaines.

Les **découpages** des sites représentatifs sont **différents** d'un site à l'autre et d'une étude à l'autre. Rappelons que la **densité** se calcule par rapport à une **unité spatiale de référence** qui peut être **administrative, statistique** (Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques) ou une **maille**. M. Guérois (2003) a démontré que l'espace doit être pris dans sa continuité.

Collectivités et Instituts					
	Marseille	Nantes	Avignon/CETE	Ile de France	FNAU
Typologie	Habitat	Tissus/Habitat	Habitat	Habitat	Habitat
	Individuel	Lotissements de maisons individuelles	Individuel libre (5 log./Ha)	Individuel	Collectif continu
	Individuel identique	Intermédiaire: maisons de ville ou habitat groupé	Individuel avec procédure (10-20 log./ha)	Mixte	Collectif discontinu
	Villageois	Urbanisation ancienne ou centre urbain	Individuel dense (20-30 log./ha)	Intermédiaire	Intermédiaire
	Continu bas	Opérations récentes (20 ans)	Couronnes urbaines (30-50 log./ha)	Collectif	Individuel continu
	Collectif continu bas	Résidentiels d'immeubles collectifs	Collectif (50-150 log./ha)	-	Individuel discontinu ou groupé
	Collectif discontinu	Grands ensembles	Centres anciens (80-180 log./ha)	-	Typologie mixte
	Tissu mixte	-	-	-	-
	Indicateurs	Densité/morphologie	Densité/morphologie	Densité/morphologie	Densité/morphologie
Coefficient d'occupation du sol		Nombre de log./ha	Nombre de log./ha	Densité résidentielle brute et nette	
Nombre de log./ha		-	-	Nombre de logements	Densité bâtie avec/sans voirie publiques interne
-		-	-	Densité bâtie	Densité de logements
-		-	-	Coefficient d'emprise au sol	Coefficient d'emprise au sol
-		-	-	Surface du terrain	Hauteur/Niveau du bâti
-		-	-	Nombre moyen de niveaux	-
Usage		Usage	Usage	Usage	Usage
Répartition des emprises en %		Répartition des emprises en %	-	-	Répartition des emprises en %
(voirie, bâti, espace vert, autres)		(voirie, bâti, espace vert, autres)	-	-	(voirie, bâti, espace vert, autres)
Socio-démographiques		-	-	-	Démographiques
(variables extraites de l'INSEE)		-	-	-	Densité de populations

Tableau 14 : Exemples de typologies des formes urbaines (Sevenet, 2013).

Pour répondre aux difficultés listées ci-dessus, la méthode vise à caractériser une zone en termes de forme d'habitat et d'estimer l'emprise au sol de chaque type ; ceci, sans recourir à une analyse sur le terrain des formes urbaines, coûteuse et fastidieuse.

Au-delà de la problématique purement urbanistique, la construction d'une typologie dépend trop souvent de la thématique dans laquelle elle est développée. Par conséquent, la définition des formes urbaines et de leur typologie diffère en fonction de l'étude réalisée. Pourtant nous pensons que les formes urbaines sont en relations avec la plupart des phénomènes urbains, ceci est confirmé par l'état de l'art, et de ce fait, une typologie qui serait générale, quelle que soit son application ultérieure, est indispensable.

En France, les tissus urbains sont traditionnellement classés en : centre ancien (médiéval), îlots issus des influences urbanistique hygiénistes (type Haussmann), lotissements, tours et barres des années 60-70. Au-delà de la dimension historique, cette typologie se décline de la manière suivante : maisons indépendantes ou maisons isolées, maisons mitoyennes ou lotissement, petits immeubles résidentiels, grands immeubles résidentiels et tours ou barres d'habitation (FNAU 2006, Grand Avignon, 2009). Tous ces types de tissu urbain sont reconnaissables au cours de promenades ou même sur des photographies aériennes (ANNEXE D).

Plusieurs facteurs permettent d'identifier les types de formes urbaines dans l'espace urbain : la morphologie des bâtiments (l'emprise au sol et la hauteur) et l'agencement de ces bâtiments entre eux (l'espacement et leur régularité). En effet, l'observation de la ville permet de choisir plusieurs critères discriminants. L'emprise au sol est la première variable utile, elle permet de différencier les bâtiments collectifs des centres-villes et/ou des zones d'activités d'avec les maisons individuelles des périphéries. Néanmoins, cette variable est insuffisante car certains bâtiments collectifs n'ont pas une grande emprise au sol (centre ancien, bâtiment collectif bas – 2-3 étages). D'autre part, il est important de distinguer les bâtiments collectifs résidentiels et les bâtiments d'activités (sauf bureaux), les premiers sont caractérisés souvent par une hauteur plus importante que les seconds. Ainsi la deuxième variable choisie est la hauteur des bâtiments.

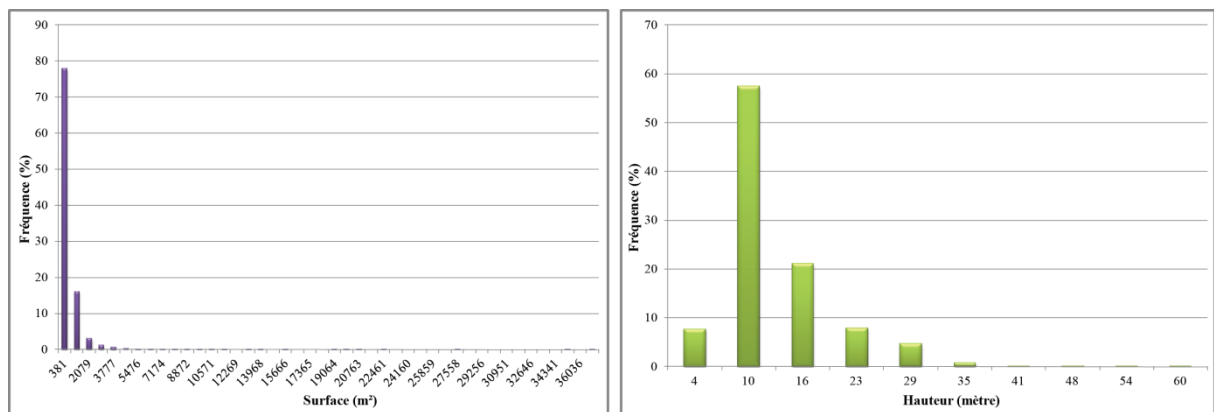
La définition de ces critères corrobore les typologies que l'on retrouve dans les applications urbaines classiques correspondant aux différentes périodes de construction encore observées dans le paysage urbain.

3. La relation entre emprise au sol/hauteur suffit-elle à caractériser la forme du bâti ?

Le manque de données sur la morphologie des bâtiments (cf. chapitre 4, paragraphe 2.1) nous a incité à chercher une relation entre emprise au sol et hauteur. L'expression mesurable de la forme urbaine étant le volume, qui se calcule grâce au triplet longueur, largeur et hauteur, intuitivement, la première hypothèse de détection de forme urbaine est la corrélation positive entre la hauteur et la surface. En effet, d'un point de vue technique, on peut supposer que plus la hauteur d'un bâtiment est élevée, plus la surface, l'emprise au sol, doit être importante. Démontrer une telle corrélation permettrait de recréer la hauteur car cette donnée n'est pas toujours disponible à l'échelle du bâtiment.

Les deux variables (surface et hauteur) sont issues de la BD TOPO ® et la régression est calculée sur Excel. L'analyse de la distribution* des valeurs (graphique 2) montre que la variable hauteur est gaussienne avec une asymétrie à droite tandis que la variable surface est logarithmique. Ainsi cette dernière sera transformée pour la suite de l'analyse statistique.

L'analyse de la distribution se base sur une discrétisation des valeurs autour de la moyenne en prenant pour borne de classe l'écart-type.



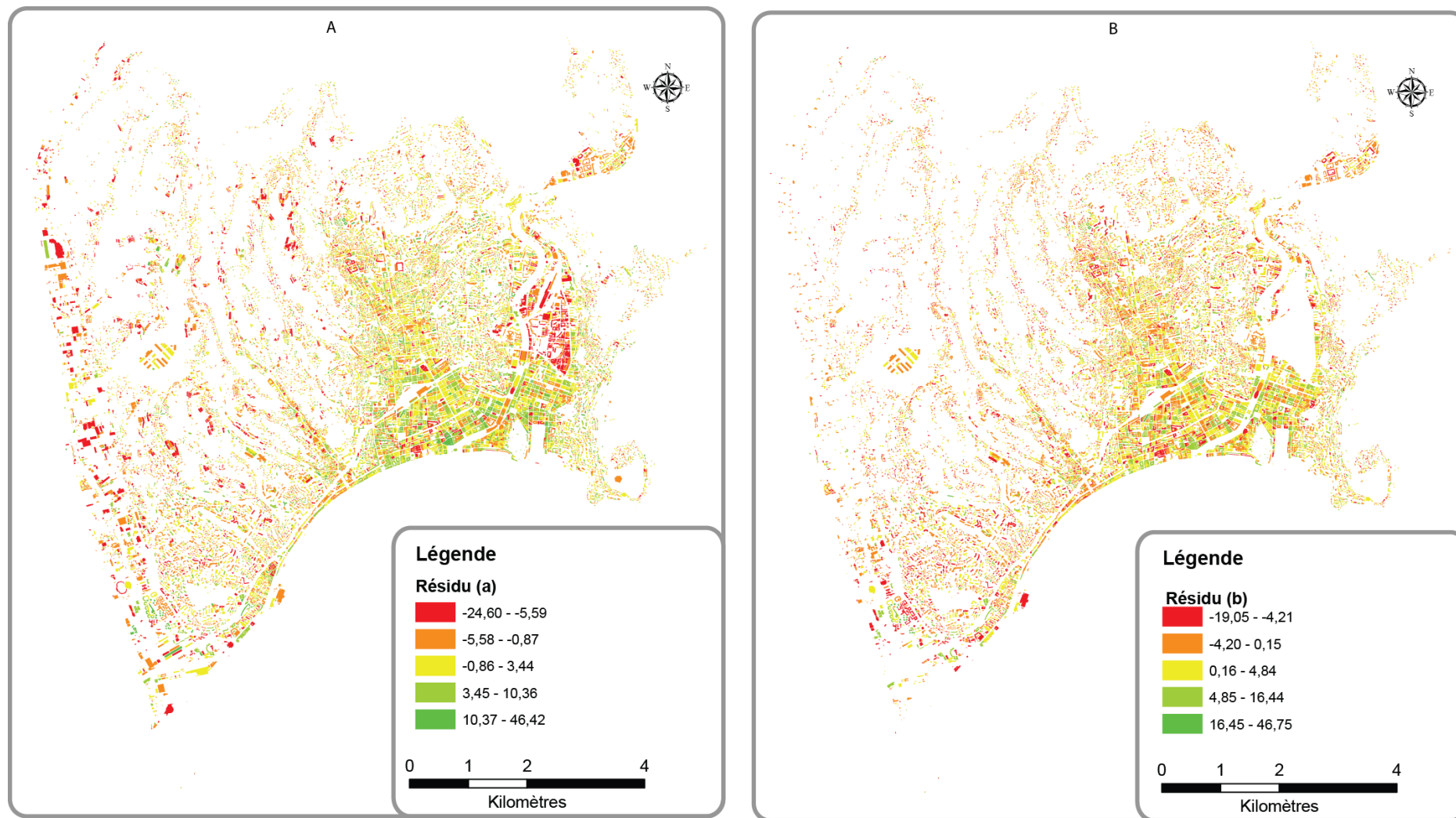
Graphique 2 : Distribution statistique des variables hauteur et surface (Sevenet, 2013).

Après la transformation des valeurs de surface, l'analyse de la régression entre hauteur et surface montre une faible relation avec un coefficient de détermination de 0.36. Néanmoins, il faut préciser que dans la BD Topo® plus de 900 bâtiments ont une hauteur de 0. Cette valeur s'explique soit par une erreur d'évaluation de la hauteur dans la création des données, soit par la présence de petits bâtiments (abris, transformateurs, par exemple). Après avoir exclu ces bâtiments de l'analyse, la relation est toujours faible, avec un coefficient de détermination équivalent.

Comme indiqué sur la figure 76A, le modèle de régression surestime les hauteurs des bâtiments industriels et commerciaux en majorité localisés dans la vallée du Var (partie ouest de la ville) et dans la plaine du Paillon (partie est). En effet, ces bâtiments présentent une morphologie très particulière : souvent ils sont caractérisés par une très grande emprise au sol mais une hauteur peu importante.

Nous procédons à une nouvelle régression en supprimant tous les bâtiments commerciaux, industriels, agricoles mais aussi les bâtiments administratifs. Le coefficient de détermination

s'améliore : 0.46. D'après l'analyse des écarts au deuxième modèle de régression (figure 76B), il semble que les sur- et sous-estimations sont assez hétérogènes. Néanmoins, il faut noter que globalement le modèle surestime la hauteur des bâtiments sur les collines de l'ouest de la ville, où le bâti est majoritairement individuel ou en petit habitat collectif, et que la hauteur d'un certain nombre de bâtiments situés dans la frange périphérique de la ville et très sous-estimée.



**Figure 76 : Cartographie des résidus de la régression entre les variables "hauteur" et "surface"
 A – sur tous les bâtiments et B : sur les bâtiments « résidentiels » (Sevenet, 2013).**

4. Analyse des ressemblances

4.1. Hypothèses et méthodes

Nous posons comme hypothèse que le tissu urbain est marqué par des zones de bâtiments homogènes selon certains critères, notamment la hauteur et l'emprise au sol, séparées par des discontinuités.

Définir l'homogénéité d'un objet sous-entend que l'on peut le différencier de son environnement. Cette différenciation devient visible par une discontinuité plus ou moins nette qui peut apparaître par l'imbrication de formes différentes ou au contact de phénomènes différents (forces) qui structurent l'espace à leur manière.

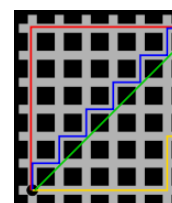
L'idée d'homogénéité du tissu urbain implique celle de ressemblance. Un espace homogène est donc un espace dont les attributs se ressemblent. L'objectif est d'identifier des zones de bâtiments homogènes, avec, pour hypothèse, que des bâtiments proches ont plus de chances de se ressembler que des bâtiments éloignés.

D'après Charre (1995, p.34), « l'existence d'une structure spatiale modifie ou rend caducs les modèles les plus usuels de la statistique, qui concernent des variables aléatoires, c'est-à-dire des variables dont les valeurs sont indéterminées ». Ce point explique sans doute les résultats obtenus avec le modèle de régression. Une hypothèse de structure spatiale comme nous la défendons ici implique l'utilisation d'autres outils statistiques comme l'autocorrélation spatiale*. « L'autocorrélation mesure l'intensité de la relation entre la proximité des lieux et leur degré de ressemblance » (Pumain, Saint-Julien, 1997). En d'autres termes, elle analyse la force du lien qui existe entre les valeurs d'éléments proches dans l'espace. Dans le cas de l'autocorrélation spatiale positive, les valeurs similaires de la variable sont regroupées dans l'espace ; tandis que, dans le cas d'une autocorrélation négative, les valeurs les plus dissemblables de la variable sont regroupées dans l'espace.

Les unités spatiales étudiées ici sont particulières dans la mesure où elles ne sont pas toujours contiguës. En effet, les bâtiments peuvent être mitoyens lorsqu'il y a une forte densité mais également plus diffus dans l'espace et séparés par la voirie. Dans ce cas de figure, il est possible de les considérer comme des unités spatiales ponctuelles, entre lesquelles la distance est calculée et ainsi étudier l'autocorrélation spatiale en fonction de cette distance (Charre, 1995). Généralement, il existe deux types de distance pour évaluer l'autocorrélation : la distance euclidienne et celle de Manhattan*. La première constitue la plus courte distance entre deux points tandis que la deuxième est définie par la distance qu'il faudrait parcourir entre deux points selon un quadrillage régulier (par exemple les rues d'une ville américaine). Par conséquent, cette dernière sera appliquée à la mesure de l'autocorrélation spatiale.

Parallèlement, il faut noter que la mesure de l'autocorrélation est fortement liée au problème du MAUP, exposé dans la deuxième partie. Le choix de l'unité spatiale contiguë peut présenter des difficultés, ainsi le choix de l'analyse à l'échelle du bâtiment permet de s'affranchir de ce problème.

Le détail de la formule utilisée est développé en Annexe E.



La distance euclidienne est indiquée en vert tandis que la distance de Manhattan est matérialisée par les autres couleurs. Source : [10]

Il existe deux coefficients d'autocorrélation spatiale : Moran et Geary. L'indice de Moran sera utilisé ici car il présente un double avantage : sa robustesse a été prouvée (Pumain, Saint Julien, 1997) et il a été intégré dans les outils du logiciel ArcGIS®.

Cet outil propose plusieurs modes de calcul de la distance (euclidienne ou de Manhattan) : la distance inverse simple ou au carré, avec ou non une limite d'indifférence*, et la distance dans un certain périmètre (distance dans une bande) :

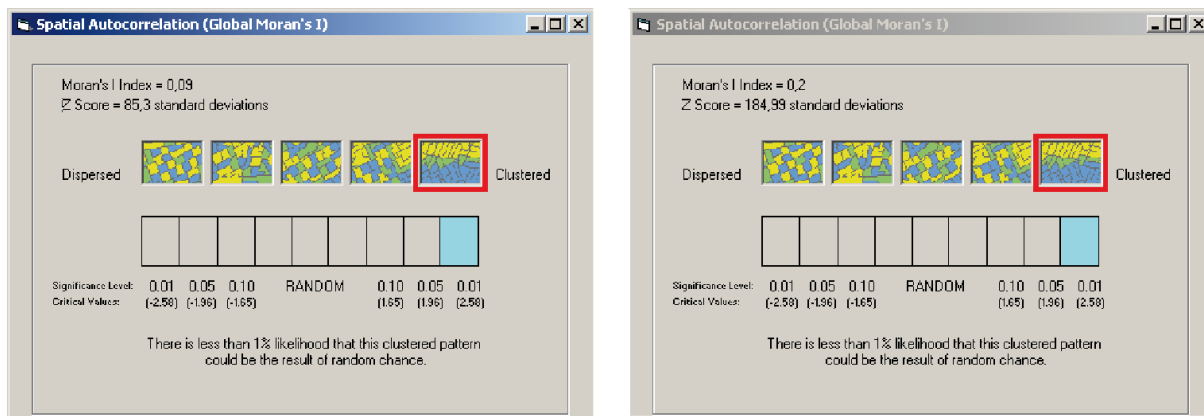
La limite d'indifférence est la distance au delà de laquelle la valeur des unités spatiales n'est plus prise en compte parce que considérée comme peu influente.

- L'**inverse distance** : toutes les composantes (les bâtiments) ont un impact sur les autres composantes, mais plus les composantes sont éloignées les unes des autres, plus leur influence diminue.
- L'**inverse distance au carré** : l'hypothèse est la même que celle de l'inverse distance, mais la décroissance de l'influence est plus forte. Autrement dit, si l'influence diminue plus rapidement, seuls les voisins les plus proches exercent une influence importante dans le calcul de l'autocorrélation.
- La **distance « seuil »** : chaque composante est analysée dans son voisinage dans la limite d'une certaine distance. Ainsi, les composantes situées au-delà de cette distance critique ne sont pas prises en compte dans le calcul de l'autocorrélation.
- La **zone d'indifférence** : Les composantes situées à l'intérieur de la distance limite sont incluses dans l'analyse, une fois que la distance critique est dépassée, l'influence des composantes diminue rapidement.

Dans un premier temps, l'autocorrélation est calculée en fonction des différentes hypothèses d'interaction des bâtiments entre eux, autrement dit des différents types de distances expliqués ci-dessus. Puis les résultats obtenus permettent de vérifier les hypothèses et de cartographier les ensembles homogènes.

4.2. Résultats

La figure 77 signale l'existence d'une autocorrélation spatiale entre les bâtiments, quelle que soit la variable caractérisant la morphologie. En effet, quelle que soit l'hypothèse de distance utilisée (distance inverse, distance inverse au carré, distance limite ou zone d'indifférence), l'indice de Moran est positif. De plus, la valeur de p est égale à 0 et la valeur absolue du Z-score est supérieure à la valeur critique de l'intervalle de confiance inférieur à 0.1, l'hypothèse nulle peut donc être rejetée. Il y a donc une relation entre la proximité des bâtiments et leur surface/hauteur.



Indice de Moran calculé sur la surface des bâtiments

Indice de Moran calculé sur la hauteur des bâtiments

Figure 77 : Autocorrélation spatiale mesurée par l'Indice de Moran (Sevenet, 2013).

Au regard des valeurs prises par l'indice, la relation spatiale entre les bâtiments est caractérisée par une distance inverse au carré. En effet, l'indice de Moran est plus important dans le cas de cette hypothèse de distance (0.34 pour la surface et 0.94 pour la hauteur) qu'avec celle d'une distance inverse (0.09 pour la surface et 0.2 pour la hauteur). En d'autres termes, la relation entre les bâtiments diminue de manière exponentielle avec la distance. De plus, il faut noter que la ressemblance des hauteurs des bâtiments proches est plus forte que celle des surfaces (0.94 pour la première variable contre 0.34 pour la seconde).

Néanmoins, l'indice reste proche de 0, le rôle du voisinage est moins significatif que l'on peut l'imaginer. Cela peut sans doute s'expliquer par la présence de zones de bâtiments similaires plus éloignées, par exemple les zones de lotissements sont dispersées sur l'ensemble de la périphérie contrairement aux zones de bâtiments denses type centre-ville. Ce point peut déjà être confirmé par l'analyse de l'indice de Getis et Ord (nommé outil « agrégat des basses/hautes valeurs » sous ArcGIS®) qui mesure le degré d'agrégation des valeurs en fonction de leur ordre*. En effet, les résultats de l'indice calculés selon les différentes hypothèses de distance montrent une faible relation entre les bâtiments quelle que soit la variable analysée. Néanmoins, il souligne une agrégation des grandes valeurs.

Afin d'analyser la relation de proximité entre les bâtiments, l'analyse de l'autocorrélation par l'indice de Moran est effectuée de nouveau en fixant une limite ou un seuil dans l'évaluation de la relation spatiale. La deuxième partie de la figure 77 indique les résultats obtenus. Deux points sont à souligner : la relation spatiale la plus forte est toujours la distance inverse au carré (0.37 pour les surfaces et 0.9 pour les hauteurs) et des discontinuités apparaissent en fonction de la limite choisie. En effet, l'indice de Moran le plus grand apparaît lorsque l'analyse est effectuée dans une limite de 500m dans le cas d'une distance au carré et dans une limite de 200m dans le cas d'une distance dans une zone définie et dans celle d'une zone d'indifférence*.

Cet indice fait partie de la statistique inférentielle, donc dans un contexte d'hypothèse nulle (absence de relation).

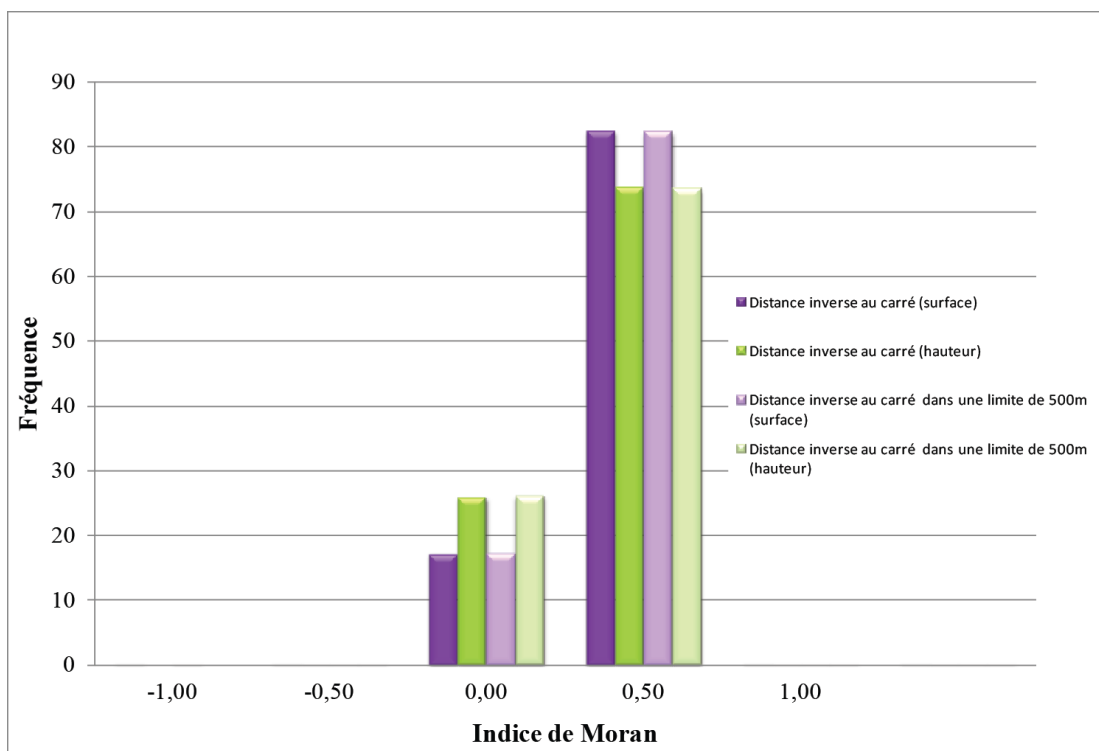
Rappelons que la différence entre les hypothèses de distances a été présentée en introduction de cette sous-partie.

Compte tenu des résultats obtenus, la cartographie de l'indice de Moran pour chaque bâtiment présentée ci-après est réalisée avec une hypothèse de distance inverse au carré sans et avec une limite de 500m.

4.3. Cartographie des résultats

Rappelons que l'outil d'analyse des similitudes ou des dissemblances identifie les groupes d'éléments ayant des valeurs semblables en grandeurs. En d'autres termes, cet outil permet de cartographier les résultats de l'Indice de Moran Local produit pour chaque bâtiment. Pour ce faire, l'outil calcule la valeur de l'Indice de Moran Local, le Z-score, la valeur p qui représentent la signification statistique de la valeur d'indice calculée, et donne un code représentant le type de groupe pour chaque élément. Concrètement, une valeur positive de l'indice indique qu'un bâtiment est entouré par d'autres ayant des valeurs semblables ; inversement, une valeur négative de l'indice indique qu'il est entouré par d'autres ayant des valeurs dissemblables. Il faut néanmoins noter que l'indice de Moran Local ne peut être interprété qu'en fonction d'un Z-score ou d'une valeur p significatifs.

L'analyse des similarités des surfaces des bâtiments est effectuée par la fonction de distance inverse au carré. En effet, l'analyse statistique globale a montré que l'indice de Moran calculé à partir de l'hypothèse d'une réduction de l'influence en fonction de cette distance était plus fort.



Graphique 3 : Distribution des Indices de Moran de la hauteur et de la surface des bâtiments (Sevenet, 2013).

La distribution des indices (graphique 3) indique que l'autocorrélation spatiale est plutôt faible car presque toutes les valeurs sont proches de 0 (comprises entre -0.5 et 0.5).

Néanmoins, l'autocorrélation est plutôt positive il existe donc une certaine influence de la proximité sur les caractéristiques morphologiques des bâtiments.

La cartographie des indices de Moran (figure 78) indique des différenciations spatiales. Quelle que soit la variable concernée, l'autocorrélation est plutôt positive voire supérieure à 0.5 pour les bâtiments du centre-ville et des collines (zone de bâti diffus), et elle est plutôt négative dans la 1^{ère} couronne périurbaine. Il faut préciser que ces différenciations spatiales sont légèrement différentes : la variabilité des hauteurs au centre-ville est plus forte alors que le bâti des collines est plus homogène.

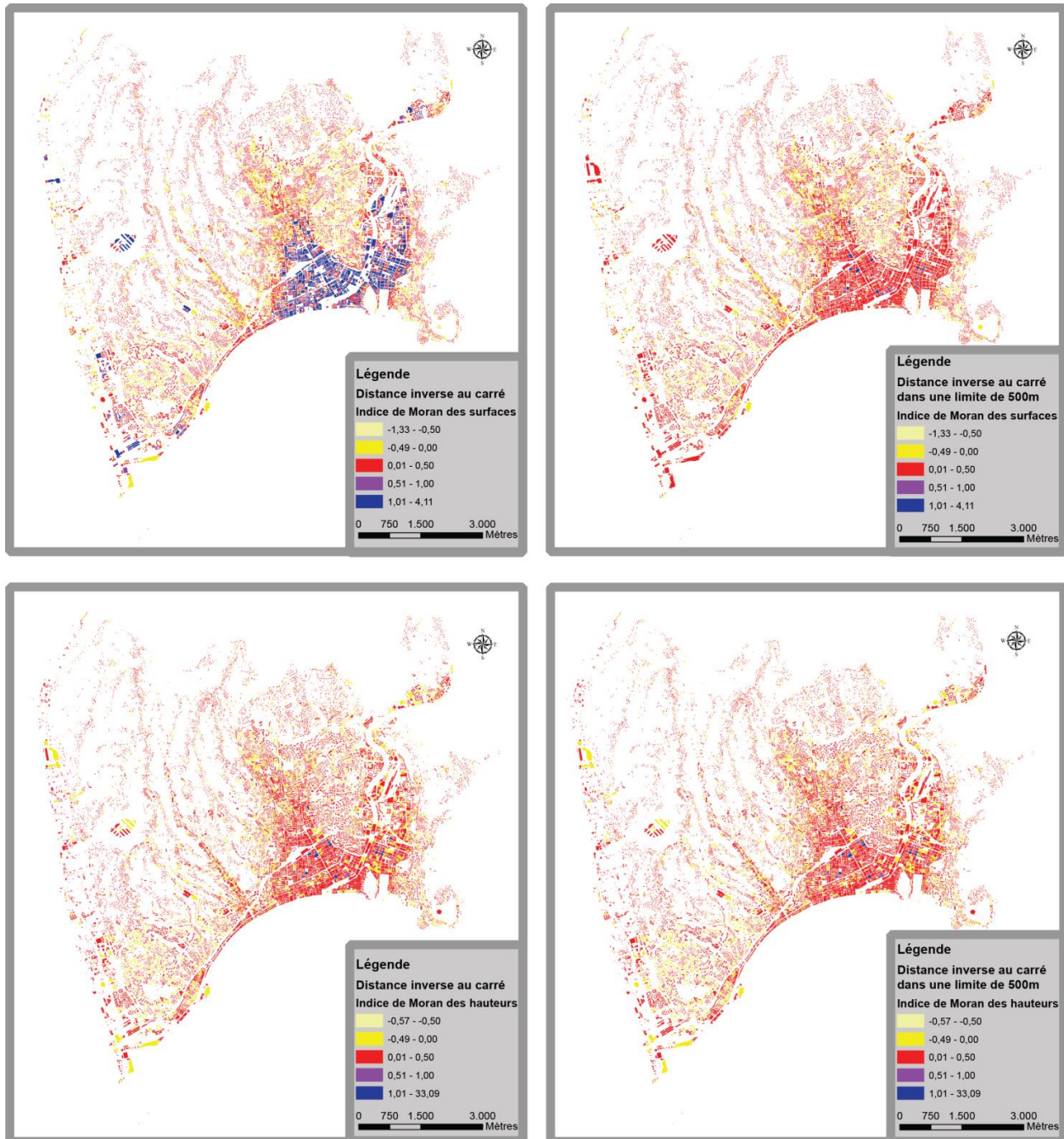


Figure 78 : Analyse de la similitude de la hauteur et de la surface des bâtiments (Sevenet, 2013). Les cartes du haut présentent les résultats de l'indice pour les surfaces et celles du bas pour les hauteurs.

Les résultats présentés ici sont à tempérer dans la mesure où les résultats cartographiques sont peu significatifs. En effet, le tableau 15 présente la significativité des résultats obtenus et il montre que moins de 5% des surfaces des bâtiments ont un indice ayant un p inférieur à 0.05, et moins de 20% des hauteurs.

Variables	Type de distance	Part des indices significatifs	Cotype		
	Inverse Distance au carré		HH	HL	LH
Surface	sans limite	4,62	95	2,9	2,1
	500m	4,81	98,4	3,4	2,5
Hauteur	sans limite	19,51	52,9	4,7	8,5
	500m	20,44	54,6	5	9

Tableau 15 : Résultats statistiques de la cartographie de l'autocorrélation spatiale (Sevenet, 2013).

Le calcul de l'autocorrélation informe également sur la nature des valeurs. Autrement dit sur la manière dont les valeurs se regroupent (grandes valeurs entre elles, petites et grandes, petites entre elles). Toujours d'après le tableau 15, les indices de Moran calculés sur les hauteurs ou sur les surfaces des bâtiments plus significatifs pour l'agrégation des grandes valeurs. Ainsi, les grands bâtiments sont plus similaires. Ces bâtiments sont situés dans le centre de la ville ainsi que dans la vallée du Var (zones commerciale et industrielle). A l'inverse, les bâtiments dont la surface s'oppose à celles de leurs voisins se situent en zone périurbaine car cette zone est plus contrastée morphologiquement de par son caractère dynamique.

Cette étude révèle une fois de plus les **trois grandes zones** de l'espace urbain niçois.

- le **centre-ville** dense, compact, caractérisé par des bâtiments de surfaces et de hauteurs importantes, qui présente une relative homogénéité.
- une **frange péri-urbaine** moins dense et caractérisée par des bâtiments très hétérogènes.
- le **bâti diffus** périurbain caractérisé par des bâtiments de type maison individuelle et des zones d'activités-

Malgré ces résultats peu surprenants, il est nécessaire de relativiser ces résultats. En effet, comme cela a été indiqué dans le paragraphe précédent, les valeurs d'indice obtenues sont peu significatives. Le calcul de l'autocorrélation effectué ici tient compte de la distance entre les bâtiments, et celle-ci est nécessairement différente en fonction des densités des bâtiments. Cette analyse n'est donc pas suffisante. Il semble nécessaire soit, d'opérer un changement d'échelle (une analyse multiscalaire en fonction des densités), soit d'intégrer l'espacement dans l'analyse de la morphologie du bâti. Cette dernière option a été retenue car elle nous a paru plus pertinente.

5. Détection de types morphologiques à partir de base de données bâtiments (BD TOPO®)

Compte tenu des résultats obtenus par l'analyse de la similarité des emprises au sol et des hauteurs, il apparaît que les bâtiments se ressemblent davantage quand ils sont voisins. Ainsi, l'hypothèse de l'existence de types morphologiques de tissu urbain est confirmée. Les lignes qui suivent présentent la démarche mise en place pour détecter les types de formes urbaines et déterminer une typologie cohérente des tissus bâtis.

La classification des formes urbaines est utilisée dans divers domaines (paysage, pollution de l'air, nuisances sonores, sociologie, *etc.*). Actuellement toutes les typologies sont développées selon une analyse spécifique des formes urbaines (sociologique, économique ou environnementale). La typologie que nous souhaitons utiliser se veut généraliste et transversale.

Plusieurs méthodes de détection du bâti développées à partir de la télédétection existent. La production des données vecteurs, de l'IGN notamment, en témoigne (cf. chapitre 4, paragraphe 2.1). Néanmoins, ces traitements ne prennent pas en compte la troisième dimension. De même, la méthode développée pour l'analyse du tissu urbain proposée par le Grand Lyon (2009) et reprise par le CERTU s'appuie sur l'emprise au sol et la continuité du bâti mais exclut la hauteur ou la compacité.

Des travaux sont actuellement menés pour proposer une détection de tissus urbains constituée à partir d'une typologie de 9 classes : centre-ville, habitat individuel, habitat collectif, habitat mixte, emprise spécialisée, emprise spécialisée peu bâtie, réseau ferré et routier et hydrographie (cf. ANR GeOpenSim, 2011). La classification s'appuie sur un nombre de mesures à l'échelle du bâtiment (longueur, largeur, élongation, *etc.*) et à l'échelle de l'îlot (nombre de bâtiments, surface bâtie *etc.*) avec un modèle type arbre de décision et des règles de formes. Cette méthode nous semble pertinente mais pose deux problèmes majeurs :

- Elle n'aborde pas la troisième dimension directement.
- Elle s'appuie sur une typologie avec des règles de formes prédéfinies.

A partir de deux méthodes d'analyse de la forme urbaine de Peneau (1995), deux démarches sont possibles :

- L'approche géométrique, qui recherche l'échelle géométrique des formes de l'espace urbain
- L'approche typologique, qui souhaite identifier des catégories de tissus urbains possédant des caractéristiques de rugosité connues et relativement homogènes. Il est donc nécessaire de définir un indicateur de rugosité pour chaque catégorie.

L'approche méthodologique développée dans les paragraphes suivants combine en partie ces deux approches. En effet, la méthode proposée souhaite mettre en évidence des types de formes urbaines à partir de données sur les bâtiments. Elle se déroule en deux temps :

- Agrégation des bâtiments au regard des trois critères morphologiques de base que sont l'emprise au sol, la hauteur et l'espacement et des trois critères de forme que sont le volume, la complexité 2D et la complexité 3D
- Détection des discontinuités.

5.1. Présentation de la méthode de typologie par la morphologie mathématique

La méthode est constituée d'un chaînage de traitements de morphologie mathématique.

La démarche retenue est présentée dans les lignes qui suivent. Elle a été appliquée sur l'image représentant l'ensemble des bâtiments de Nice. L'image a été créée à partir de la BD TOPO de 2007. Pour analyser la forme du bâti et sa répartition, il faut disposer d'une image binaire (noir et blanc). Les données dont nous disposons sont en format vecteur, il faut donc les transformer en format raster. Comme nous souhaitons conserver la précision des bâtiments, la taille du pixel est définie à 5 mètres, résolution minimale compte tenu des restrictions du logiciel Micromorph©. Il impose une dimension d'image maximum et une largeur qui doit être un multiple de 32 et une longueur multiple de 2 ainsi qu'une taille qui ne peut excéder 2784 x 2802 pixels.

M.Guérois (2003) a proposé une analyse de la forme urbaine s'appuyant sur l'analyse du voisinage et de la proximité des lieux, afin de s'affranchir de toute référence à un périmètre fonctionnel fixé *a priori*. Notre posture est similaire, nous souhaitons reconstituer un pavage des formes urbaines qui reflète réellement leur différence.

Les discontinuités des formes urbaines sont observables à la lecture d'une photographie aérienne, mais de quelle manière les tracer ? Où la discontinuité passe-t-elle exactement car les bâtiments sont, pour la plupart, disjoints et ne sont pas espacés de la même manière ?

Dans la méthode proposée ci-dessous, l'algorithme du squelette par zone d'influence est utilisé pour introduire de la contiguïté et une évaluation de l'espacement*. Le squelette par zone d'influence sert à délimiter l'aire rattachée à chaque bâtiment. Pour chaque critère pris séparément, la valeur est transformée en niveaux de gris et attribuée à la zone du bâtiment issue du squelette par zone d'influence. Cette procédure est illustrée sur la figure 79, images A et B.

En premier lieu,
l'espacement est
donc pris en
compte de manière
explicite.

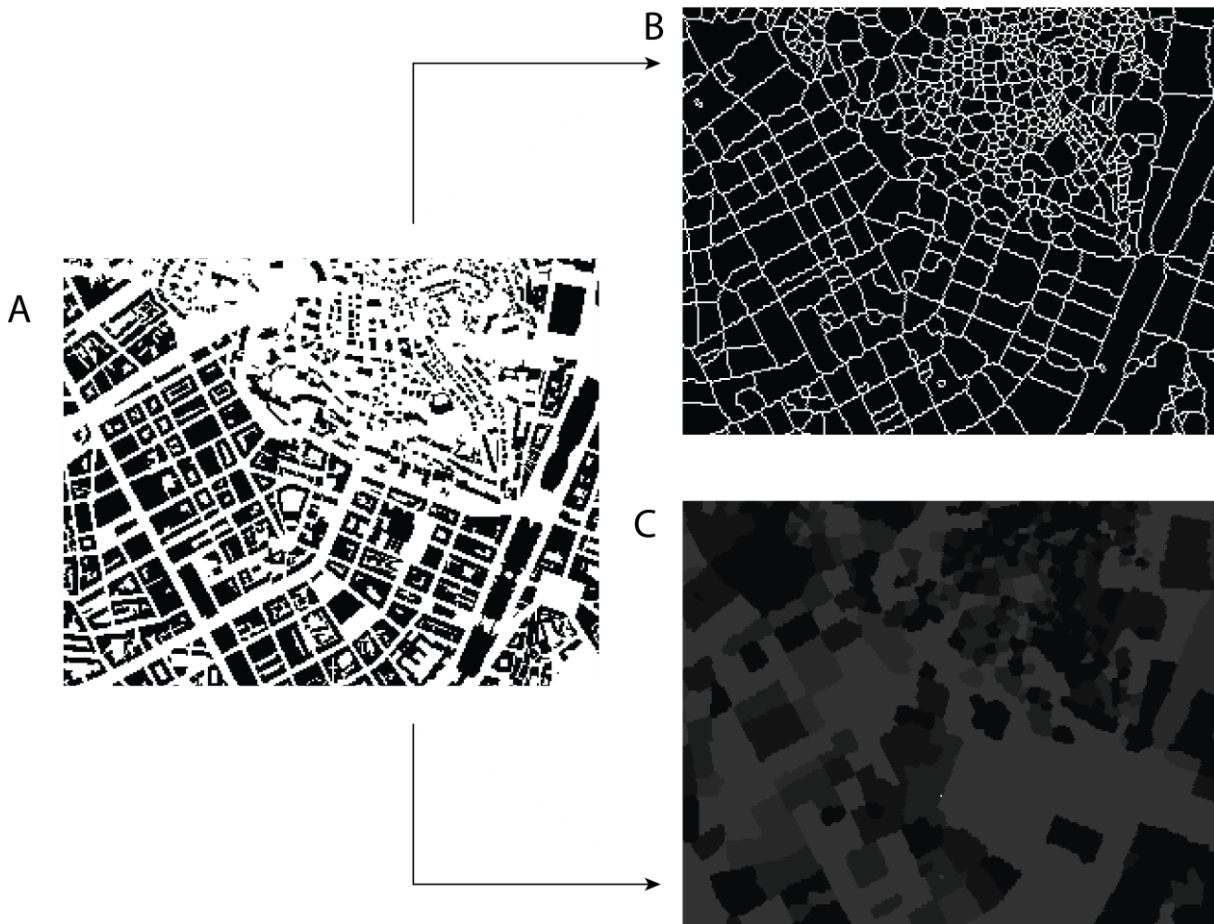


Figure 79 : Squelette par zone d'influence (B) fait à partir des bâtiments (A) puis affectation des niveaux de gris de la variable complexité 2D à chaque zone (C) (Sevenet, 2013).

Les contours de chaque zone sont ensuite supprimés (figure 79 C). Il est alors possible de détecter des zones connexes ayant les mêmes valeurs.

Cette séquence de transformations d'images est appliquée tour à tour à la surface et à la hauteur des bâtiments pour obtenir des images distinctes de ces 2 variables. Ces images servent ensuite de base à la détection des discontinuités.

5.2. Détection des discontinuités sur la hauteur, l'espacement et la surface

5.2.1. Premier essai de détection des discontinuités par Hiérarchie des Gradients (HG)

Pour mettre en évidence ces contrastes internes, il faut tout d'abord calculer le gradient morphologique qui permet de détecter les contrastes de l'image*, puis le hiérarchiser, selon la procédure exposée dans le chapitre 1 paragraphe 4 qui supprime au fur et à mesure les contrastes les moins forts.

Dans cette analyse, la hiérarchisation des contrastes se fait sur 8 niveaux quelle que soit la variable. Afin d'évaluer les découpages issus de ce traitement, l'analyse de la variance des



Les contrastes entre niveaux de gris et l'image gradient correspondante (Voiron, 2003)

valeurs est effectuée. Les images produites sont vectorisées sous SIG et l'analyse de variance est réalisée en attribuant les valeurs des bâtiments à leur zone de regroupement.

Le tableau 16 présente les résultats de l'analyse pour les deux niveaux les plus pertinents. La hiérarchisation des niveaux 1 et 2 ne permet pas de regroupement significatif et les niveaux supérieurs à 4 sont trop généralistes. Néanmoins, les segmentations produites au niveau 4 sont peu concluantes dans la mesure où la part d'explication (mesurée par l'effet d'appartenance) n'est que de 16% pour la variable surface et de 26% pour la variable hauteur.

	Variance	Totale	Intra	Inter	Effet d'appartenance
Surface	Niveau 3	10317958689	7654315556	2663643133	26
	Niveau 4	12817509832	10834064487	1983445345	15
Hauteur	Niveau 3	819896	533151	286745	35
	Niveau 4	874254	656638	217616	25

Tableau 16 : Exemple de résultats de l'analyse de variance réalisée sur les classifications issues de la hiérarchisation du gradient (Sevenet, 2013).

La segmentation obtenue au 3^{ème} niveau de la hiérarchisation semble la plus intéressante. D'après le tableau 16, le découpage produit explique à 30% les surfaces des bâtiments et à 45% les hauteurs. Cette méthode de partition du tissu urbain niçois semble pertinente, néanmoins le découpage créé semble peu efficace au regard des résultats de l'analyse de variance. De ce fait, une autre méthode de segmentation est testée afin de comparer les résultats.

5.2.2. Deuxième essai de détection des discontinuités par Ouverture, Connexité et discrétisation (OC)

Sur les trois critères retenus pour mettre en place la typologie, deux correspondent à des caractères quantitatifs continus : la hauteur et la surface, et le troisième, à un caractère qualitatif ordinal, l'espacement. Afin de coupler (superposer) les trois critères sur une même image, il est nécessaire de transformer les caractères et de créer des classes, en fonction de la taille et de la forme, pour les surfaces, et du nombre d'étages, pour la hauteur.

Pour classer **les surfaces des bâtiments** en fonction de leur taille et de leur forme, l'analyse par ouverture granulométrique est utilisée (cf. chapitre 1). Rappelons que l'objectif est de détecter des espaces où les bâtiments sont homogènes par leur forme et que l'analyse par ouverture granulométrique nécessite le choix d'un élément structurant représentatif de l'objet. Traditionnellement, les typologies de bâti tiennent compte de leur forme; intuitivement, certaines formes sont associées à certains types de bâtiment. La forme « géométrique » qui prédomine au regard de l'image ci-dessous (figure 80) est le rectangle ou le carré même si la taille des bâtiments diffère. Néanmoins, nous testerons quatre éléments structurants : l'hexagone, le cercle, le carré, le rectangle.

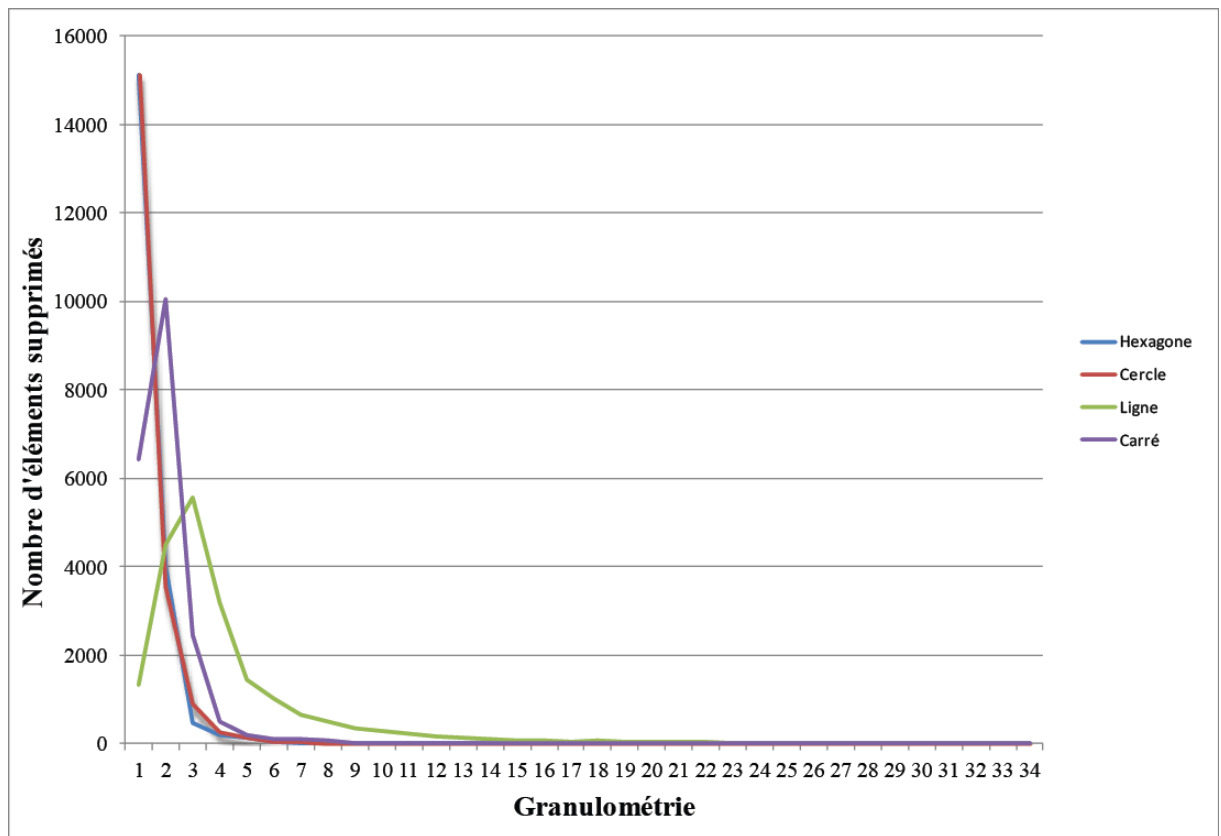


Figure 80 : Extraction de la couche bâtiments de la BD Topo 2007 (Sevenet, 2013).

Nous procédons tout d'abord à une analyse granulométrique exploratoire avec les quatre formes d'élément structurant, prises tour à tour. Les ouvertures de taille croissante sont effectuées jusqu'à la disparition totale de tous les éléments. Le nombre d'éléments restant à chaque itération est inscrit dans un fichier texte facilement importable dans un tableur type Excel©, à partir duquel il est possible de calculer le nombre de composantes qui disparaissent à chaque itération. Pour comparer, l'effet de chaque élément structurant sur les transformations d'image, la distribution des éléments qui disparaissent à chaque itération est représentée sur un graphique (graphique 4).

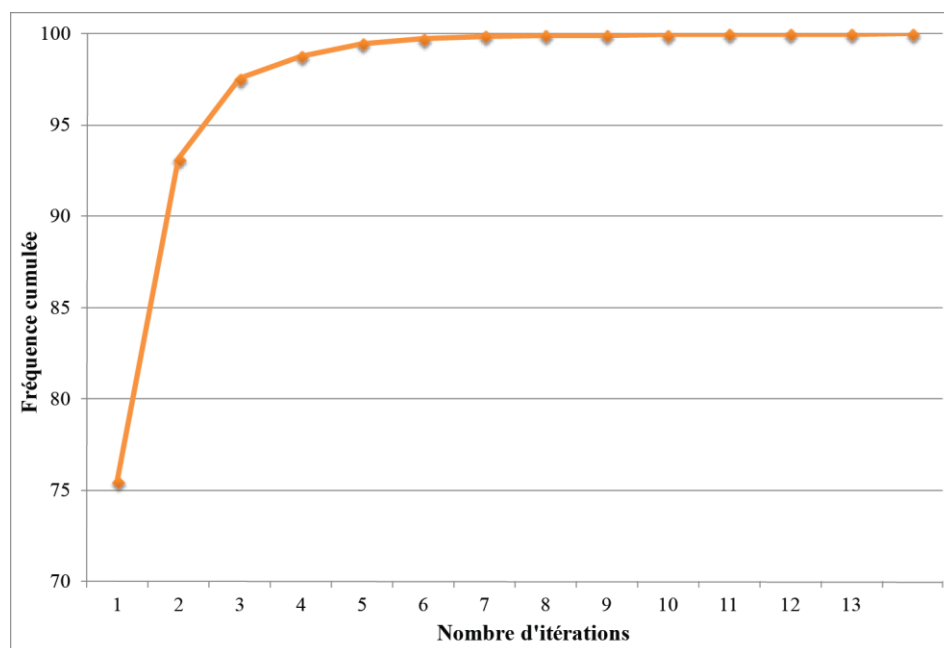
D'après celui-ci, l'élément structurant le plus adéquat est le cercle

- L'élément structurant ligne, et dans une moindre mesure, l'élément structurant carré ne font pas suffisamment ressortir des groupes de bâti ayant la même taille et la même forme, par exemple il faut plus de 300 itérations pour que les plus grands bâtiments disparaissent avec l'élément structurant ligne.
- Les éléments structurants cercle et hexagone donnent des résultats presque similaires, cependant, les résultats obtenus par l'élément structurant cercle sont un peu plus lissés et permettent de mieux observer les changements.



Graphique 4 : Résultats de l'analyse granulométrique selon quatre formes d'élément structurant (Sevenet, 2013).

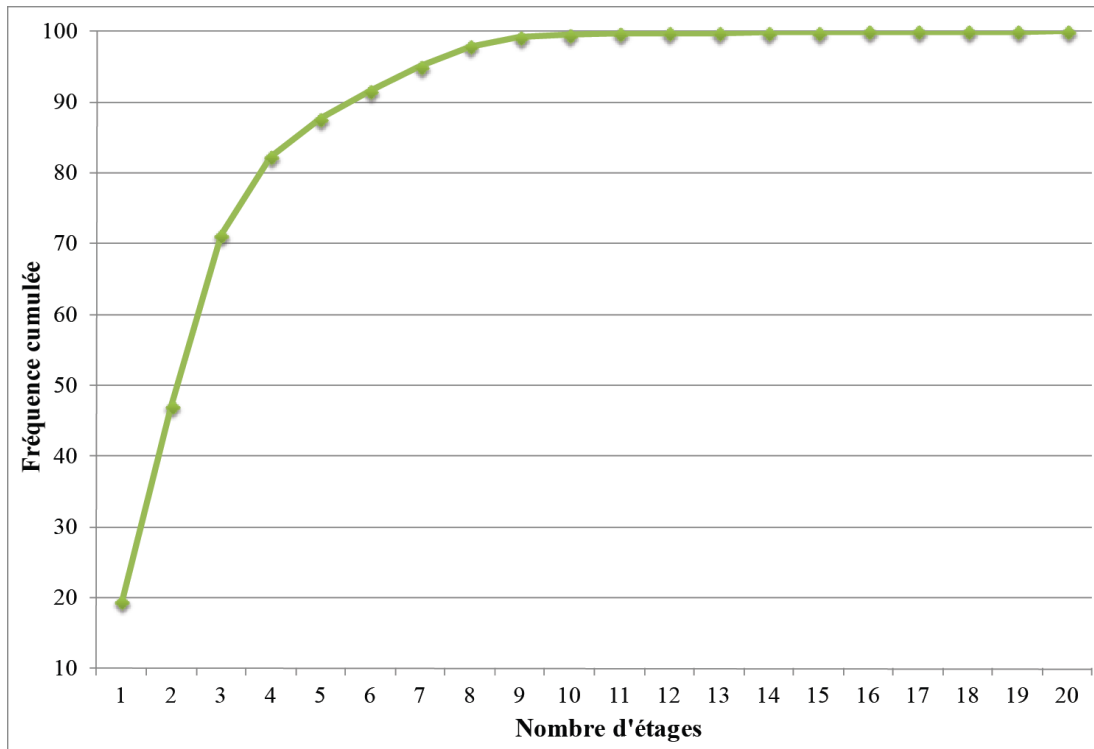
Les images issues des ouvertures granulométriques avec l'élément structurant **cercle** seront donc utilisées pour l'analyse suivante.



Graphique 5 : Fréquences cumulées des éléments supprimés à chaque itération (Sevenet, 2013).

Dans un deuxième temps, **les hauteurs de bâtiments** sont classées en fonction du nombre d'étages. La hauteur moyenne d'un étage est de 3 mètres, ainsi pour définir le nombre d'étages d'un bâtiment, il suffit de diviser la hauteur par 3 et d'arrondir à l'entier inférieur*.

Sauf les bâtiments dont le nombre d'étages est inférieur à 1, le nombre est arrondi à 1



Graphique 6 : Fréquences cumulées des bâtiments en fonction du nombre d'étages (Sevenet, 2013).

L'analyse de chacune des distributions permet de définir le nombre de classes (graphique 6). Les surfaces des bâtiments peuvent être discrétisées en 3 ou 4 classes de formes de bâtiments et le nombre d'étages en 3 ou 5. Pour ces deux classifications, les bornes des classes devront être testées sur d'autres espaces urbains pour les valider.

De la même manière que pour la méthode présentée précédemment, le choix de la discrétisation est validé par une analyse de variance spatiale. Cette analyse permet de d'évaluer l'effet produit par le découpage spatial de la discrétisation. Les résultats sont présentés dans le tableau 17 et le tableau 18.

L'analyse de variance indique pour les deux variables une meilleure prise en compte des regroupements par le découpage en 4 classes pour la surface et en 5 classes pour la hauteur (nombre d'étages), avec respectivement, 53,2% et 58,9% d'effet d'appartenance. Par conséquent, ces typologies serviront de base à la mise en place de la typologie globale des formes urbaines.

	Nombre de bâtiments Ni	Nombre de classes	Nj	Variance totale	Variance intragroupe	Variance intergroupe	v1	v2	F	F'	Effet d'appartenance
Classification 1	23858	3	564	1,6129E+10	8133234016	7996175222	563	23294	20,51	1	49,58%
Classification 2	23858	4	830	1,6129E+10	7547789403	8581619835	829	23023	14,78	1	53,20%

Tableau 17 : Variances en fonction des classes sur la forme et la surface du bâti (Sevenet, 2013).

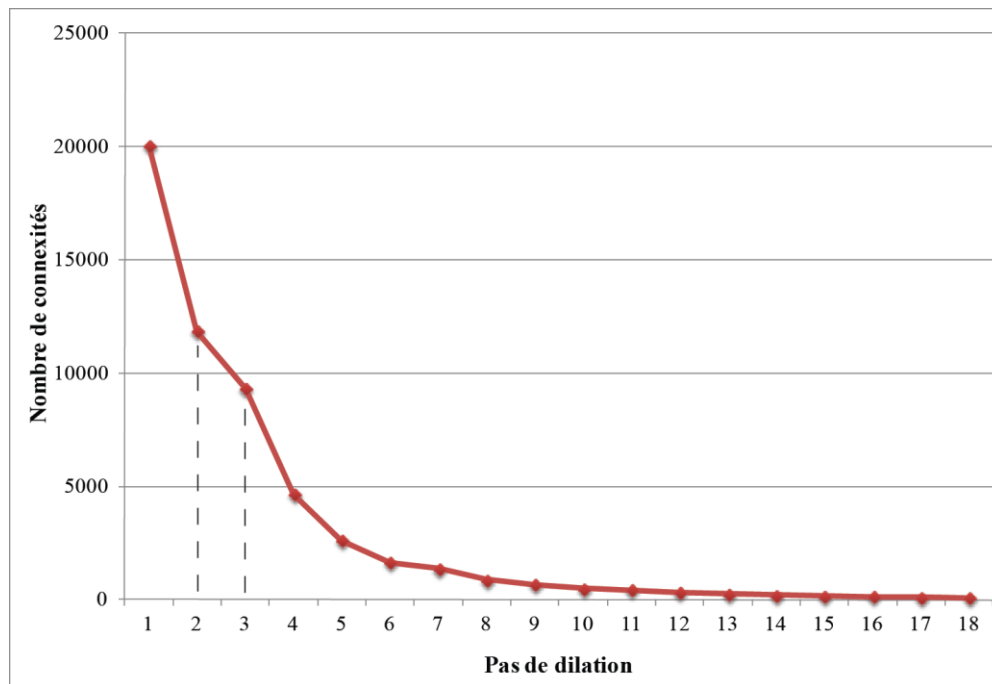
	Nombre de bâtiments Ni	Nombre de classes	Nj	Variance totale	Variance intragroupe	Variance intergroupe	v1	v2	F	F'	Effet d'appartenance
Classification 1	23858	3	1482	98482	42325	56156	1481	22376	8,62	1	57,02
Classification 2	23858	5	3171	98482	40509	57973	3170	20687	3,84	1	58,87

Tableau 18 : Variance en fonction des classes pour le nombre d'étages du bâti (Sevenet, 2013).

L'espace est pris en compte par une discrétisation s'appuyant sur une analyse de la connexité (Voiron, 1995, p.66) réalisée grâce à l'analyse d'image. Le traitement effectué est une suite de dilatations de taille croissante qui permet de mesurer la proximité des éléments entre eux. Au fur et à mesure des dilatations, les éléments les plus proches se rejoignent jusqu'à ne former plus qu'une seule composante. A chaque pas de dilatation, le nombre de connexités, c'est-à-dire le nombre d'éléments jointifs est calculé et reporté sur un graphique (graphique 7). Les paliers, les discontinuités ou les seuils observés constituent une information sur l'espace entre les éléments.

Le regroupement de tous les éléments s'effectue au pas de dilatation 172*, ceci indique un espace important de certains éléments. Sachant que la résolution est de 5 mètres, l'élément le plus isolé est éloigné de 360 mètres des autres. Néanmoins, le graphique 7 indique une rapide décroissance du nombre de connexités, ce qui signifie que de nombreux bâtiments sont proches les uns des autres. Cette courbe montre bien la décroissance de la densité urbaine. Pourtant des ruptures sont observables aux pas 1, 2 et 7 (graphique 7). Les images des pas de dilatation marquant des discontinuités sont présentées ci-après (figure 81).

Afin de faciliter la lecture du graphique, nous n'avons pas représenté l'ensemble des pas de dilatation. Car après le 30^{ème} pas, il reste moins d'une vingtaine d'éléments.



Graphique 7 : Analyse de la connexité des bâtiments de Nice (Sevenet, 2013).

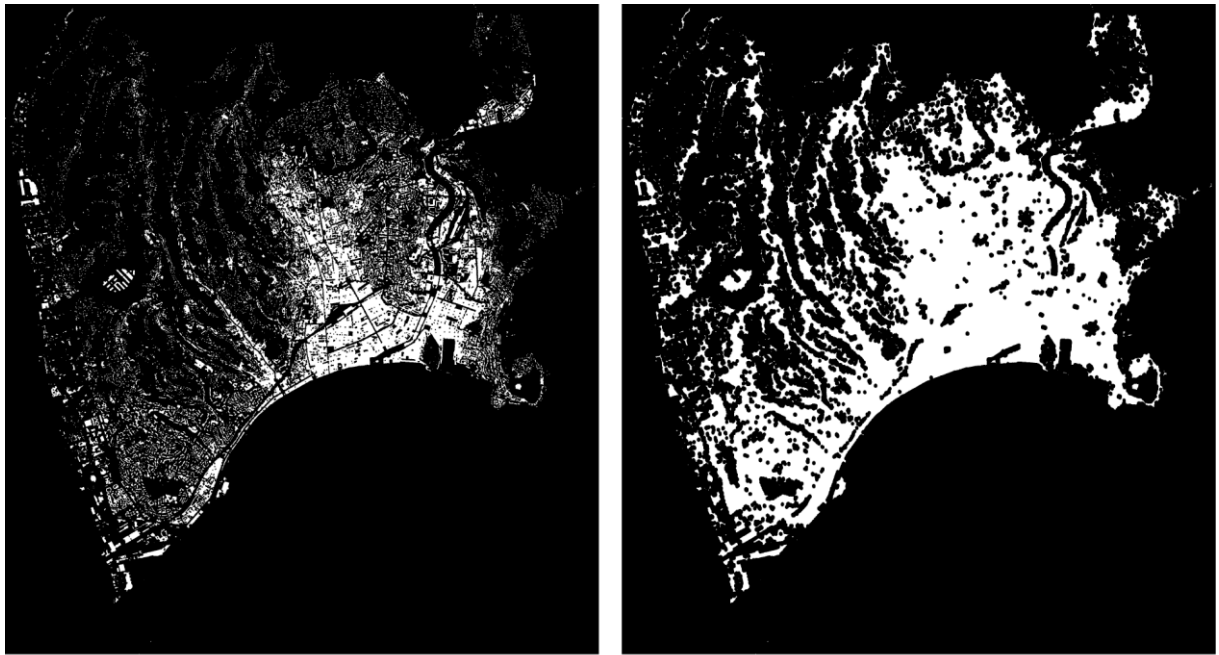


Image au pas 2

Image au pas 7

Figure 81 : Images résultats de l'analyse de connexité au pas de dilatation 2 et 7 (Sevenet, 2013).

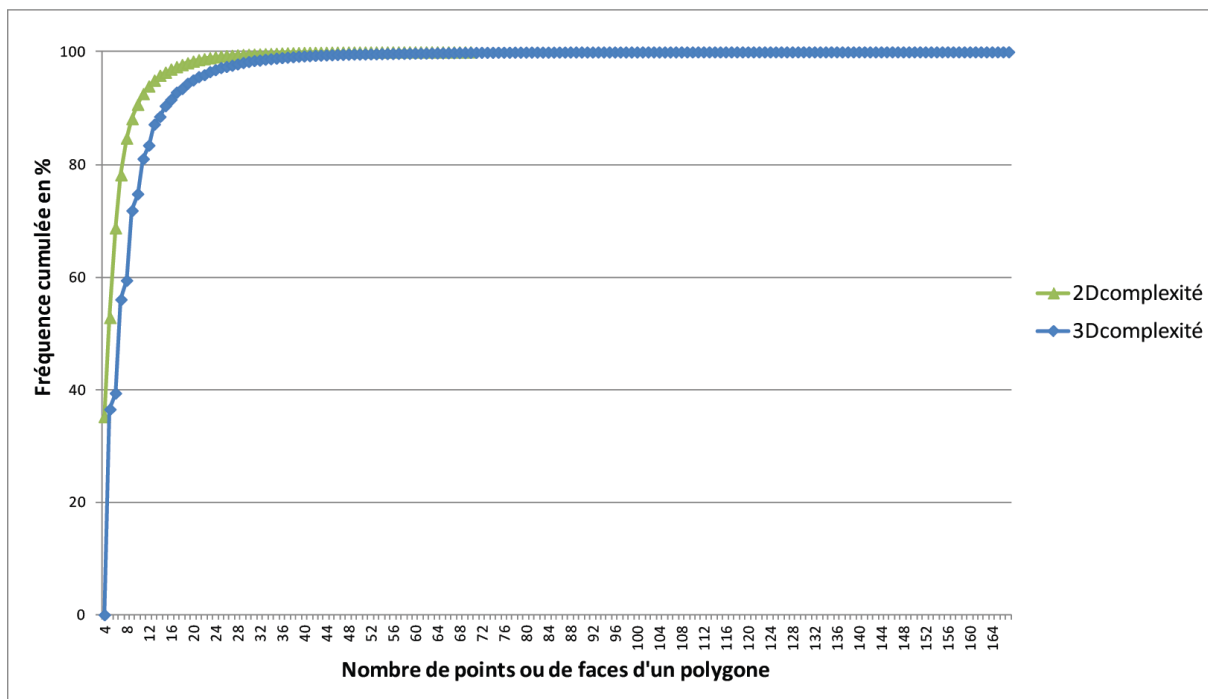
5.3. Typologie basée sur la complexité de la forme des objets.

Afin de distinguer les types de formes urbaines en tant qu'objets complexes, en deux et trois dimensions, une autre typologie est proposée. Il s'appuie sur le volume et sur les deux indicateurs conçus par C. Carneiro et *Alii* (2009) et présentés dans le chapitre 2, la complexité 2D et la complexité 3D

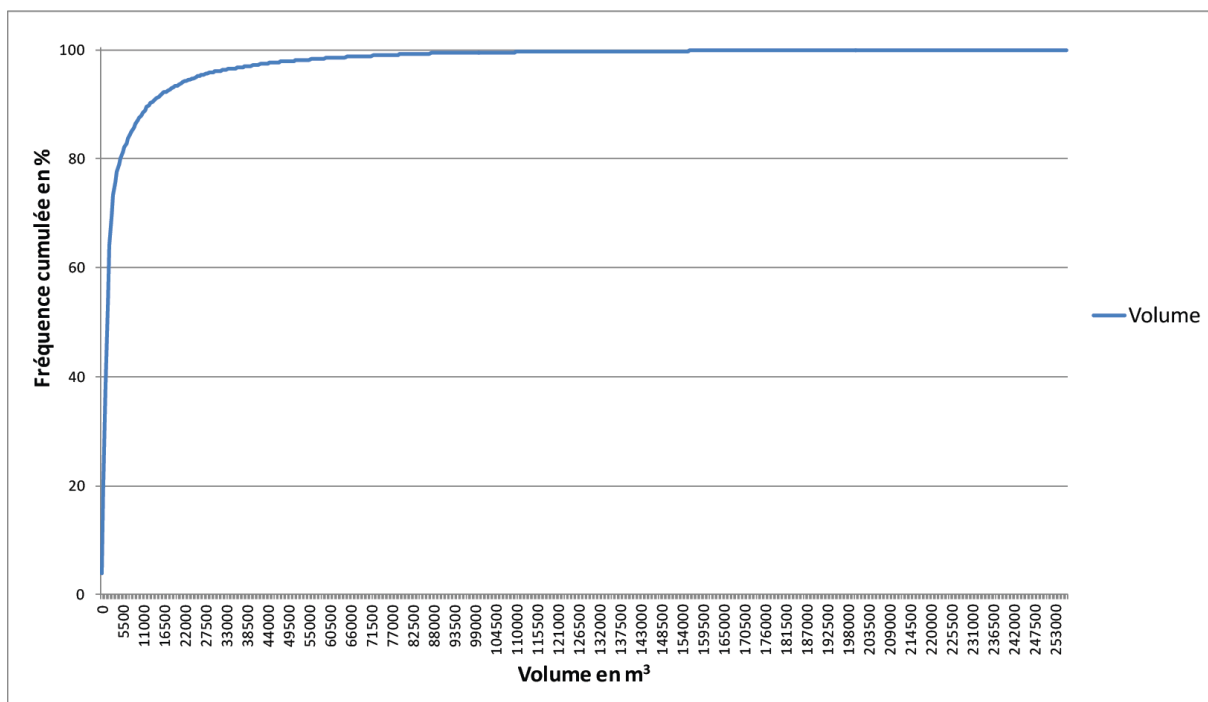
Ceux-ci sont calculés pour chaque bâtiment de la zone d'étude. Le graphique 8 et le graphique 9 permettent de classer les indicateurs de la manière suivante :

Classes	Bornes de classes		
	complexité2D Nombre	complexité3D Nombre	Volume m3
1	8	7	500
2	12	9	1500
3	16	11	3500
4	20	13	29500
5	136	168	1500000

Tableau 19 : Synthèse des bornes de classes pour chacun des indicateurs (Sevenet, 2012).



Graphique 8 : Fréquences cumulées des modalités des indicateurs complexité 2D et 3D (Sevenet, 2013).



Graphique 9 : Fréquences cumulées des modalités de la variable volume (Sevenet, 2013).

Selon la procédure exposée dans le paragraphe 5.1 de ce chapitre, chaque zone affectée à un bâtiment reçoit la valeur en niveau de gris de l'indicateur analysé.

5.4. Analyse des discontinuités des six variables.

Les discontinuités sont très marquées sur les trois premières variables (emprise au sol, hauteur et espacement). Des grands ensembles se dessinent dans l'espace pour chacune de ces trois variables (figure 82) tandis que les zones résultantes des images des trois autres variables sont beaucoup plus morcelées (figure 83).

Concernant l'emprise au sol, une grande zone homogène se dessine sur la périphérie qui se morcelle à l'approche de la zone centrale. Les emprises au sol y sont petites par rapport au reste de la ville. A l'inverse, le centre-ville présente davantage d'hétérogénéité même si les emprises au sol sont beaucoup plus importantes. De manière ponctuelle, les zones industrielles, les entrepôts, les grands ensembles et les zones commerciales se distinguent à l'Ouest du territoire et au Nord-Ouest.

A l'inverse, l'espacement entre les bâtiments semble homogène sur la plupart de la ville, entre 5 et 10 mètres. Néanmoins, les espaces périphériques et plus particulièrement les collines de l'Ouest sont marqués par un détachement des bâtiments plus importants parfois plus de 25 mètres.

La variable hauteur est répartie de manière moins homogène. Cependant, globalement, le centre-ville présente des hauteurs plus élevées. En comparaison, il faut noter que les zones de grandes emprises au sol à l'ouest de la ville présentent des hauteurs très faibles, en comparaison de même que les grands ensembles.

Pour les trois autres variables (complexité 2D, 3D et volume), une multitude de discontinuités est visible sur la figure 83 mais aucune discontinuité majeure n'émerge au sein de la ville de Nice. La figure 83 indique une des variables. Néanmoins, les valeurs du volume sont plus importantes dans la zone centrale que dans la périphérie.

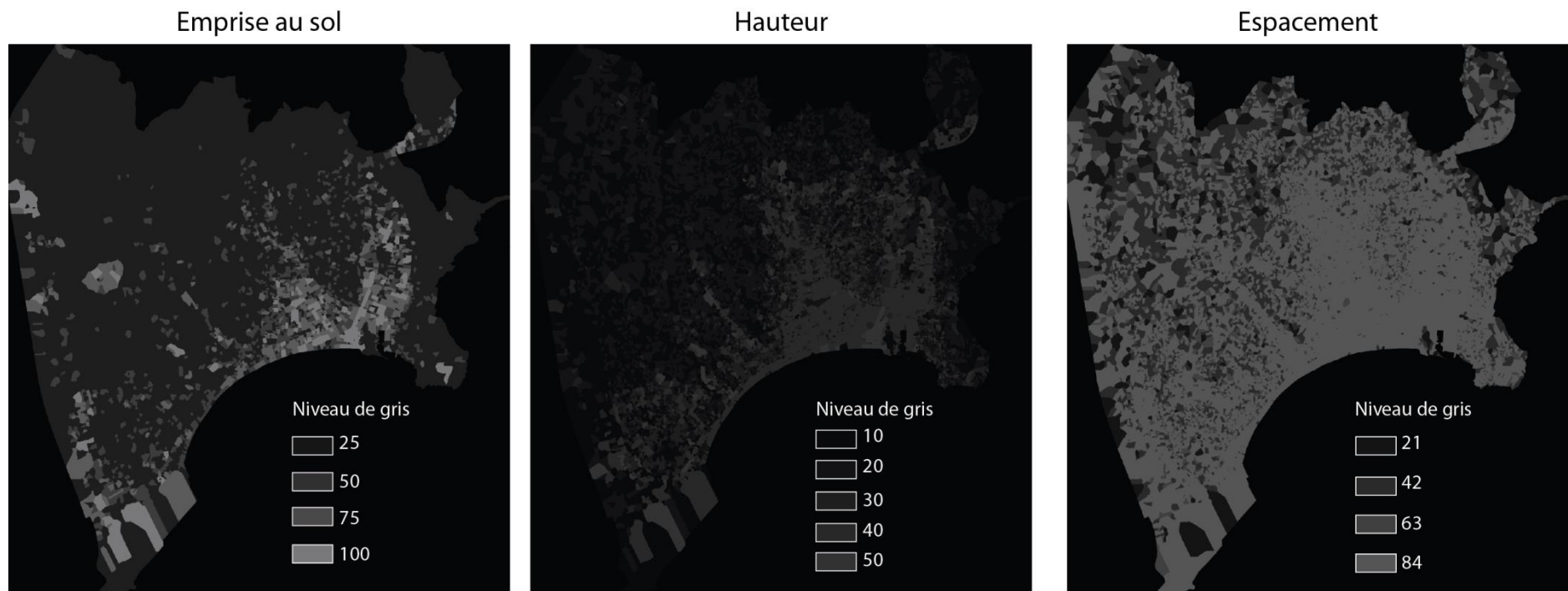


Figure 82 : Images résultats de la classification des variables emprise au sol, hauteur et espacement (Sevenet, 2013).

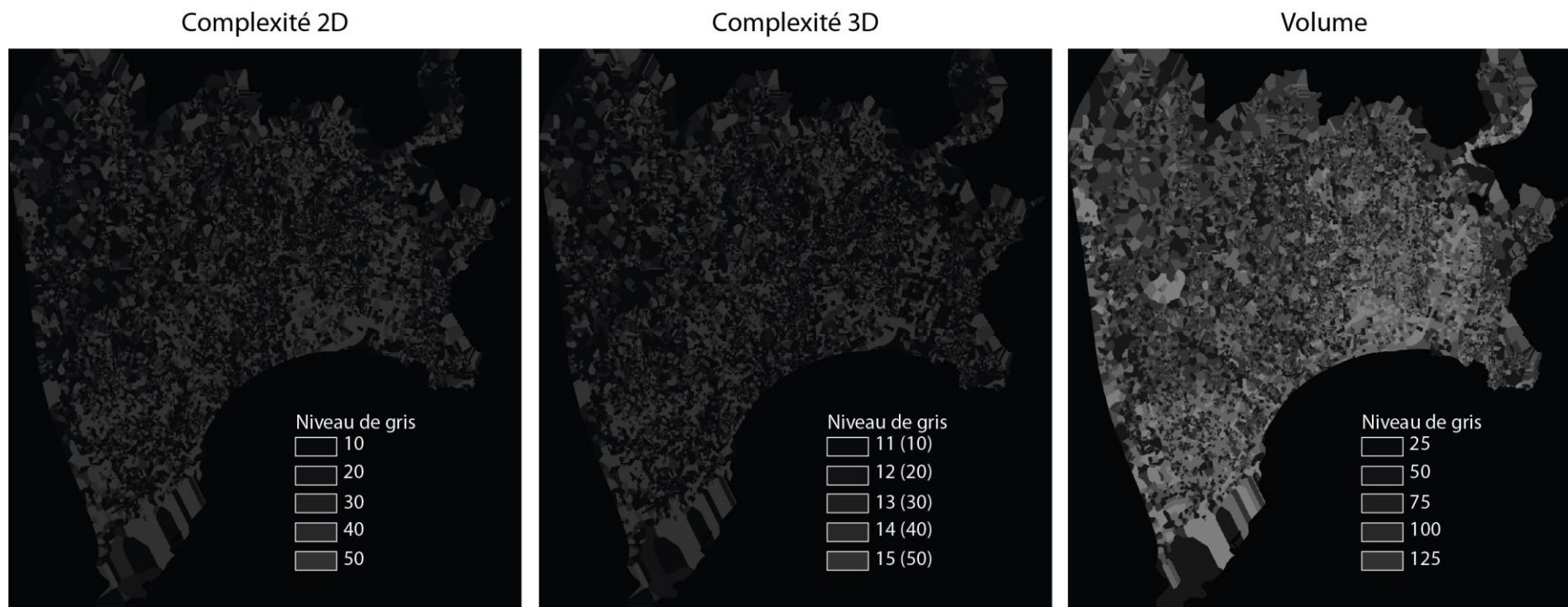


Figure 83 : Images résultats de la classification des variables complexité 2D, complexité 3D et volume (Sevenet, 2013).

5.5. Typologie

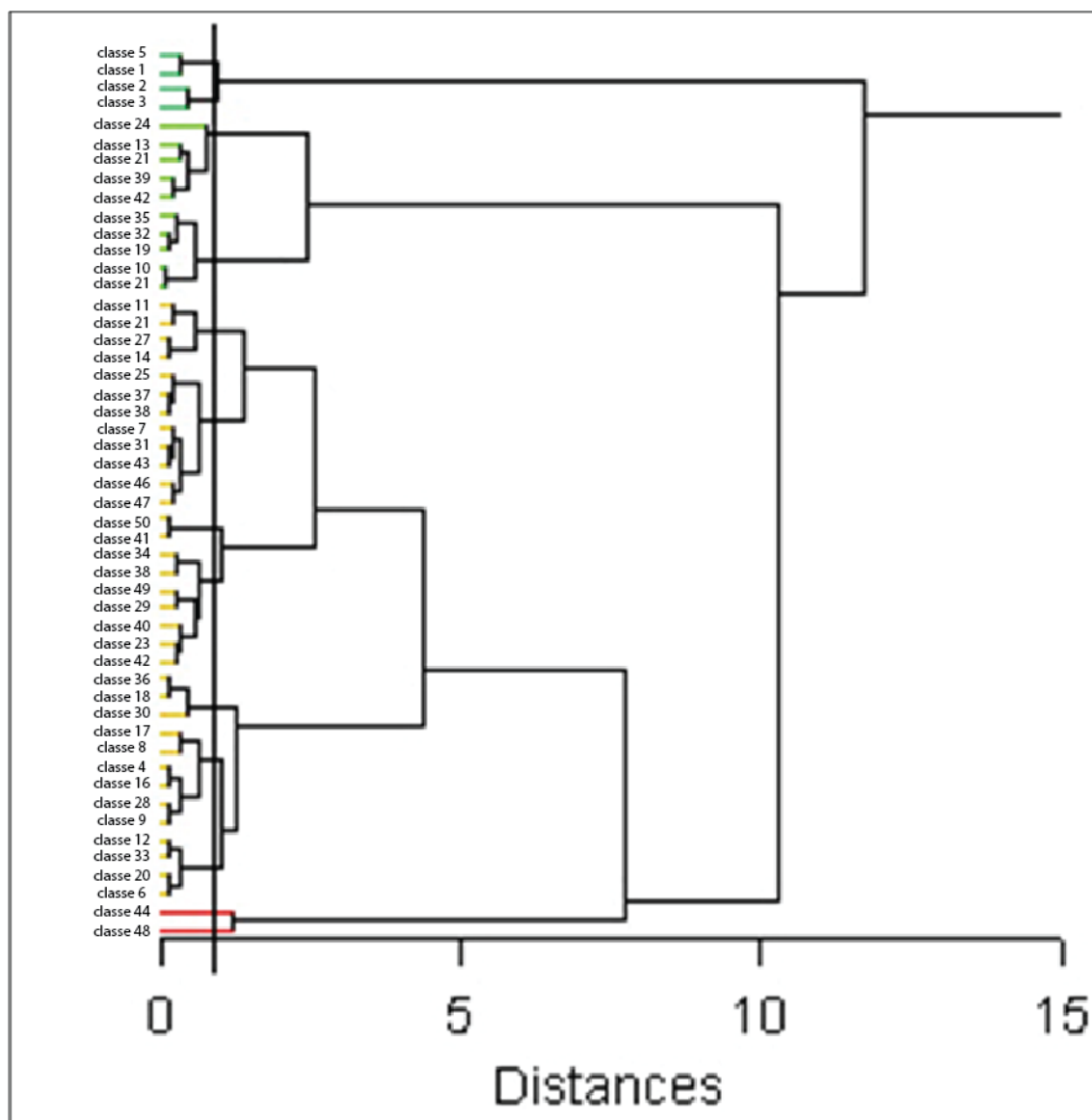
Nous souhaitons à présent, à partir des 6 critères retenus, réaliser une typologie générale. Le traitement par analyse d'image permet de cumuler les informations des variables. Nous souhaitons analyser les six variables ensemble. Une première option est le cumul des images deux à deux toutefois en raison du nombre d'addition d'images (5) et du nombre limité de niveau de gris (255, le niveau 0 étant exclu car attribué au hors-champs), les combinaisons de niveaux de gris ne sont pas infinies. Il faut les sélectionner de manière à éviter les doublons entre les combinaisons. De ce fait, elles sont additionnées trois par trois : les variables géométriques (hauteur, emprise au sol et espacement) puis les variables de forme (complexité 2D, 3D et volume). Le résultat est une image en niveau de gris où la valeur de chaque pixel correspond à la somme des variables (figure 82 et figure 83). Cette image est ensuite transférée sous SIG*.

Suite à cette opération de cumul des critères, 80 classes devaient être produites (par la multiplication des 4 classes pour la surface, 5 pour le nombre d'étages et 4 pour l'espacement). Néanmoins seule une cinquantaine de types morphologiques créés est représentée à Nice. De même pour la deuxième typologie (typologie n°2), des 125 classes théoriques, 63 sont présentes sur le territoire.

Ce résultat n'est pas complètement satisfaisant car même si chaque type indique des différenciations entre les morphologies des bâtiments, nous souhaitons faire émerger les grands ensembles afin d'avoir une vision synthétique.

Une classification est alors réalisée afin de regrouper les unités spatiales semblables dans la même modalité qui constitue un type (ou classe) d'unité spatiale. **La classification mène directement à la cartographie statistique.** Pour cette étude, elle permet de réduire le nombre de types morphologiques de bâtiments obtenus. Elle n'a pas été utilisée en amont car le nombre d'individus à classer était trop important, les résultats n'auraient pas été significatifs. Elle s'applique sur un tableau de n individus statistiques dont on connaît les valeurs sur p variables, dans notre cas : la superficie moyenne, le nombre d'étages moyen et l'espacement moyen. L'algorithme nécessite le choix d'un type de distance entre un individu et les autres. Ici c'est la distance moyenne qui a été choisie. Il procède ensuite en agrégeant les individus les plus proches, c'est-à-dire ceux dont la distance est minimale. Ils forment un premier groupe représenté par son centre, qui devient un individu fictif correspondant au point moyen du premier groupe. Puis l'algorithme calcule les distances aux autres points, la plus petite de toutes les distances permet de fabriquer un second groupe ou d'augmenter le premier d'une unité etc. Le résultat donne une arborescence hiérarchique de parties de cet ensemble (graphique 8 et ANNEXE E) qui permet de visualiser les regroupements des individus.

Une image raster produite par un SIG est constituée de plusieurs fichiers notamment un pour l'extension de l'image, un pour les coordonnées géographiques et un pour l'image seule. Cette image peut être copiée dans un autre dossier et traitée par Micromorph puis copiée par-dessus l'ancien fichier à condition que de la taille de l'image n'ait pas changé.



Graphique 10 : Arbre de classification de la 1^{ère} typologie (Sevenet, 2013).

Pour chacun des regroupements, l'analyse de variance à plusieurs facteurs permet de tester la pertinence des regroupements.

Les résultats mesurés sur l'effet d'appartenance à une typologie sont présentés dans le tableau 20. D'après celui-ci, le regroupement des bâtiments (selon leur hauteur, surface et espacement) en 13 classes semble le plus pertinent car 96 % des caractéristiques des types s'expliquent par l'appartenance à leur classe dans le cas de la 1^{ère} typologie et de 90% dans le cas de la 2^{ème} typologie.

Typologie n°1	Nombre de classes	Effet d'appartenance (%)
1	4	81
2	5	86
3	7	91
4	8	92
5	10	94
6	13	96

Tableau 20 : Effet d'appartenance à la 1^{ère} typologie en fonction de la CAH (Sevenet, 2013).

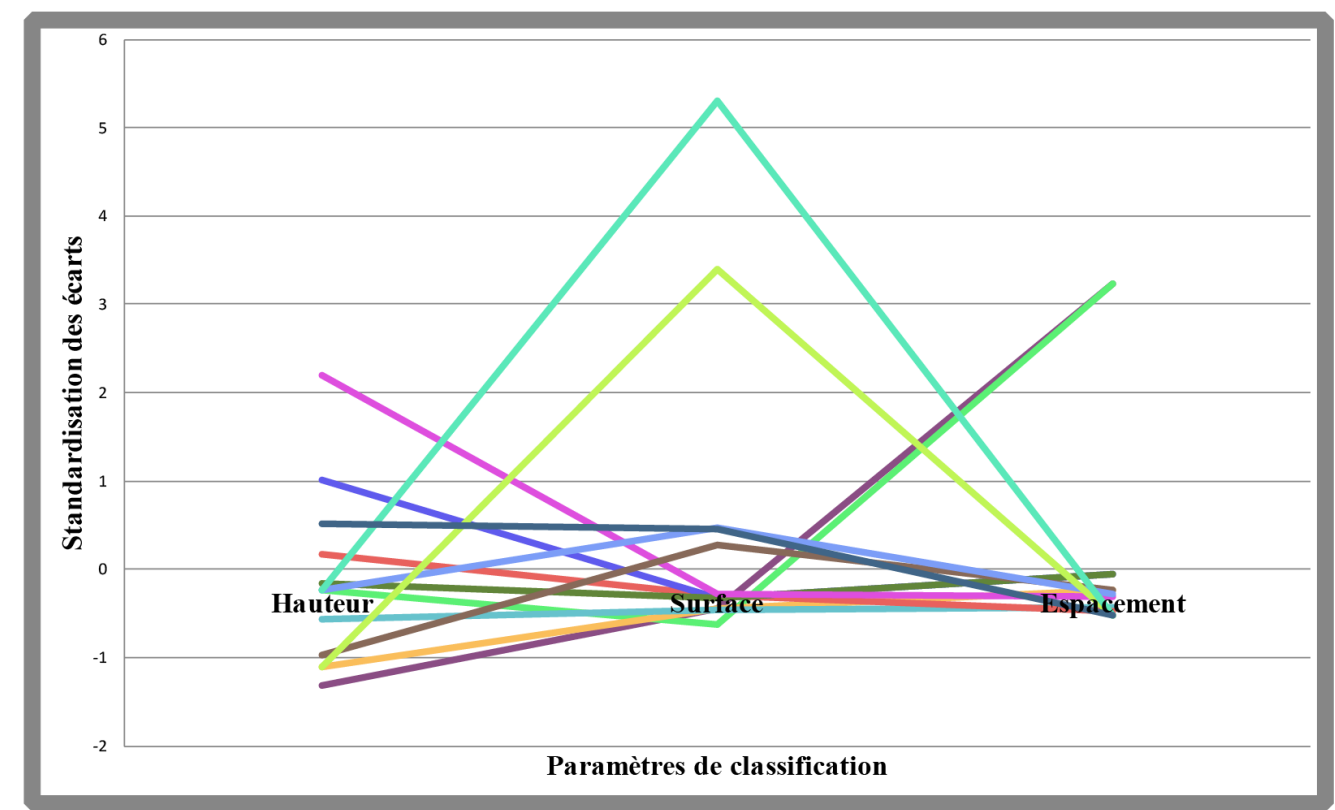
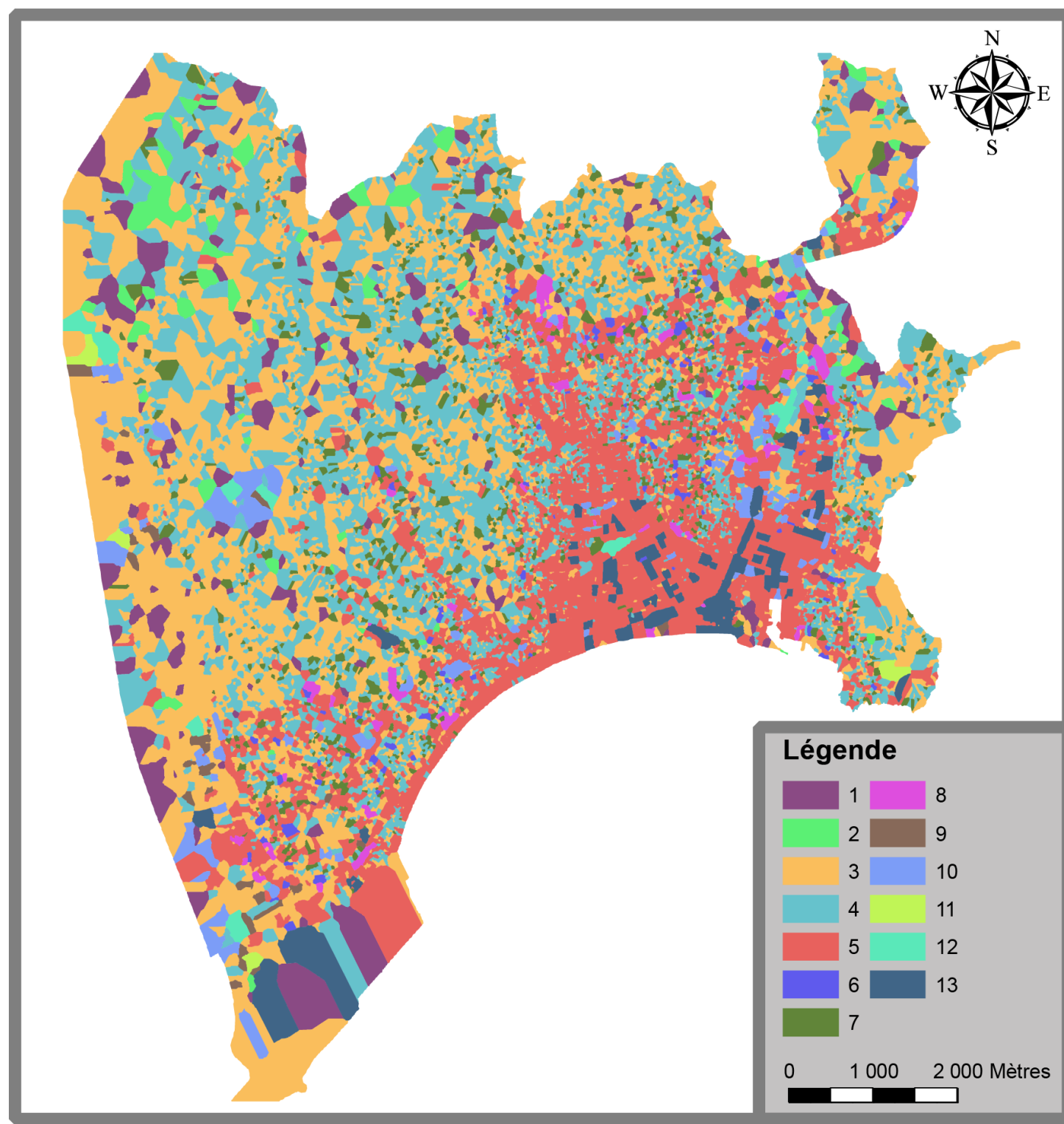
Typologie n°2	Nombre de classes	Effet d'appartenance (%)
A	4	91
B	9	80
C	13	89

Tableau 21 : Effet d'appartenance à la 2^{ème} typologie en fonction de la CAH (Sevenet, 2013).

En théorie, trois cas de figures sont envisagés (Charre, 1995) pour la traduction spatiale de la CAH:

- Les unités spatiales appartenant à un même groupe (classe) sont contigües et forment ainsi un sous-espace cohérent
- Les diverses catégories forment des arrangements spatiaux qui impliquent contigüités et hiérarchie (par exemple des auréoles autour des espaces urbains jusqu'aux espaces ruraux, de la même manière que le modèle de Burgess présenté dans le chapitre 2, figure 43
- L'organisation spatiale des unités semble aléatoire mais peut répondre à une logique *a priori* a-spatiale (de la même manière que la représentation urbaine de Hoyt et Ullman, dans le chapitre 4, figure 43).

Les chiffres entre parenthèse correspondent à une caractéristique mineure mais non négligeable



	Surface (m ²)	Nombre d'étages	Espacement (m)
Classe1	< 100	0 - 3	20 - 100
Classe2	100 - 250 (et <100)	3 - 4	20 - 100
Classe3	< 250	2 - 3	< 5 (et 5 - 20)
Classe4	100 - 250	3 - 4	< 5 (et 5 - 20)
Classe5	Hétérogène	Hétérogène	< 5
Classe6	Entre 250 et 750	> 6	5 - 20
Classe7	Entre 0 et 500	3 - 6	7,5 - 20
Classe8	0 - 750	> 10	< 5 (et 5 - 20)
Classe9	> 750	< 3	< 5 (et 5 - 20)
Classe10	Hétérogène (> 3000)	Hétérogène	< 5
Classe11	> 3000 (< 500)	< 3	< 5
Classe12	> 3000	2 - 5	< 5
Classe13	Hétérogène (> 3000)	> 6	< 5

Figure 84 : Typo-morphologie du bâti niçois selon leur hauteur, emprise au sol et espacement* (Sevenet, 2013).

Les types 1 et 2 correspondent à du bâti diffus car il représente une forme définie par une petite empreinte au sol et un espacement important avec les autres bâtiments.

Le type 2 correspond à du bâti collectif, il est donc moins présent dans le bâti diffus caractérisé majoritairement par de la maison individuelle. De plus, quelques bâtiments sont plus proches et constituent des hameaux de périphérie.

Les types 3 et 4 caractérisent des bâtis de la 1ère couronne urbaine. Leur forme urbaine possède une surface au sol plus importante que celle du type 1 et de 2 Cette catégorie correspond à la deuxième vague d'urbanisation qui a colonisé la périphérie et remplacé les maisons individuelles. Le type 5 est un type très hétérogène tant en hauteur qu'en surface, il correspond au bâti urbain dense dont l'espacement entre les bâtiments est inférieur à 5 mètres.

Les types suivants correspondent à des formes urbaines plus spécifiques que les types énoncés ci-dessus. Les types 6 et 8 équivalent aux bâtiments type « grands ensembles », c'est-à-dire des formes urbaines définies par une grande surface au sol, des hauteurs très importantes et un espacement proche de 20 mètres entre les bâtiments.

Le type 7 est une forme urbaine particulière et disséminée dans l'espace. Ce sont des bâtiments collectifs de superficies importantes et espacés qui sont en rupture avec les formes urbaines environnantes.

Les types 9 et 11 correspondent à un bâti de type « entrepôts » avec des superficies importantes, un seul étage et concentré spatialement.

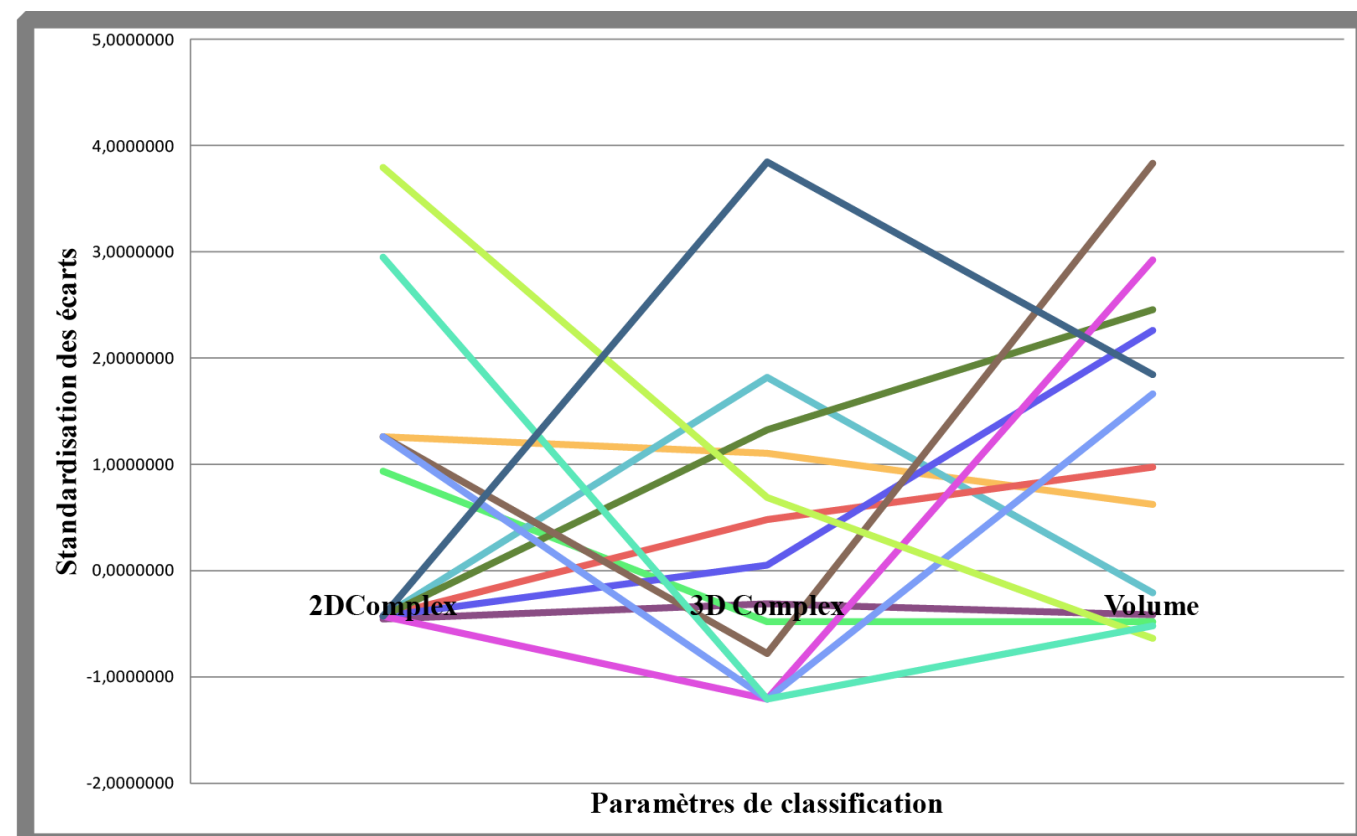
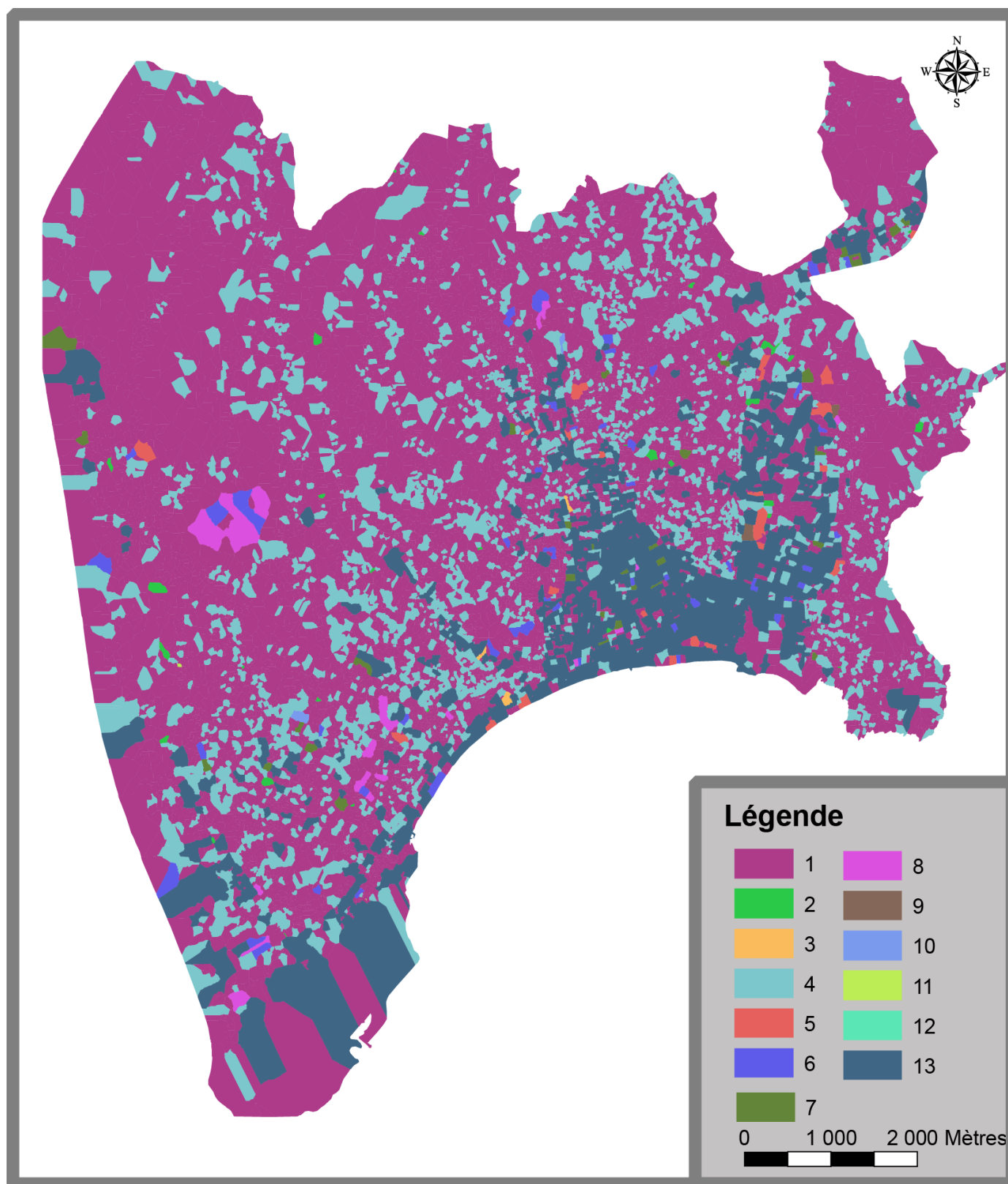
Les types 10 et 13 sont caractérisés par des superficies hétérogènes mais qui dépassent souvent les 1000 m². De même, ces bâtiments peuvent s'élever très haut. La forme urbaine est également très compacte. Ces types concordent avec des bâtiments industriels et commerciaux.

Le type 12 est peu représenté, seuls six bâtiments sont présents dans cette catégorie. La précision de l'image a faussé le résultat puisque ces bâtiments sont agrégés dans l'image. Ces bâtiments de très grandes surfaces et de hauteur moyenne coïncident avec de grandes infrastructures de la ville.

Cette typologie permet de préciser le découpage spatial des formes urbaines contrairement aux limites statistiques et administratives. De même, il reflète mieux l'hétérogénéité du bâti par rapport aux bases de données d'occupation du sol tout en permettant de retrouver la même catégorisation. Toutefois, les classes des « très grands bâtiments » sont sur segmentées. Cela s'explique par la diversité de forme de ces bâtiments qui correspond à l'hypothèse de départ d'une forte singularité de ces formes. Les défauts de segmentation (absence de centre-ville historique et d'un découpage clair des bâtiments du XIXème siècle) s'explique par le choix de la résolution* qui a entraîné une agrégation de certains bâtiments.

Les deux typologies ont été testées sur chacun des groupes d'indicateurs proposés dans ce travail. Les résultats montrent qu'aucune des deux typologies ne caractérise correctement l'autre groupe d'indicateurs.

Nous avons choisi
la plus petite
résolution possible
par le logiciel.



	2D complexité	3D complexité	Volume
Classel	Hétérogène	Hétérogène	0 - 295000
Classe2	Hétérogène (> 12)	Hétérogène (> 9)	0 - 3500
Classe3	12 - 20	9 - 13	> 295000
Classe4	> 20	> 13	Hétérogène
Classe5	> 16	> 11	> 295000
Classe6	8 - 16	7 - 11	> 295000
Classe7	16 - 20	11 - 13	> 295000
Classe8	<8	<7	> 295000
Classe9	12 - 16	< 7	> 295000
Classe10	8 - 12	< 7	> 295000
Classe11	> 16	1500 - 3500	< 500
Classe12	16 - 20	7 - 9	1500 - 3500
Classe13	>20	> 13	> 295000

Figure 85 : Typo-morphologie du bâti niçois selon leur complexité 2D et 3D, ainsi que leur volume (Sevenet, 2013).

Le graphique indique que les indicateurs caractéristiques des types sont très différenciés entre eux. Pourtant, la classification intervient principalement dans la distinction de la complexité de la forme des bâtiments. En effet, les indicateurs de chaque type sont différents ; par contre seuls les grands volumes se distinguent aisément. De plus, il est à noter que le type 1 regroupe des profils d'indicateurs très hétérogènes dus au nombre de bâtiments qu'il recouvre.

Spatialement, trois types ressortent plus particulièrement :

Deux types (1 et 4) sont localisés principalement sur les collines et la périphérie de la ville. Pour ces types, il n'existe aucun profil homogène des indicateurs, le volume de ces bâtiments est différent et leur forme est simple ou complexe.

A l'inverse, le type 13 regroupe des bâtiments homogènes entre eux, ceux-ci possèdent un grand volume et une forme complexe. Ce type se localise essentiellement dans le centre de la ville composé de bâtiments denses et dans les zones de grand-ensembles.

La comparaison entre les deux typologies (figure 86) indique que toutes deux possèdent des avantages et des inconvénients. La 1ère souligne davantage la périphérie tandis que la deuxième cercle les zones denses de la ville.

De plus, la 1ère montre une marqueterie des formes urbaines présentes sur le territoire, les zones créées par l'analyse de la deuxième sont plus homogènes et représentent moins les tissus (cf. l'analyse de variance).

Le lissage résultant de la 2^{ème} typologie s'explique par le regroupement spatial obtenu après la CAH. En effet, cette dernière permet spatialement d'agréger plus de zones pour la 2^{ème} typologie que pour la 1^{ère}.

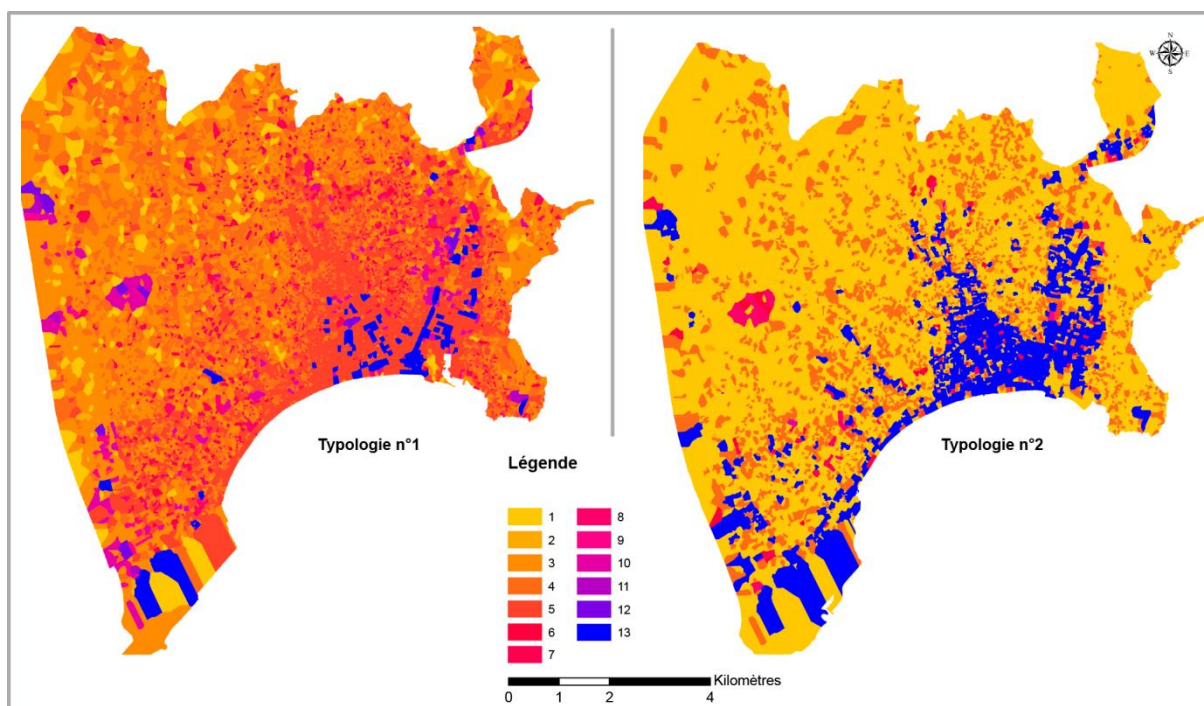


Figure 86 : Comparaison des typologies proposées ci-dessus (Sevenet, 2013).

Conclusion de chapitre

La première partie de ce chapitre visait à analyser l'évolution urbaine de Nice dans ses trois dimensions entre 1999 et 2007. A la vue des résultats, la ville tend à se densifier. En effet, l'essentiel des transformations est constitué d'opérations de renouvellement urbain.

L'analyse du voisinage a permis de montrer que ces transformations de bâtiments sont regroupées spatialement. En effet, la distribution des transformations du bâti tend à être agrégée puisque l'indice est inférieur à 1 avec un intervalle de confiance d'au moins 99%. De ce fait, alors que les nouveaux bâtiments se répartissent sur deux zones géographiques : la plaine littorale, plus particulièrement dans la plaine du Var à l'ouest de la ville, et les collines, soit, principalement en périphérie de la ville, là où subsistent des réserves foncières (figure 58). Par ailleurs, la périphérie de Nice est une zone collinaire, les résultats de l'analyse nous montrent que la vue sur mer peut jouer également un rôle dans l'explication de la localisation des dynamiques spatiales puisque près de 30% des nouvelles constructions se situent à 175 et 250 mètres d'altitudes.

L'objectif de ce chapitre était de caractériser la morphologie actuelle de la ville par ses trois dimensions. Plusieurs méthodes ont été proposées mais l'identification des types de formes urbaines s'appuie sur :

- d'une part la morphologie des bâtiments (l'emprise au sol et la hauteur) et l'agencement de ces bâtiments entre eux (l'espacement et leur régularité) et
- d'autre part sur des indicateurs caractérisant les trois dimensions du bâti (complexités 2D et 3D et le volume approché).

La corrélation recherchée entre la hauteur et la surface n'est pas significative, la superficie n'explique pratiquement pas la hauteur d'une même type bâtiment. Par contre, l'analyse des ressemblances met en évidence des similitudes dans les formes urbaines au sein du territoire. Seule la 1^{ère} couronne périurbaine montre une hétérogénéité des formes (figure 78).

Ces éléments permettent de montrer la présence d'homogénéité des bâtiments proches, donc de tissus urbains. Par conséquent, plusieurs méthodes de détection des tissus urbains ont été appliquées à partir des variables morphologiques présentées ci-dessus : détection des discontinuités par hiérarchie des gradients et par ouverture, connexité et discrétisation. La deuxième méthode a été retenue et elle permet de distinguer 13 types de bâtiments (figure 84 et figure 85). Les résultats indiquent que l'utilisation des variables morphologiques (surface, hauteur et espacement) est plus pertinente pour détecter les tissus, elles correspondent aux typologies définies dans la littérature présentées dans le paragraphe 2 de ce chapitre (figure 87). Néanmoins, cette typologie est encore très détaillée pour être opérationnalisée et s'en tenir uniquement aux paramètres morphologiques n'est pas suffisant.

L'aspect fonctionnel doit être pris en compte, tout du moins la distinction entre le résidentiel, l'industriel et le commercial. Cependant, le cloisonnement des bases de données rend difficile une analyse robuste de ces composantes présentées ci-dessus. La distinction entre la nature

des bâtiments dans la BD TOPO® n'est pas assez précise, les variables associées aux contours IRIS® de l'INSEE sont tributaires de ce découpage. Les aspects fonctionnels des formes urbaines seront introduits dans le chapitre suivant.

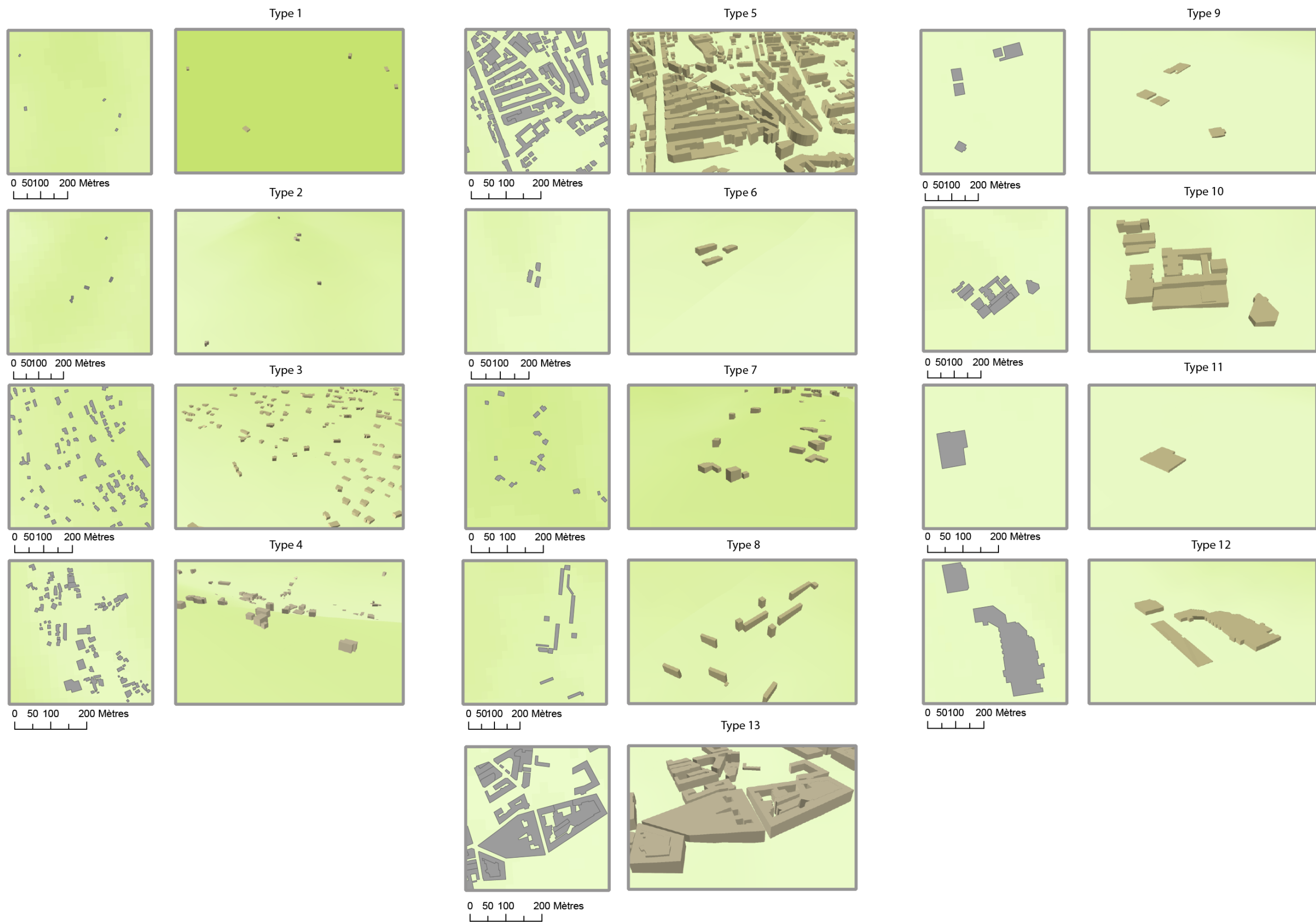


Figure 87 : Exemples de tissu de chaque type défini par la méthode (Sevenet, 2013)

Chapitre 6. Analyse de l'interaction entre la morphologie urbaine et les facteurs de durabilité

« La forme d'une ville change plus vite, hélas, que le cœur des mortels. »

Charles Baudelaire

La typo-morphologie créée dans le chapitre précédent s'appuie uniquement sur des paramètres morphologiques, ce qui la rend ainsi indépendante de la fonction du bâti et autorise diverses analyses. Dans ce chapitre, cette typologie sert de base à la mise en place d'une méthode d'analyse des dynamiques urbaines de la Ville de Nice, sous l'angle du développement durable et de la qualité de vie.

Le quartier est, aujourd'hui, l'échelle d'intervention urbaine principale, notamment avec l'émergence des éco-quartiers et des quartiers durables *etc.* (cf. chapitre 3). Le quartier n'est pas une unité statistique et les données disponibles sont inégales d'un territoire à un autre, néanmoins il existe des unités statistiques plus petites qui permettent de rendre compte de phénomènes et d'analyser la durabilité des espaces urbains (IRIS – Ilot Regroupé pour l'Information Statistique, cf. ANNEXE D).

D'un point de vue opérationnel, les documents d'aménagement et d'urbanisme s'appuient sur d'autres découpages. Le Plan Local d'Urbanisme produit un découpage fonctionnel pour appliquer les règles générales et les servitudes d'utilisation : zones urbaines, à urbaniser, agricoles et naturelles*. En outre, dans le cadre d'un programme local d'habitat (PLH), il convient de favoriser la densification du foncier d'habitation pour respecter le nombre de constructions de logements fixé par an. Afin d'être acceptée par la population, cette densification doit s'insérer au mieux dans le tissu bâti existant et être proposée dans de nouvelles zones à urbaniser. Dans ce contexte, identifier les différentes formes urbaines permet de découper l'espace urbain en sous-ensembles cohérents pour le renouvellement urbain.

L'ensemble de l'analyse a été réalisé dans un environnement **SIG**. En effet, le SIG répond à tous les objectifs : il permet de réaliser un « atlas » du territoire d'étude et d'opérer sur le système urbain un diagnostic territorial et ce, à plusieurs échelles (cf. chapitre 4).

Le présent chapitre détaille, dans un premier temps, les différents indices. Puis, l'analyse de la durabilité du territoire niçois et des espaces en transitions est effectuée à partir d'eux. Enfin, certaines recommandations en matière de planification urbaine sont proposées.

1. Les indicateurs de développement durable urbain : Evaluer la durabilité des territoires.

Dans le chapitre 3 paragraphe 2.2.4, nous avons évoqué la nécessité d'optimiser les satisfactions sociétales au sein des espaces urbains. La forme urbaine étant la matérialité de la ville (cf. chapitre 2), il est donc impératif d'évaluer les formes urbaines et leur durabilité. Il convient de déterminer tout d'abord les indicateurs pertinents intégrant directement ou indirectement la forme urbaine.

1.1. *Qu'est-ce qu'un indicateur de développement durable ?*

L'indicateur est un construit scientifique. Ainsi, sa puissance est dépendante du cadre défini préalablement, de la pertinence des caractères sélectionnés, du système normé dans lequel il s'inscrit. La notion d'indicateur est étroitement liée à celle d'information géographique. En effet, l'indicateur permet de relier l'objet décrit, l'information qu'il contient et analyse.

L'efficacité d'un indicateur, entendu comme un instrument d'information, dépend principalement de quatre attributs nécessaires dans tout processus de communication (Maby et *Alii*, 2003) :

- En tant qu'information, l'indicateur résout de l'incertitude : il présente donc des attributs sémantiques.
- S'il est géographique, l'indicateur rapporte son information sur un objet terrestre : il présente donc des attributs spatiaux.
- En tant que signe, il se manifeste sous un système de codage : il présente donc des attributs formels.
- En tant que message, il effectue une transmission de l'émetteur, vers le récepteur : il présente des attributs vectoriels.

Le plus souvent l'indicateur est considéré, en géographie comme une sous-catégorie d'information qui se distingue par son caractère opératoire dans l'argumentation. Cependant, d'après les éléments cités ci-dessus, l'utilisation d'indicateurs est indispensable pour l'évaluation du développement durable puisqu'il participe au processus de communication.

Dans le cadre du développement durable, les indicateurs ont pour vocation de :

- **sensibiliser les acteurs** du territoire sur la durabilité de leur territoire,
- proposer une **grille d'analyse** pour l'**optimisation** d'un territoire et/ou de son projet au regard de plusieurs critères.

La construction des indicateurs doit correspondre à plusieurs objectifs : l'échelle d'application, la disponibilité des données, le nombre de dimensions du développement durable traité et le niveau de compréhension ou d'accessibilité. Les indicateurs présentés ci-dessous sont étudiés en fonction de ces critères.

1.2. Indicateurs de durabilité: Pour qui? Pour quoi? Comment? Où?

Depuis 1992, les indicateurs de durabilité se déclinent sur les trois dimensions du développement durable (le social, l'économique et l'environnemental). L'analyse quantitative de la durabilité des territoires doit s'appuyer sur des données concrètes. Par conséquent, ces dimensions ont été déclinées en indicateurs objectifs.

La plupart des indicateurs de durabilités ont été créés pour l'évaluation d'un territoire national voir supra-national. La Stratégie Nationale du Développement de la France créée en 2003 a publié son premier rapport sur des indicateurs du développement durable (SNDP 2003). Le tableau 22 décrit l'ensemble des indicateurs regroupés en fonction de leur dimension. Cependant, depuis 2009 et dans le cadre de la révision de la Stratégie Nationale pour un Développement Durable, le Service de l'Observation et de la Statistique a proposé une évolution de ces indicateurs qui s'appuie maintenant sur 9 thèmes, appelé Défis.

En parallèle, chaque collectivité territoriale développe ou adapte sa propre grille d'évaluation de la durabilité. La démarche HQE^{2R}* croise les objectifs du développement durable avec des principes et les moyens d'actions en vue de transformer durablement un quartier. Les objectifs et les indicateurs associés constituent le système ISDIS. Il existe 5 objectifs, déclinés en 21 cibles de développement durable et une soixantaine d'indicateurs (Charlot-Valdieu et Outrequin, 2003, 2006). La liste des indicateurs proposés est très complète pour l'évaluation d'un projet urbain.

Cette approche, qui a l'avantage de proposer une méthode applicable sur tous les territoires locaux, présente le désavantage d'être coûteuse en temps et en moyens, tant sur la collecte de l'ensemble des données et que sur leur analyse. En effet, les données utilisées sont souvent créées ou issues de bases de données produites à une échelle supérieure.

Pilier économique	Pilier environnemental	Pilier socio-sanitaires
1. Indicateurs synthétiques	VI. Changement Climatique	X. Cohésion sociales
1. PIB	1. Emissions de GES et PIB	1. Revenus
1a. PIB par habitant	(éclairage sur la consommation d'énergie)	1a. Dispersions des revenus
1b. Taux de croissance du PIB réel	2. Production d'énergie à partir de sources renouvelables	1b. Taux de pauvreté monétaires
2. Indicateur de fécondité		2. Surpeuplement des logements
	II. Ressources environnementales	3. Chômage
II. Amélioration de la croissance potentielle	3. Exploitation des ressources halieutiques	3a. Taux de chômage de longue durée
3. Taux d'investissement des entreprises	4. Prélèvements d'eau par secteurs	3b. Dispersion des taux de chômage régionaux
4. Taux d'emploi	5. Artificialisation	4. Taux de ménages sans emploi
(actifs occupés/population totale)	(éclairage sur l'étalement urbain)	5. Part d'enfants dans les ménages à faible niveau de vie
	6. Granulats alluvionnaires	6. Part des jeunes ayant quittés prématurément le système scolaire et ne poursuivant pas d'études ou de formation quelconque
III. Equité intergénérationnelle et qualité de la gestion patrimoniale	7. Biodiversité: évolution des populations d'oiseaux communs	7. Niveau de vie relatif des personnes âgées
5. Taux d'épargne		
6. Taux d'épargne nette ajustée	VIII. Modes de production et de consommation	XI. Modes de vie et santé
Taux d'endettement public	8. Eco-efficacité des transports	8. Espérance de vie sans incapacité
	(éclairage sur les victimes des accidents de la route et l'exposition au bruit)	9. Taux de mortalité prématurée évitable
IV. Innovation et recherche	9. Production de déchets et population	10. Taux de suicide des jeunes
8. Taux de diplômés en sciences et technologies	(éclairage sur mode de traitement des ordures ménagères)	11. Consommations responsables
9. Dépenses de R&D	10. Tourisme et territoire	11a. Alcool
10. Dépôts de brevets	11. Consommation de matières premières et PIB	11b. Tabac
11. Fonds investis en capital-risque rapportés au PIB	12. Eco-efficacité du secteur agricole	11c. Obésité
V. Mode d'insertion dans la mondialisation		XII. Valorisation des ressources humaines
12. Productivité du travail	IX. Santé-environnement	12. Formation professionnelle
13. Coût salarial unitaire dans l'industrie manufacturière	13. Qualité de l'air (population exposée à la pollution de l'air par l'ozone)	13. Emploi des femmes
14. Investissements directs étrangers en France	(éclairage sur les particules)	13a. Ecart relatif entre le taux d'emploi des deux sexes
15. Aide publique au développement rapportée au PNB	14. Contamination des eaux continentales par les pesticides	13b. Ecart de rémunération entre les sexes (salariés à temps complet)
	15. Exposition aux risques	14. Risques professionnels
	15a. Risques naturels	14a. Indice de survenance des accidents mortels de travail et de trajet
	(éclairage sur l'exposition aux événements climatiques)	14b. Prévalence des maladies professionnelles
	15b. Risques technologiques	15. Taux d'emploi des travailleurs handicapés dans les établissements d'au moins 20 salariés
	(éclairage sur sols contaminés et marées noires)	

Tableau 22 : Indicateurs nationaux retenus par la SNDF (d'après SNDF, 2003)

Issue d'un projet européen coordonné par le CSTB et cofinancé par la Commission européenne, de début juillet 2001 à fin mars 2004 portant sur l'intégration du développement durable dans les projets d'aménagement et de renouvellement urbain à l'échelle des quartiers et leurs bâtiments ("sustainable renovation of buildings towards sustainable neighborhoods"). C harlot-Valdieu, C. and P. Outrequin (2003). The ISDIS system Integrated Sustainable Development Indicators System and the INDI model Assessment of neighborhood regeneration scenarios, action plans or projects from a SD indicators system. London, Sustainable renovation of buildings for sustainable neighborhoods.

Les impératifs de globalité et de transversalité imposés par le développement durable ont conduit à une multiplication des indicateurs d'évaluation et des échelles d'analyse. La prise en

compte de l'interdépendance des phénomènes entre les échelles est importante. Pourtant, les indicateurs fournis pour évaluer les défis énumérés au niveau national ne sont pas traduits directement à l'échelle locale. Rappelons que certains phénomènes ne se déroulent qu'à certaines échelles. Par exemple, le système de retraitement des déchets ne peut s'évaluer qu'à l'échelle d'une commune ou d'un groupement de communes. Par conséquent, les indicateurs de durabilité doivent être proposés avec leur niveau d'opérationnalité.

De plus, l'analyse des listes d'indicateurs montre un manque global d'indicateurs sur la morphologie qui intervient, pourtant, directement ou indirectement dans le développement durable.

1.3. Évaluer le développement durable par la qualité de vie

Dès les premières revendications écologiques, les réflexions ont porté sur l'évaluation quantitative de la qualité de l'environnement et de la qualité de vie. Depuis les années 1990 et l'instauration du développement durable, l'évaluation des territoires est devenue nécessaire. Mais, plus récemment, la qualité de vie a été remise au-devant de la scène car elle est considérée comme un bon indicateur du développement durable

Sept dimensions ont été définies comme **pertinentes pour** saisir les dimensions objectives de **la qualité de vie en milieu urbain** (Sénécal et Alii 2005). Ces dimensions ont évolué au cours du temps puisque N. Saulnier en définit **10 critères** pour le diagnostic de la **qualité de vie urbaine** (CERTU, 2006). La comparaison des critères ou dimensions dans le tableau 25 révèle de nombreux points communs. L'étude réalisée à Lyon est plus exhaustive, néanmoins, le milieu de vie, l'instruction, les loisirs et la consommation restent des critères de qualité de vie importants pour les citoyens.

Il est intéressant de noter que les dimensions de niveau de vie et de santé ne sont pas définies comme critères dans l'étude lyonnaise. Cela s'explique sans doute par l'objectif de l'enquête qui a été menée : elle visait à éclaircir les perceptions de la qualité de vie des quartiers des habitants enquêtés et des professionnels. La sphère du revenu concerne davantage la qualité de vie individuelle. De même, il est admis par les habitants que les services de santé doivent être présents au sein d'une ville mais pas nécessairement à l'échelle du quartier.

L'analyse micro de la durabilité, c'est-à-dire à l'échelle du quartier, peut s'appuyer sur des indicateurs de formes urbaines. Rappelons que la forme urbaine est au cœur des problématiques du développement urbain durable et par conséquent, permet d'analyser plusieurs indicateurs en même temps. La forme urbaine accueille les logements et les lieux d'activités, conditionne leur taille et leur confort. Elle influe sur la diffusion des polluants et du bruit et la quantité d'ensoleillement reçue. De plus, elle intervient indirectement sur le nombre d'habitants et d'activités qu'elle abrite. Dans sa globalité, elle agit directement sur la diffusion des fluides et indirectement sur la chaleur que la ville produit.

1970	2006
Milieu de vie (l'état du logement et les caractéristiques du quartier)	Qualité de l'environnement sonore
	Qualité de l'air
	Taille des logements
Instruction (le niveau de scolarité)	Infrastructures éducatives
Services de loisirs et de consommation de masse	Disponibilité des espaces verts,
	Potentialités commerciales
Sécurité (la criminalité)	Sécurité des citoyens
Lien social (les types de famille, la vie sociale et la démocratie)	Réseau de transport en commun
Niveau de richesse (le revenu ou l'emploi)	Accidentologie
Santé (les services offerts et les équipements disponibles)	Propreté des rues

Tableau 23 : Comparaison des dimensions de la qualité de vie urbaine entre 1970 et 2006
(Sevenet, 2013 d'après Sénécal et Alii, 2005, CERTU, 2006)

Sénécal et Alii (2005) proposent une série d'indicateurs morphologiques pour définir une typologie des espaces urbains en fonction de leur durabilité (tableau 24). Ces indicateurs morphologiques présentent l'intérêt de mettre la forme au cœur de la démarche. Néanmoins, ils ne sont calculables qu'à l'échelle de la ville et ne tiennent pas compte de la forme dans ses trois dimensions.

Aspects	Variables	Source
Forme urbaine et environnement	Compacité résidentielle	Analyse satellitaire
	Compacité ICI (industrielle, commerciale et institutionnelle)	Analyse satellitaire
	Indice de végétation	Analyse satellitaire
	Distance du centre-ville	Calcul à vol d'oiseau
	Nombre de déplacements attirés ayant pour motif le travail	Enquête Origine – destination
Socio-économique et habitat	Revenu moyen des ménages	Statistique Canada
	Loyer brut moyen (locataire) ou Valeur moyenne du logement (propriétaire)	Statistique Canada
	Pourcentage des logements construits depuis 1981	Statistique Canada
	Pourcentage de propriétaires	Statistique Canada

Tableau 24 : Indicateurs retenues par Sénécal et Alii (2005) pour analyser la qualité de vie.

Hormis les indicateurs présentés dans le paragraphe 2 de ce chapitre, il n'existe pas jusqu'à présent d'indicateurs morphologiques tridimensionnels. La troisième dimension est mobilisée uniquement comme paramètre dans les simulations présentées dans le paragraphe 4.1 de ce chapitre.

2. Des indicateurs simples pour rendre compte d'une situation complexe

Un indicateur doit être défini par son contenu, c'est-à-dire **l'information sur l'état de l'objet**, par la cible, c'est-à-dire **l'espace** ou **la thématique visée**, par sa forme ou le mode par lequel le contenu et l'objectif sont exprimés et par le vecteur, c'est-à-dire le mode de transmission de l'information (Maby et Alii, 2003).

Dans le chapitre 3, nous avons défini des thématiques clés pour évaluer la qualité de vie et de la durabilité au regard des besoins des habitants. Le tableau 25 synthétise les thématiques retenues pour l'analyse qui suite.

1970	2006
Milieu de vie (l'état du logement et les caractéristiques du quartier)	Qualité de l'environnement sonore
	Qualité de l'air
	Taille des logements
Instruction (le niveau de scolarité)	Infrastructures éducatives
Services de loisirs et de consommation de masse	Disponibilité des espaces verts,
	Potentialités commerciales
Lien social (les types de famille, la vie sociale et la démocratie)	Réseau de transport en commun

Tableau 25 : Comparaison des dimensions de la qualité de vie urbaine entre 1970 et 2006, les thématiques retenues pour la mise en place des indicateurs (Sevenet, 2013 d'après Sénécal et Alii, 2005, CERTU, 2006)

L'objectif est de proposer des indicateurs quantitatifs applicables à toute une ville ou une agglomération afin d'analyser sa durabilité ainsi que celle de ses quartiers.

Les objectifs fixés pour la suite de ce travail sont les suivants :

- Mobiliser des données harmonisées et disponibles. Une des principales critiques adressées aux études réalisées jusqu'à présent est le manque d'harmonisation des informations, d'un territoire à un autre, qui empêche la comparaison (cf. chapitre 4 et chapitre 5).
- Développer des indicateurs identiques et comparables entre tous types d'espaces.

Rappelons que ces indicateurs permettent d'analyser la durabilité d'une ville/agglomération et de ces quartiers/IRIS. La comparaison départementale ou régionale n'implique pas le même indicateur et les mêmes mesures (cf. paragraphe 2.2 du chapitre 3). Au-delà de la simple comparaison entre deux unités spatiales de même niveau, l'articulation multiscale des indicateurs offre des perspectives de développement intéressantes. L'objectif n'est pas de réaliser une analyse multiscale mais de mettre en évidence l'intérêt d'une échelle d'analyse par rapport à une autre, en fonction de l'indicateur étudié.

2.1. Morphologie et qualité de vie

La présente section vise à l'analyse de la durabilité urbaine sous l'angle de la qualité de vie, au regard de la morphologie et de son adéquation avec les besoins de la population. L'analyse est scindée en deux :

- L'estimation de la qualité du milieu de vie urbain (au sens donné dans le chapitre 3).
- L'évaluation de l'équilibre entre espaces artificialisés et espaces « naturels ».

Dans ce travail, nous nous sommes concentrées tout d'abord sur la qualité de l'environnement sonore, de l'air et de l'adaptation de la taille des logements (le niveau de « peuplement » des logements). Trois indices sont ainsi mobilisés : **l'indice de rugosité**, de **végétalisation** et de **surpeuplement**.

Ces derniers prennent appui sur une estimation de la population par bâtiment développée à partir de la méthode d'A. Banos et de T. Thévenin (2008). La schématisation de la méthode est expliquée sur la figure 88 et la figure 89.

$$\text{Pop estimée par bâtiment} = \text{Pop ilot} \times \frac{\text{Nb log estimé par bâtiment}}{\text{Nb log par ilot}}$$

$$\text{Nb log estimé par bâtiment} = \text{Int} (\text{Surface développée par bâtiment} \times \text{Densité log})$$

$$\text{Densité log} = \frac{\text{logement ilot}}{\text{Surface développée (batiments) totale par ilot}}$$

Figure 88 : Méthode de calcul pour la désagrégation d'un ilot au bâtiment (d'après Banos et Thévenin, 2008)

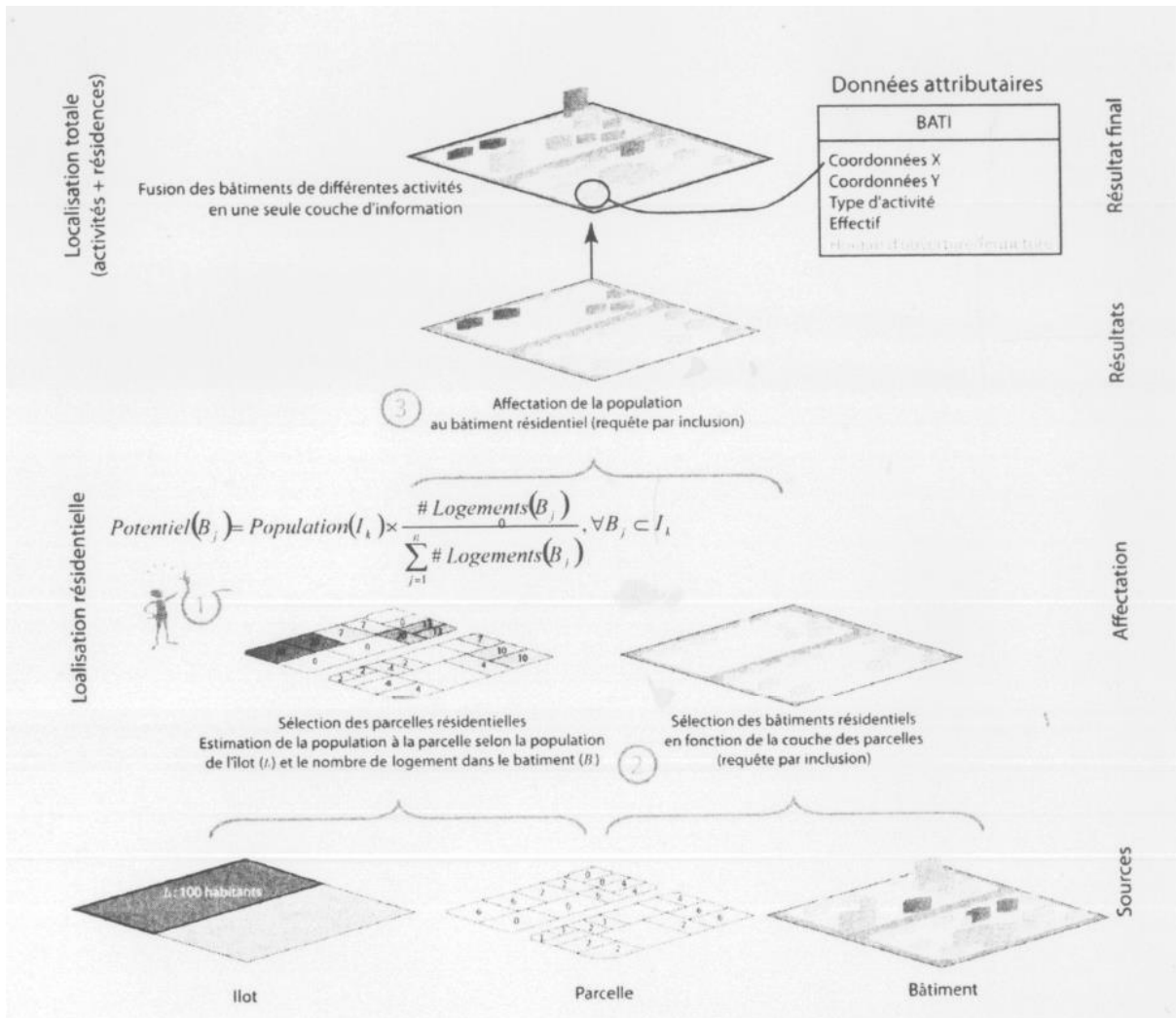


Figure 89 : Schéma présentant la méthode de désagrégation de la population au bâtiment (Banos et Thénevin, 2008)

Pour réaliser la désagrégation des données, les bâtiments des catégories « Administratif », « Industrielle, agricole, commerciale », « Religieux » et « Transport » de la BD TOPO® ont été supprimés. Ne sont conservés au maximum que ceux identifiés comme ayant une fonction résidentielle. Malheureusement, les bureaux et les commerces, disséminés dans la ville ne peuvent être localisés précisément.

2.1.1. Indicateur de la qualité du milieu de vie

L'analyse de la qualité sonore et de la qualité de l'air a été réalisée au moyen de l'indice de rugosité* qui permet d'évaluer la qualité de circulation des fluides. Il s'appuie notamment sur l'Indice de construction de Landsberg (IdL) dont nous avons discuté dans le chapitre 2, paragraphe 2.1.3). Il met en relation l'imbrication entre les pleins et les vides et prend également en compte la longueur des voies pour pondérer les formes propices à l'accumulation des polluants.

Le calcul de l'Indice de Construction de Landsberg a été effectué uniquement sur les routes ; les sentiers et les chemins ont été retirés pour le calcul.

La rugosité est utilisée traditionnellement pour caractériser les éléments du sur-sol lorsqu'une étude sur la circulation des fluides est réalisée: vent, pollution de l'air etc.

Rappelons qu'une rue est considérée comme propice à la concentration des polluants quand l'IdL est supérieur à 1,5. C'est le cas d'une rue canyon, par exemple.

$$\frac{\text{Part de la population dont } IdL \geq 1.5 \times \sum \text{Longueur de voies dont } IdL \geq 1.5}{\sum \text{Longueur totale des voies de l'unité spatiale}} *$$

Équation 3 : Indice de rugosité ou de sensibilité aux différents fluides (Sevenet, 2013).

Afin d'estimer la part de la population exposée au bruit routier - aux polluants, la géométrie des bâtiments (BD TOPO®) et les données du recensement de la population (INSEE) sont utilisées.

1. **Calcul de l'IdL** : Sélection des bâtiments jouxtant la route en fonction de sa largeur de cette dernière. Puis, calcul du rapport Hauteur/Largeur.
2. **Estimation de la population** par bâtiment (Figure 89).
3. Sélection des bâtiments dont l'IdL est supérieur ou égal à 1,5 et calcul de la somme de la population « exposée aux nuisances » par IRIS.
4. Calcul de la **moyenne de l'IdL par tronçon** de route et sélection de ceux supérieurs ou égaux à 1,5

Figure 90 : Méthode d'estimation de la population exposée au bruit ou aux polluants (Sevenet, 2013)

Il peut être calculé à plusieurs niveaux : bâtiment, typo-morphologie, IRIS. Les résultats se lisent de la manière suivante : plus l'indice est proche de 1, plus les nuisances potentielles sont fortes. Un exemple est présenté dans la suite de ce chapitre.

2.1.2. Adéquation entre naturel et artificiel : la biodiversité

Si la densification des villes est l'option que la législation a retenue pour limiter l'étalement urbain, encore faut-il ne pas dégrader la qualité de l'air (transport) et de l'environnement (bruit) pour retenir ou attirer les habitants au sein des espaces urbains denses. Ainsi, la circulation des fluides dans une ville doit être mise en relation avec un indicateur évaluant la présence d'espaces végétalisés.

De plus, rappelons que les deux principaux secteurs responsables des émissions de CO₂ sont le transport et les bâtiments. Cet indice permet indirectement d'estimer la contribution de l'unité spatiale à la régulation du CO₂ dans la ville. Le bilan du cycle du carbone indique une quantité importante de carbone stockée dans la végétation. En outre, les feuilles retiennent certains des polluants (particules, ozone *etc.*) présents dans l'air même. Parallèlement, la canopée verte a une incidence plus globale sur le micro-climat tel que le rafraîchissement des zones urbaines. A ce propos, l'Institut de veille sanitaire (InVS) confirme que les villes denses et artificialisées sont plus vulnérables aux fortes chaleurs que les villes vertes car la végétation abaisse la température des surfaces et de l'air grâce aux effets d'ombrage et à l'évapotranspiration. Tous ces éléments ont une incidence faible mais non négligeable s'ils sont combinés avec la qualité de l'espace urbain (Boutefeu, 2011).

De plus, les espaces verts impactent indirectement la qualité de vie au travers du paysage urbain. Ainsi, le manque d'espace vert en zone urbaine conduit les citoyens à rechercher des points de contact avec la nature et à y consacrer une part croissante de leurs loisirs, et donc de leur revenu (Boutefeu, 2011). En effet, une enquête réalisée par Ipsos en 2008, précise l'importance de cette demande sociale de nature en ville, puisque trois Français sur quatre fréquentent régulièrement les espaces verts de leur commune. En outre, ce besoin est lié à l'attrait exercé par la maison individuelle possédant un jardin privatif et qui est donc l'un des moteurs de l'étalement urbain.

Les espaces végétalisés peuvent prendre différentes formes ; parcs, squares et jardins sont des éléments marquants de l'espace urbain mais les arbres, la pelouse, les fleurs ont également leur importance pour une offre de sites paysagers de qualité.

Pour le calcul de l'indice, nous avons choisi de distinguer deux composantes : les espaces verts et/ou espaces protégés. La couche *végétation* de la BD TOPO® offre une précision de l'emprise des espaces verts intéressante, couplée à une classification des types de végétations sur laquelle nous nous appuyons (tableau 26).

Type	Distance
Bois	1 km
Forêt fermée de conifères	1 km
Forêt fermée de feuillus	1 km
Forêt fermée mixte	1 km
Forêt ouverte	1 km
Haie	100 m
Lande ligneuse	500 m
Peupleraie	500 m
Verger	500 m
Zone arborée	500 m

Tableau 26 : Poids des espaces verts dans l'espace perçu en fonction de leur type, exprimé en mètre (d'après la BD TOPO®, 2006)

En ce qui concerne les espaces naturels, le tableau 27 résume les principaux statuts de protection des espaces naturels. Tous les espaces naturels protégés ont été pris en compte

Nom		Niveau
Arrêté de protection du biotope		France
Réserves de la biosphère	Centre	Monde
	Zone tampon	
	Zone de transition	
Terrains du conservatoire du littoral		France
Parcs nationaux	Cœur	France
	Périphérie	
Parcs naturels régionaux	Cœur	France
	Périphérie	
Sites Ramsar		Monde
Réserves biologiques	Intégrales	France
	dirigées	
	zones tampons	
Réserves biogénétiques du Conseil de l'Europe		Europe
Réserves naturelles		France
Réserves nationales de chasse et de faune sauvage		France
Réserves naturelles régionales		France
ZICO		Europe
ZNIEFF	1	Europe
	2	
Natura 2000		Europe

Tableau 27 : Synthèse des espaces protégés (Sevenet, 2013)

Ces deux composantes sont analysées en fonction de deux opérateurs spatiaux morphologiques :

- la **distance** (tableau 26) et la part de la population « sous influence »,
- la **connectivité**.

La **distance** aux espaces végétalisés permet d'analyser la composante paysagère de ces espaces en ville.

La fragmentation des espaces végétalisés peut prendre deux formes. La première, est la fragmentation de ces espaces par le mitage urbain, il faut le limiter ou proposer une autre forme de fragmentation pour optimiser les différentes fonctions des espaces urbains. Ce qui nous conduit à la deuxième forme proposée par C. Genre-Grandpierre et P. Frankhauser (1998). La fragmentation des espaces verts est liée à l'irrégularité de leur contour pour maximiser le contact de la nature avec la fonction résidentielle. Cette deuxième forme présente un autre avantage, elle laisse des couloirs verts continus pour la mobilité de la faune et de la flore (coulée verte). Cette composante est prise en compte par la **connectivité** des espaces verts de la ville.

De plus, l'indicateur permet de vérifier l'**équi-répartition** des espaces verts de la ville pour chaque unité spatiale en fonction de sa surface. A chaque fois, l'indicateur évalue leur

répartition à l'intérieur et entre les unités spatiales. Ceci permet de connaître les zones où le végétal manque.

$$\left(\frac{\begin{aligned} & \text{Superficie totale des espaces verts de l'IRIS} \\ & \left(\text{Superficie totale des espaces verts de la ville} \times \frac{\text{Surface de l'IRIS}}{\text{Surface totale}} \right) \\ & + \\ & \text{Superficie totale des espaces protégés de l'IRIS} \\ & \left(\text{Superficie totale des espaces protégés de la ville} \times \frac{\text{Surface de l'IRIS}}{\text{Surface totale}} \right) \\ & + \\ & \text{Superficie totale des espaces verts connectés de l'IRIS} \\ & \left(\text{Superficie totale des espaces verts de l'IRIS} \times \frac{\text{Surface de l'IRIS}}{\text{Surface totale}} \right) \end{aligned}}{3} \right)$$

× Population sous influence

Équation 4 : Indice de végétalisation (Sevenet, 2013).

Concrètement, le résultat obtenu est 1 quand l'unité spatiale bénéficie d'espaces végétalisés suffisants au regard du reste de la ville, il tend vers 0 lorsqu'ils sont en sous-représentation. Il peut être calculé aux niveaux de l'IRIS et de la typo-morphologie.

2.1.3. L'adéquation entre taille des ménages et taille des logements

Faire de la densité ne signifie pas la réduction de la sphère privée par la diminution de la taille des logements. L'application des nouvelles règles d'urbanisme en cohérence avec les besoins et les attentes des habitants, nécessite la connaissance fine de l'espace urbain. Par conséquent, la prise en compte de la troisième dimension est indispensable car elle permet d'affiner la connaissance du peuplement urbain.

Afin d'estimer l'adéquation entre le nombre d'habitants et la surface de logements disponible, l'indice de surpeuplement est calculé. Il s'appuie sur la norme des surfaces de logements suivante : 1 personne pour 9m².

$$\frac{\text{Population de l'unité spatiale}}{\text{Surface développée de l'unité spatiale} * \left(\frac{1}{9}\right)}$$

Équation 5 : Indice de surpeuplement (Sevenet, 2013)

Cet indice permet d'identifier les « dents creuses » de peuplement et à l'inverse les zones de trop fortes densités de population. Il s'appuie sur les données de la BD TOPO® et du recensement général de la population de l'INSEE. Il peut produire des résultats à plusieurs niveaux : du bâtiment à la commune. Lorsque l'indice est égal 1, l'unité spatiale analysée possède une adéquation entre la surface développée de bâti et sa population.

2.2. Morphologie et fonction urbaine

2.2.1. Analyse des surfaces utiles

Un des principes du développement urbain durable est de garantir une mixité et une diversité fonctionnelle dans un espace donné. L'**indice de diversification** sectorielle permet d'estimer la bonne répartition des activités à l'intérieur d'une unité spatiale.

La distinction entre la nature des bâtiments dans la BD TOPO® n'est pas assez précise, De ce fait, l'indice s'appuie sur la base de données SIRENE (INSEE) et sa localisation à l'adresse.

A partir de la nomenclature Naf21 de l'INSEE (Tableau 28) :

1. Géo-référencement des adresses de la base SIRENE (INSEE)
2. Par IRIS, décompte des entreprises par codes
3. Comparaison de la composition des IRIS par rapport à celle de la ville

Figure 91 : Préparation des données pour le calcul de la diversification sectorielle (Sevenet, 2013).

Code	Libellé
A	Agriculture, sylviculture et pêche
B	Industries extractives
C	Industrie manufacturière
D	Production et distribution d'électricité, de gaz, de vapeur et d'air conditionné
E	Production et distribution d'eau ; assainissement, gestion des déchets et dépollution
F	Construction
G	Commerce ; réparation d'automobiles et de motocycles
H	Transports et entreposage
I	Hébergement et restauration
J	Information et communication
K	Activités financières et d'assurance
L	Activités immobilières
M	Activités spécialisées, scientifiques et techniques
N	Activités de services administratifs et de soutien
O	Administration publique
P	Enseignement
Q	Santé humaine et action sociale
R	Arts, spectacles et activités récréatives
S	Autres activités de services
T	Activités des ménages en tant qu'employeurs ; activités indifférenciées des ménages en tant que producteurs de biens et services pour usage propre
U	Activités extra-territoriales

Tableau 28 : Classification NAF au 1^{er} niveau

source : INSEE

L'indice donne un résultat qui tend vers l'infini ; plus il est proche de 1, plus les activités sont mal réparties entre les unités spatiales retenues, qui peuvent être issues d'une typomorphologie ou de l'IRIS.

$$\frac{\sum_i^n \frac{Nb \text{ d'entreprises de l'activité code } i \text{ de l'IRIS}}{Nombre \text{ d'entreprises de l'activité de code } i \text{ de la ville}/n}}{n}$$

Équation 6 : Indice de diversification sectorielle

2.2.2. Quelle mixité sociale ?

La mixité sociale peut être ventilée en deux composantes.

La **mixité intergénérationnelle** est évaluée grâce à l'indice de jeunesse qui se mesure par le rapport entre la population des moins de 20 ans et celle des plus de 65 ans. Le résultat se lit de la manière suivante : plus l'indice est élevé plus l'unité spatiale accueille une population jeune. Dans notre analyse, l'unité spatiale doit posséder une répartition égale entre chacune de ces populations.

La mixité sociale liée à la situation économique des habitants est évaluée grâce à :

- L'**indicateur de mixité sociale** dans l'unité spatiale qui est calculé par le rapport entre le nombre de résidences principales en HLM et le nombre total de résidences principales. La loi SRU a fixé comme impératif aux communes, d'accueillir au moins 20% de logements sociaux. Afin de respecter une équi-répartition au sein de la commune, chacune des unités spatiales devrait posséder la même proportion. Ainsi, si l'indice tend vers 0, l'unité spatiale ne possède pas suffisamment de logements HLM ; s'il approche de 1, elle respecte la législation ; s'il tend vers l'infini, les logements HLM sont sur-représentés dans l'unité spatiale.

$$\frac{Nb \text{ de HLM de l'IRIS}}{\left(\frac{0,2 \times Nb \text{ de résidences principales}}{Nb \text{ d'IRIS}} \right)}$$

Équation 7 : Indicateur de mixité sociale (Sevenet, 2013)

- L'**écart interdécile** qui mesure le rapport entre les revenus du 1^{er} et du 9^{ème} décile. L'indice s'étend de 0 à 1 sachant que si l'indice prend la valeur 0, il n'y a aucun écart de revenus.

Dans les trois cas, les données sont issues du recensement de la population (INSEE). L'indice est calculé uniquement à l'échelle de l'IRIS.

2.2.3. Localisation des lieux de vie : domicile et travail

Le Grenelle de l'environnement vise à réduire de 11 % le CO2 émis par les transports d'ici 2020. Les trajets domicile-travail représentaient en 2008 plus de 20% des trajets et 20 minutes de temps, en moyenne, dans une grande agglomération (tableau 29).

		Travail habituel	Etudes	Commerces	Domicile à autres activités	Autres trajets	Ensemble
Ensemble rural et faiblement urbanisé							
Répartition (%)	1994	19	12	18	39	12	100
	2008	21	10	20	38	11	100
Durée du déplacement (minutes)	1994	16	18	13	16	17	16
	2008	18	20	15	17	17	17
Evolution de la durée du déplacement (%)	1994- 2008	13	9	17	4	-2	6
Evolution de la distance à vol d'oiseau (%)	1994- 2008	26	22	29	2	0	12
Ensemble grandes agglomérations							
Répartition (%)	1994	20	13	18	37	12	100
	2008	21	11	21	37	10	100
Durée du déplacement (minutes)	1994	23	18	13	19	19	19
	2008	25	19	14	18	19	19
Evolution de la durée du déplacement (%)	1994- 2008	10	4	5	-1	-4	2
Evolution de la distance à vol d'oiseau (%)	1994- 2008	10	ns	ns	-10	-1	-1

Tableau 29 : Évolution des déplacements par motif

Source : Insee - SOeS - Inrets, enquêtes nationales transports et communication 1993-1994, transports et déplacements 2007-2008.

(Hubert, 2009)

Ces trajets contribuent, pour une large part, aux émissions de gaz à effet de serre d'une commune et à la dégradation de la qualité de vie. Deux indices sont mis en place pour évaluer cette dégradation.

Le premier compare la part des actifs travaillant et résidant au sein d'une même ville. Elle est mesurée grâce au ratio entre le nombre d'actifs occupés travaillant dans la commune et le nombre d'actifs occupés se déplaçant en transport en commun (TC).

$$\frac{\text{Nb d'actifs occupés résidant et travaillant au sein de l'unité spatiale}}{\text{Nb d'actifs occupés de la ville}}$$

Équation 8 : Indicateur mesurant la part des actifs travaillant et résidant au sein d'une même ville
(Sevenet, 2013)

La deuxième mesure l'importance des trajets domicile-travail effectués en transport en commun grâce au nombre d'actifs se déplaçant en TC par unités spatiale.

$$\frac{\text{Nb d'actifs occupés se déplaçant en TC au sein de l'unité spatiale}}{\text{Nb d'actifs occupés de la ville}}$$

Équation 9 : Indicateur mesurant la part des actifs se déplaçant en TC (Sevenet, 2013)

Les données sont également issues du recensement de la population (INSEE) et à l'échelle de l'IRIS.

Ces deux indices sont calculés à l'échelle de l'IRIS, une désagrégation de ces données à l'échelle de la typo-morphologie n'est pas possible.

2.3. Morphologie et environnement/énergie

2.3.1. L'ensoleillement

Un potentiel solaire se calcule en tenant compte des quatre dimensions suivantes :

- Physique : L'irradiation solaire annuelle reçue par unité de surface.
- Théorique : L'énergie totale reçue en fonction de la surface urbanisée.
- Technique : Le rendement d'un panneau photovoltaïque.
- Economique : L'énergie totale reçue en fonction de la surface utile de toit. Celle-ci est déterminée grâce à des paramètres économiques comparables à la rentabilité d'une installation photovoltaïque.

L'analyse portera sur les trois premières étapes du calcul, dans la mesure où le potentiel de production attendue en énergie renouvelable (ENR) est de 1200 kWh/habitant en moyenne. La partie économique ne sera pas traitée, ainsi l'indicateur développé permet de connaître la contribution en potentiel photovoltaïque de chaque unité spatiale à la production en ENR.

Etapes de l'estimation du potentiel

1.Potentiel physique :

Mesure de l'irradiation annuelle à la hauteur des toits à une résolution de 1m. x 1m. grâce à l'outil « Solar radiation » de ArcGIS®. Pour chaque pixel (90m x90m), la valeur de l'irradiation (Wh) par mètre carré est connue.

2.Potentiel théorique :

Application du rendement moyen d'une installation photovoltaïque.

Figure 92 : Méthode d'estimation du potentiel d'énergie photovoltaïque (Sevenet, 2013)

Le modèle 2^{1/2}D des bâtiments est fourni au format vecteur, cependant le format raster est le format géré le plus souvent par les outils d'analyse spatiale dans les SIG (comme l'outil « Solar radiation » de ArcGIS®). Par conséquent le modèle doit être transformé en Modèle Numérique d'Élévation, (cf. paragraphe 2.1.1 du chapitre 4 dont la valeur du pixel représente la hauteur.

Il est maintenant possible de calculer à partir des MNE des toits créés, l'irradiation solaire annuelle à partir de l'outil. Celui-ci offre plusieurs possibilités de calcul de l'irradiation solaire, dont le résultat est toujours exprimé en Watt heure par mètre carré (Wh/m^2) :

- Sur une surface donnée ou d'une localisation particulière (exprimée géométriquement par un point), et
- En fonction de la durée (quelques heures dans une journée, une journée complète, quelques dates particulières – l'équinoxe par exemple - une période donnée ou une année entière).

Cette analyse vise à mesurer le potentiel d'énergie solaire en fonction de la surface de toit utile, l'irradiation solaire annuelle sera calculée sur une surface.

Ensuite, la surface utile par toit est calculée. Un panneau photovoltaïque a une dimension de $1\text{m} * 0,5\text{m}$. Pour estimer la surface de toit utile à l'installation de panneaux photovoltaïques, il faut connaître le nombre de panneaux qu'il est possible d'installer sur chaque toit. Pour cela, la méthode consiste à compter le nombre de pixels ($0,5\text{m} * 0,5\text{m}$) complètement inclus dans chaque toit et de diviser ce nombre par deux car la taille d'un panneau correspond à deux pixels. Cette méthode ne s'applique que sur les toits pentus, cependant le modèle utilisé n'est pas en 3D mais extrudé. De ce fait, nous considérons que tous les toits sont plats.

Sur les toits plats, les panneaux peuvent être orientés et inclinés. Cette liberté qui maximise le niveau d'irradiation solaire, présente un inconvénient : l'installation nécessite un espacement entre deux panneaux qui doit être supérieur à 4 fois la hauteur du panneau. Ainsi il est aisé de calculer la surface totale (réel + espacement) qu'occupe un panneau (ANNEXE I et figure 93). D'après ce calcul, un panneau incliné de manière optimale (30° à Nice) occupe sur le toit une dimension de $1\text{m} * 1\text{m}$ soit 4 pixels.

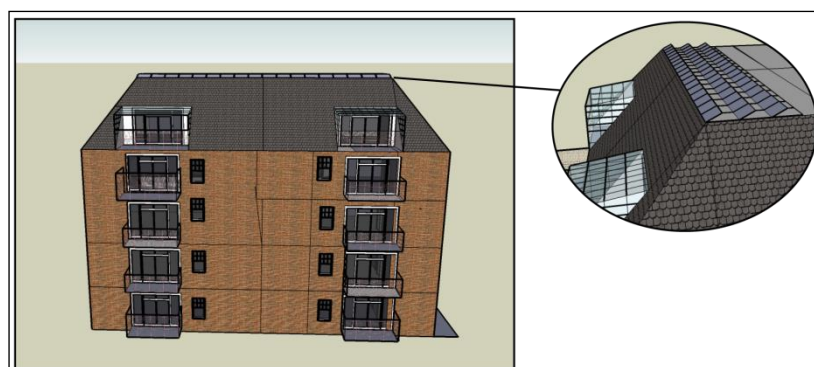


Figure 93 : Représentation d'une installation de panneaux photovoltaïques sur un toit plat (Sevenet, 2013)

Puis, cette surface utile est rapportée au nombre de Wh reçu sur le toit. Pour chaque toit, les données utilisées sont:

- L'irradiation annuelle moyenne en Wh/m^2
- Le nombre de panneaux qu'il est possible d'installer

Il est donc possible de calculer la surface disponible et la puissance, en tenant compte du rendement d'un panneau qui est de 10% actuellement.

Les résultats sont présentés par la suite aux deux niveaux : IRIS et typo-morphologie. Il est également possible de connaître le potentiel par bâtiment.

2.4. Caractériser la morphologie d'une unité spatiale

2.4.1. Par une typo-morphologie

La méthode proposée dans le chapitre 1 permet de détecter les formes urbaines dans leurs trois dimensions. Même si la conclusion a, entre autres, souligné les limites des résultats obtenus, la typologie est analysée au regard des indices proposés : indices de surpeuplement, de rugosité de végétalisation et de diversité sectorielle.

Avant d'estimer ces variables sur les types morphologiques, nous avons testé la pertinence de ce découpage sur les bâtiments. Nous souhaitons savoir si les bâtiments, pour lesquels nous disposons de variables liées à la morphologie, se ressemblent davantage à l'intérieur de leur type morphologique que de manière générale.

Variables	Méthode	Significativité de la relation	Intensité de la relation Typologie n°1	Significativité de la relation	Intensité de la relation Typologie n°2
Indice de surpeuplement*	Analyse de Variance	oui	0,44	oui	0,26
Bâtiments pour lequel IdL > 1,5	Analyse de Variance	oui	0,45	oui	0,11
Proximité à 1, 2, ou 3 espaces verts	Tableau de contingence	oui	0,51	oui	0.50

L'indice de surpeuplement est expliqué dans le paragraphe 2.1.3 de ce chapitre

Tableau 30 : Test de la relation entre le type-morphologique et les autres indices morphologiques de durabilité (Sevenet, 2013).

Nous avons procédé à une analyse de variance des bâtiments pour chaque classe des typo-morphologie. D'après le tableau 30, la relation entre l'indice de surpeuplement des bâtiments d'un type est cohérente avec celui de son type à 44%, par contre, l'intensité de la relation pour la deuxième typologie n'est que de 26%.

Ensuite, une autre analyse de variance a été effectuée à partir du nombre de bâtiments dont l'indice de construction de Landsberg est supérieur à 1,5. La relation entre les bâtiments et leur type est également significative et l'appartenance à la 1^{ère} typo-morphologie explique à 45% l'indice de construction de Landsberg et celle de la 2^{ème} seulement 11%.

Enfin, nous avons fait un tableau de contingence pour tester la relation entre la proximité à un ou plusieurs espaces verts. L'appartenance à un type indique relativement bien la proximité à au moins un espace vert quelque soit la typologie.

2.4.2. Quelle morphologie des IRIS ?

La typologie proposée dans le chapitre 1 nécessite un certain nombre de traitements complexes. Par conséquent, nous avons souhaité proposer une méthodologie d'analyse des formes urbaines et de leur durabilité au regard de données disponibles et qui nécessite moins de traitement pour faciliter la reproductibilité de l'analyse.

Dans la suite de ce travail, l'**indice de compacité « 3D »** vise l'analyse des formes urbaines des IRIS en fonction de la qualité que les habitants leur attribuent. Il est mis en relation avec des indicateurs de durabilité plus classiques.

$$\frac{\sum \text{Surfacebâtie} \times \sigma \text{desHauteurs} \times \text{Classedeconnexité}}{\text{Surfacetotaledel'IRIS} \times 1 \times 1}$$

Équation 10 : Indice de compacité 3D

Cet indice fait appel aux composantes du volume (hauteur, largeur, longueur) et met en relation les différents éléments urbains par la connexité (cf. chapitre 1, paragraphe 5.2.2). La connexité, pour ce calcul, est comprise entre de 0 à 1, où 1 est la situation où le bâti est le moins connexe. Par conséquent, plus l'indice est proche 1 plus l'IRIS est dense, hétérogène et le bâti continu.

3. Quelle durabilité pour la Ville de Nice ?

Les résultats obtenus après le calcul des indices sont présentés de la manière suivante :

- Ceux qui ont trait directement à la morphologie. L'analyse vise à définir quelle est l'échelle pertinente pour rendre compte de certaines variables telles que la rugosité de la ville et la présence d'espace vert.
- Ceux qui renvoient à la composante économique et sociale. La deuxième partie poursuit également le même objectif mais de manière secondaire. Les indicateurs proposés viennent compléter l'analyse de durabilité de la ville.

La Ville de Nice, étant très touristique, elle possède moins de 75% de résidences principales. Par conséquent, la désagrégation de la population à l'échelle des bâtiments s'est appuyée sur le nombre de résidences principales et non de logements pour ne pas introduire de biais liés aux résidences secondaires.

L'indice montre que les IRIS dont la morphologie est propice à l'accumulation des fluides se localisent essentiellement en centre-ville (figure 94). Rappelons que l'indice s'appuie sur la longueur et la largeur des voies et la hauteur des bâtiments. *De facto*, les IRIS mis en exergue possèdent une forte densité de voies de circulation dont la largeur est moins importante que la hauteur des bâtiments qui les entourent. Près de 90% des tronçons se situant dans ces zones sont des routes à une chaussée. Cette information implique une faible capacité d'accueil de ces voies, ainsi les embouteillages peuvent être fréquents.

L'analyse par types morphologiques est mieux adaptée pour l'interprétation de cet indice dans la mesure où la diversité morphologique des bâtiments est mieux respectée. L'IRIS comme niveau d'analyse semble pertinent pour certaines parties de la commune comme le centre-ville car son maillage est précis, mais la création de cette maille à partir de la population entraîne un maillage très irrégulier en périphérie et n'est donc plus adaptée. Le centre-ville constitue toujours la zone la moins propice à la circulation des fluides. Néanmoins, des contrastes plus forts apparaissent en périphérie de la ville. Ces zones possèdent une morphologie en rupture avec leur voisinage (quelques exemples sont cerclés de rouge sur la (figure 95).

Malgré la faible relation entre l'indicateur de rugosité et la deuxième typo-morphologie, la figure 95 indique une rugosité plus forte que les deux autres découpages et un gradient entre le centre et la périphérie de la ville. Les zones cerclées montrent des indices proches spatialement mais différenciés dans leur valeur. Elles indiquent les zones en transition de la ville. Par exemple, la vallée du Paillon, anciennement industrielle, possède une forte densité de bâtis néanmoins, la régénération des friches laisse place à des espaces vides* qui permettent la circulation des fluides.

Au moment de la
production des
données

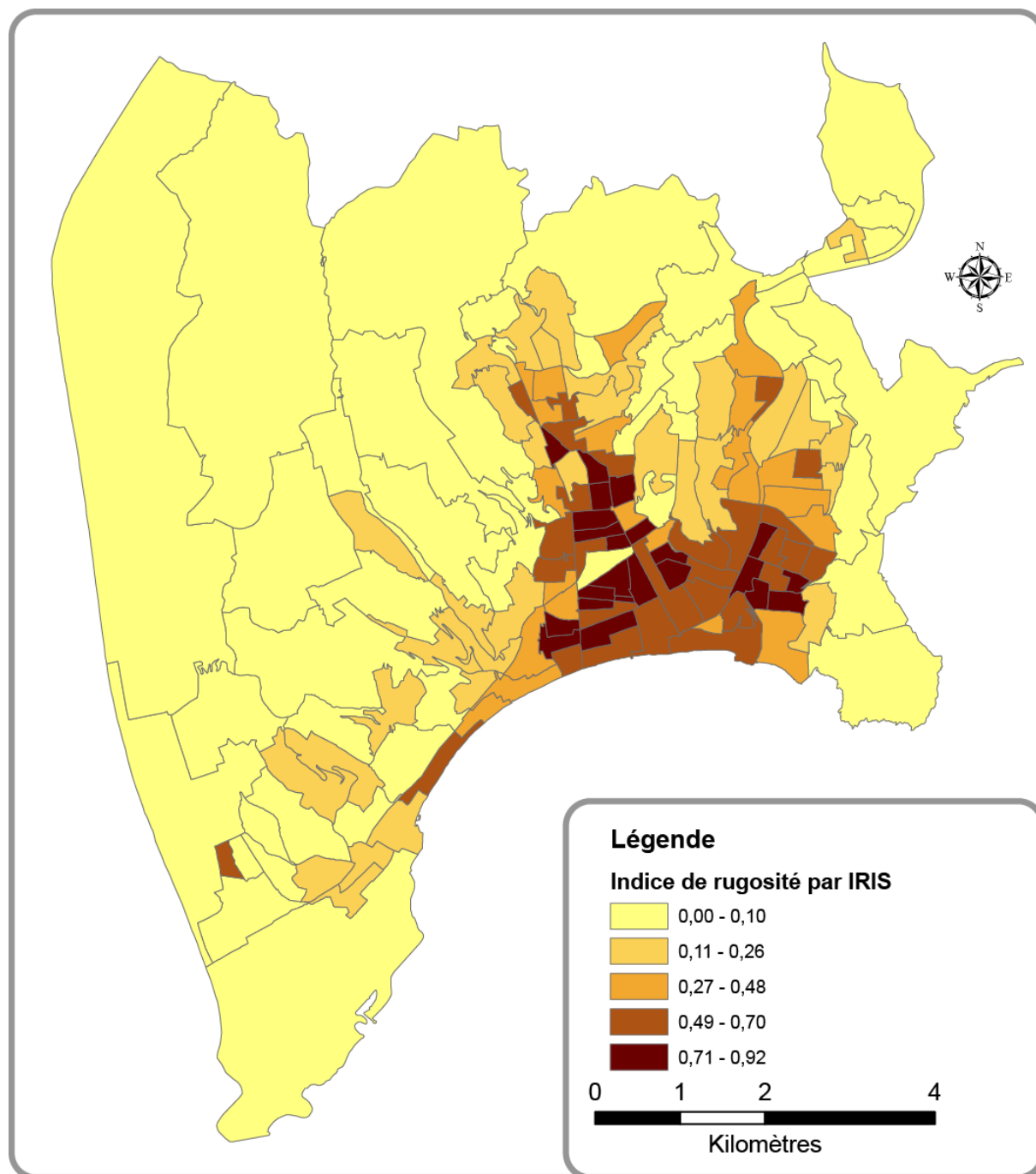


Figure 94 : Indice de rugosité des IRIS de la Ville de Nice d'après les données INSEE, 2007
(Sevenet, 2013)

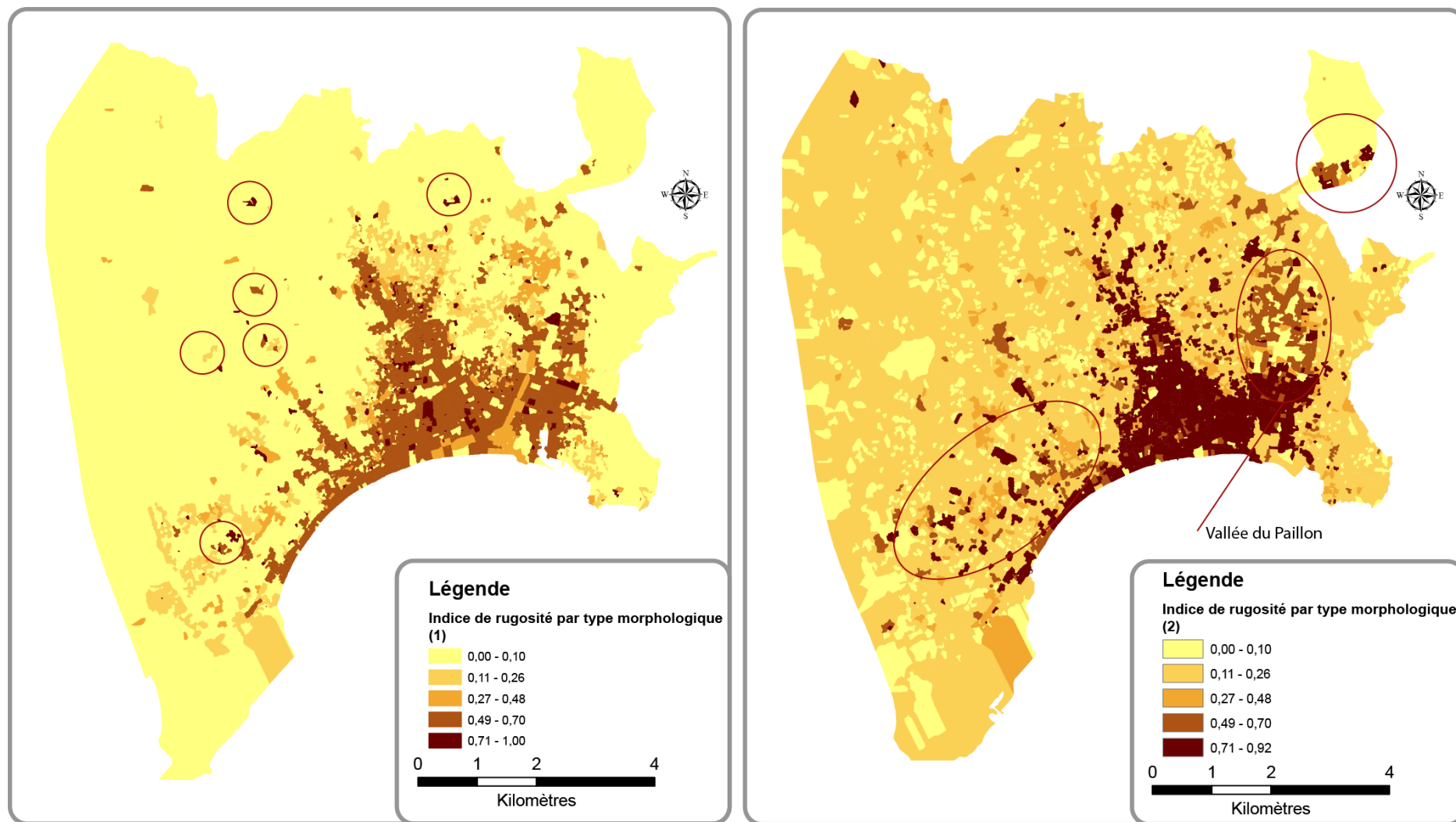


Figure 95 : Indice de rugosité pour les deux typo-morphologies de la Ville de Nice d'après les données INSEE, 2007 (Sevenet, 2013)

La localisation de l'indice de végétalisation permet de pointer du doigt les zones où la qualité paysagère concernant les espaces verts doit être améliorée et celles pour lesquelles elle doit être préservée. De plus, la mise en parallèle de cet indice avec celui de rugosité permet de travailler avec cohérence sur la qualité de l'air, de l'environnement et de la qualité paysagère. Le coefficient de corrélation entre les deux indices est de $-0,63$ et montre donc un lien inverse.

Sur le territoire niçois, quatre types de protection existent : une zone de protection prioritaire, les sites d'intérêt communautaire du réseau Natura 2000, des terrains du Conservatoire du littoral et des arrêts de protection du biotope. Ces espaces se localisent dans la plaine du Var et sur les collines niçoises. En outre, les collines disposent d'une importante quantité d'espaces verts de types forêts, bois et autres zones arborées (figure 96).

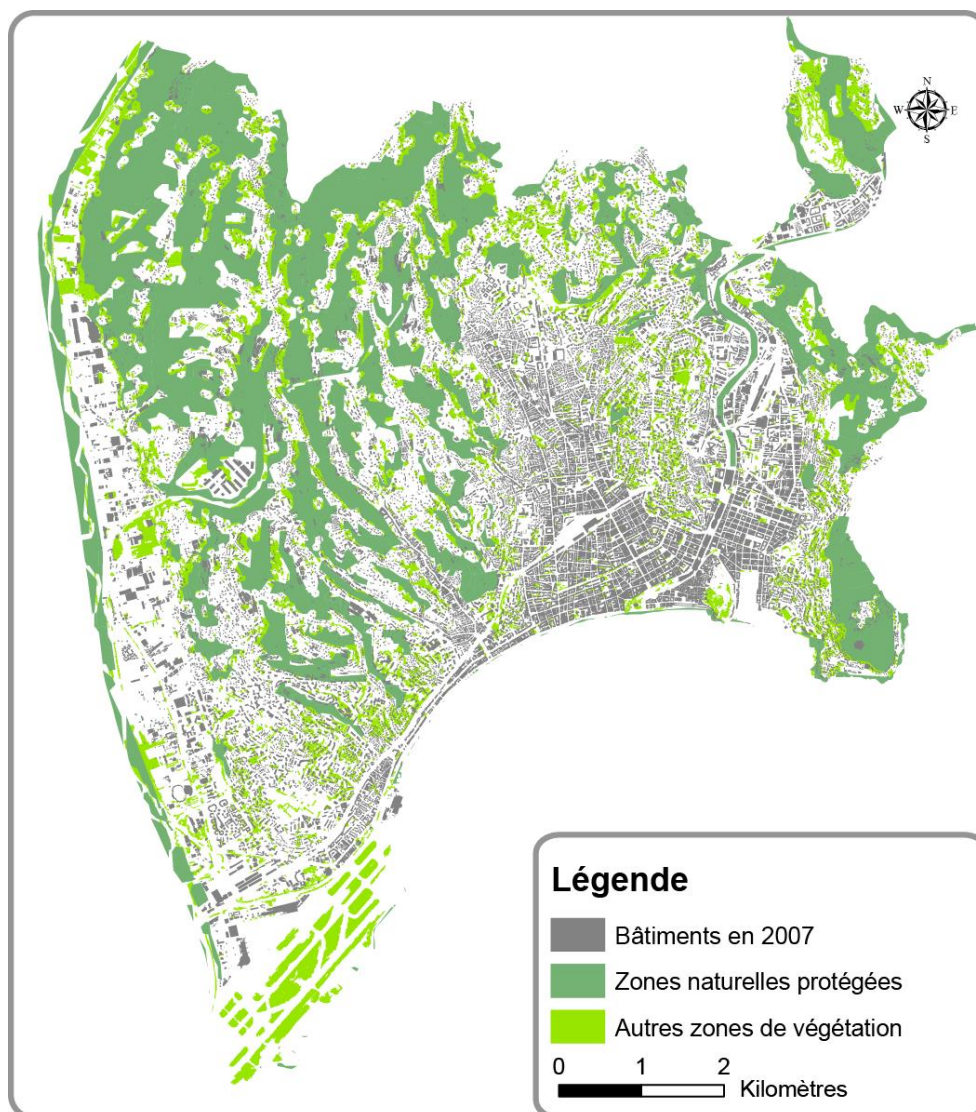


Figure 96 : Localisation des espaces naturels protégés sur la Ville de Nice d'après les données de l'INPN, 2011 et de l'IGN, 2007 (Sevenet, 2013)

Ceci explique les plus fortes valeurs de l'indice que les IRIS de ces parties de la ville possèdent. La dichotomie entre le centre-ville très urbanisé et les espaces périphériques verdoyants est fortement marquée d'après la figure 97. De plus, un gradient est observable entre les deux couronnes périphériques correspondant à l'ancienneté de l'urbanisation.

La présence d'espaces naturels protégés marque la différence principale entre les IRIS. Les autres zones de végétation n'ont pas de poids suffisant. Les différents espaces protégés ont été identifiés dans la plaine du var et sur les collines du Nord et à l'Est aux frontières de la ville.

Les collines entourant le centre-ville sont donc le poumon vert de la ville, ce qui en fait une zone attractive pour les citoyens à la recherche de nature : les maisons individuelles avec jardins privatifs y sont nombreuses. Mais ces collines ne profitent pas uniquement à ceux qui y résident, elles participent également à la qualité paysagère des zones basses qui peuvent les observer.

L'indice calculé au niveau de la 1^{ère} typologie montre toujours ce gradient mais de manière plus marquée et il signale également des différences au sein des espaces périphériques. Ce niveau permet d'analyser plus finement l'importance des espaces verts au sein du territoire étudié. Ainsi, dans certains IRIS, notamment de la première couronne périphérique, les résultats de l'indice au niveau des types morphologiques révèlent plus de contrastes. Par exemple, l'IRIS de Lingostière-Saint Isidore à l'ouest de la ville, possède un indice de 1,13 qui correspond à une bonne représentativité des espaces végétalisés au sein de l'IRIS mais au niveau des types morphologiques, l'indice varie de 0 à 2,5 (figure 97 et figure 98).

La fragmentation des espaces verts en milieu urbain nécessite également un maillage plus fin du territoire que celui de l'IRIS. De ce fait, l'analyse de l'indice de végétalisation, nous semble plus pertinente à réaliser au niveau de la typo-morphologie.

Concernant la 2^{ème} typologie, l'indice montre une très forte sur-représentation des espaces végétalisés sur les grandes zones issues de la typologie tels que les collines et le centre-ville et une très faible sous-représentation des petites zones disséminées sur le territoire (figure 98).

Cet indice n'est pas adapté à cette typologie à moins de le pondérer à la superficie des zones.

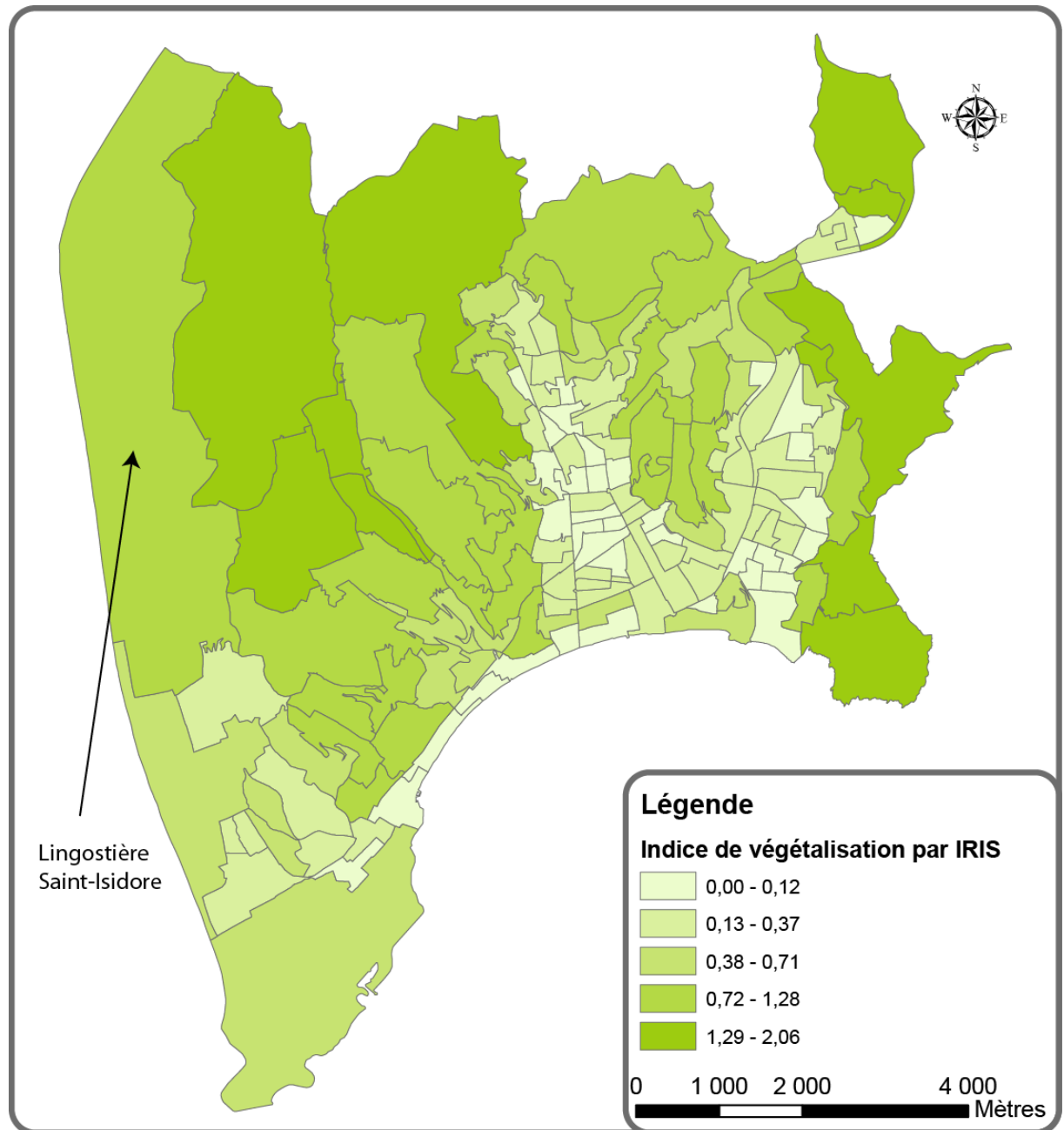


Figure 97 : Indice de végétalisation des IRIS de la Ville de Nice d'après les données de l'IPN, 2008 et l'INSEE, 2007 (Sevenet, 2013)

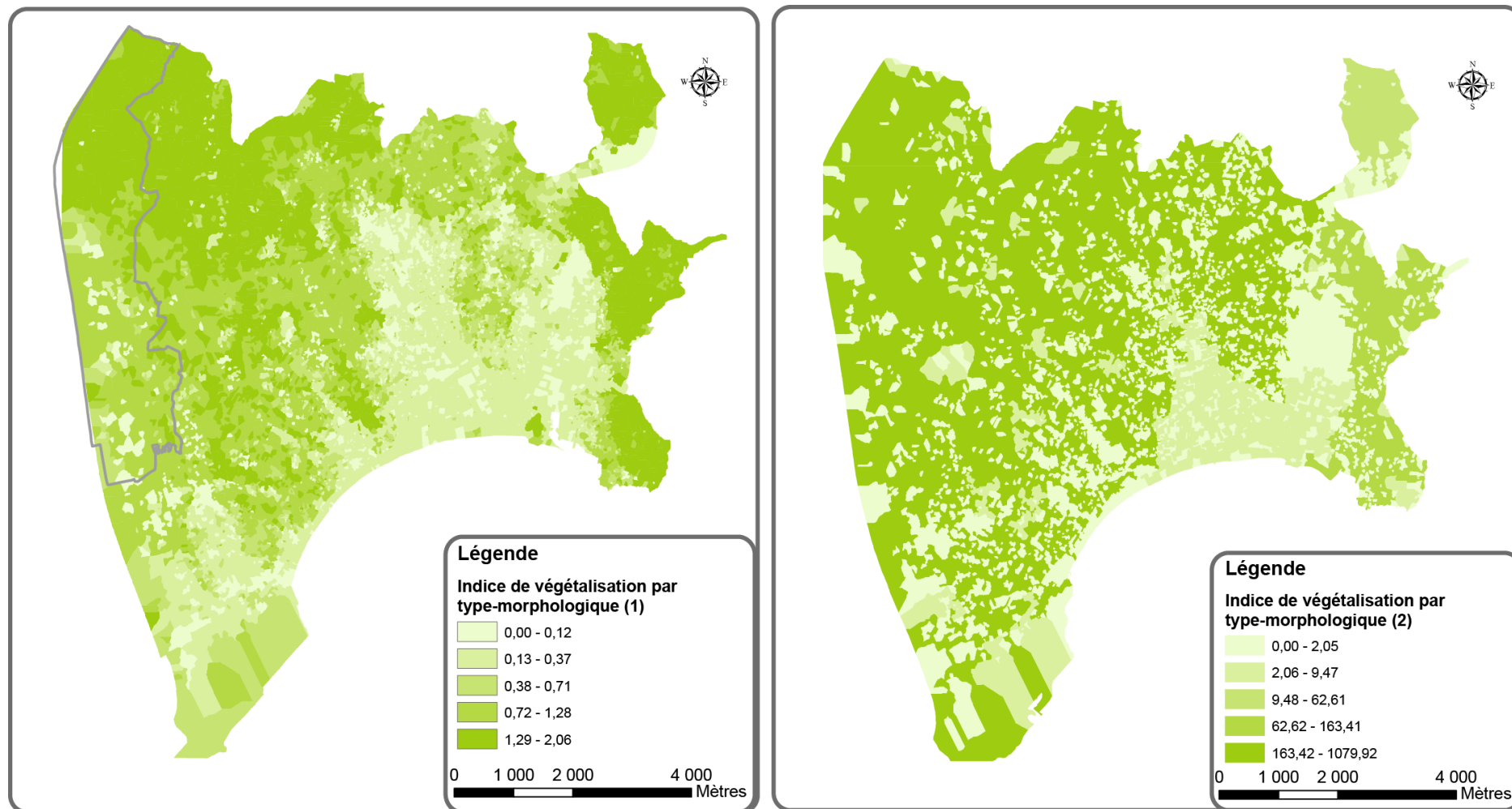


Figure 98 : Indice de végétalisation pour les types morphologiques de la Ville de Nice d'après les données de l'IPN, 2008 et l'INSEE, 2007 (Sevenet, 2013)

Le surpeuplement évalue l'adéquation entre la densité de population réelle et théorique qui peut être attribuée à une unité spatiale. D'après la figure 99, trois groupes se distinguent.

Les grands ensembles de l'Est, du Nord et du Nord-Ouest présentent les indices les plus élevés. Même si la densité bâtie est relativement peu élevée, les logements de ces IRIS accueillent des familles avec enfants. En effet, plus de 70% des ménages de ces IRIS sont des couples ou des familles monoparentales avec enfants.

De même, l'indice des IRIS des collines de la première couronne périurbaine est élevé par rapport au centre-ville ou aux collines de l'Est. Ces collines caractérisées par un bâti de type maison individuelle sont également occupées par des ménages en couple avec des enfants : plus de 50% des ménages de ces IRIS sont des couples avec enfants.

A l'inverse, les IRIS dont l'indice est le plus faible correspondent à des bâtiments dont la surface développée est importante mais dont les ménages sont constitués d'une ou deux personnes.

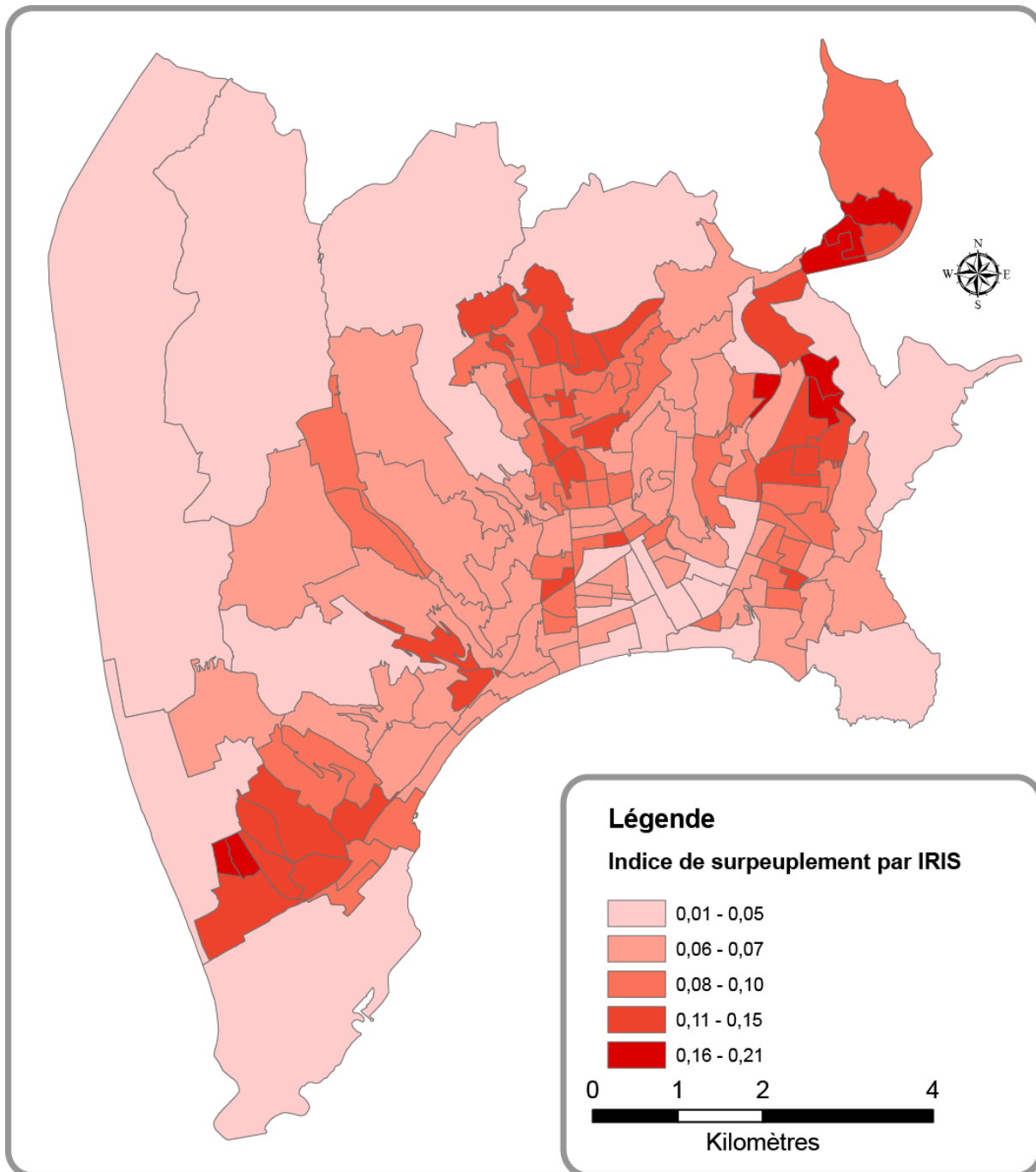
Pourtant, le nombre total de pièces par IRIS est à peu près équivalent. Par exemple, le tableau 31 permet de comparer des exemples des deux groupes de peuplement. La localisation des IRIS cités est en ANNEXE E.

« Sur-peuplé »			« Sous-peuplé »		
IRIS	Nombre de pièces	Indice	IRIS	Nombre de pièces	Indice
La planas – La vallière	3241	0,12	France – Negresco	3248	0,03
Ariane les chênes	2336	0,21	Liberti Albert 1^{er}	2150	0,02
Les Moulins	4953	0,2	Musiciens	5323	0,04

Tableau 31 : Comparaison du nombre de pièces par IRIS en fonction du peuplement (Sevenet, 2013)

L'analyse effectuée sur les indices calculés sur la 1^{ère} typo-morphologie est à peu près similaire (figure 100). Cependant, quatre groupes au lieu de trois se distinguent. De plus, un gradient se forme surtout avec la 1^{ère} depuis les fortes zones de peuplement – autour des grands ensembles -, et les zones de faibles peuplements – les collines. Les zones « sur-peuplées » sont localisées au niveau des grands ensembles autour desquels l'indice décroît au fur à mesure que l'on s'éloigne. La dichotomie centre/périphérie est davantage mise en relief puisque l'indice est plus fort au centre-ville que sur la périphérie pour une distance égale aux grands ensembles.

La 2^{ème} typologie met en relief plus particulièrement les zones de grands ensembles. La taille des zones collinaires et celle du centre-ville sont trop importantes et lissent le résultat de l'indice (figure 100).



**Figure 99 : Indice de surpeuplement des IRIS de la Ville de Nice
d'après les données INSEE, 2007 (Sevenet, 2013)**

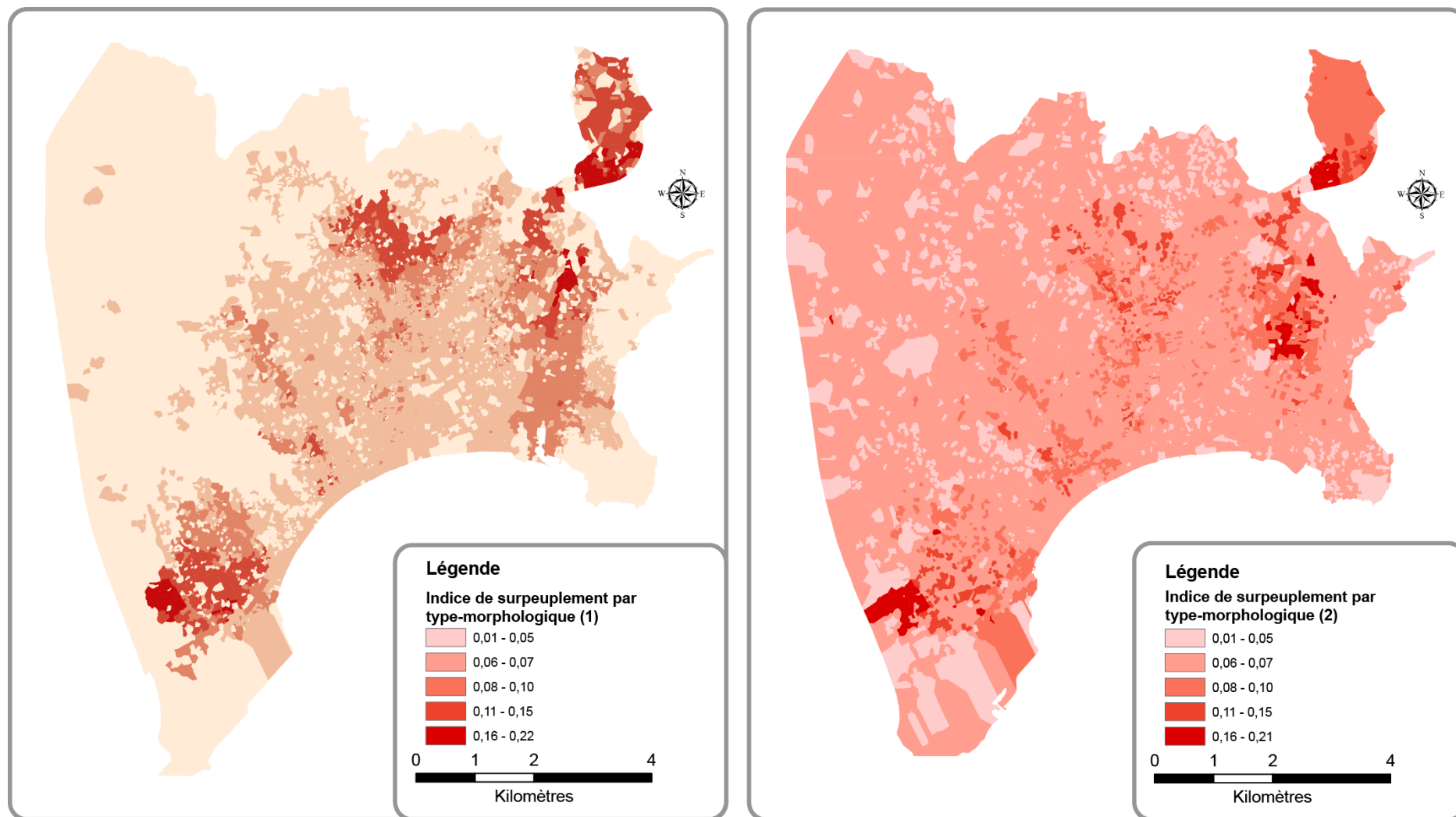


Figure 100 : Indice de surpeuplement des types-morphologiques de la Ville de Nice d'après les données INSEE, 2007 (Sevenet, 2013)

Cet indice a été développé afin d'analyser la forme urbaine des IRIS car ils ne sont pas définis au regard de critères morphologiques. La figure 101 représente les résultats de l'indice de compacité, obtenus par IRIS. Dans l'ensemble, la Ville de Nice est peu dense, compacte et homogène. Seuls quelques IRIS du centre-ville ont les indices les plus élevés.

Cet indice indique que les formes urbaines de la Ville de Nice ne correspondent pas aux préconisations d'un développement urbain durable.

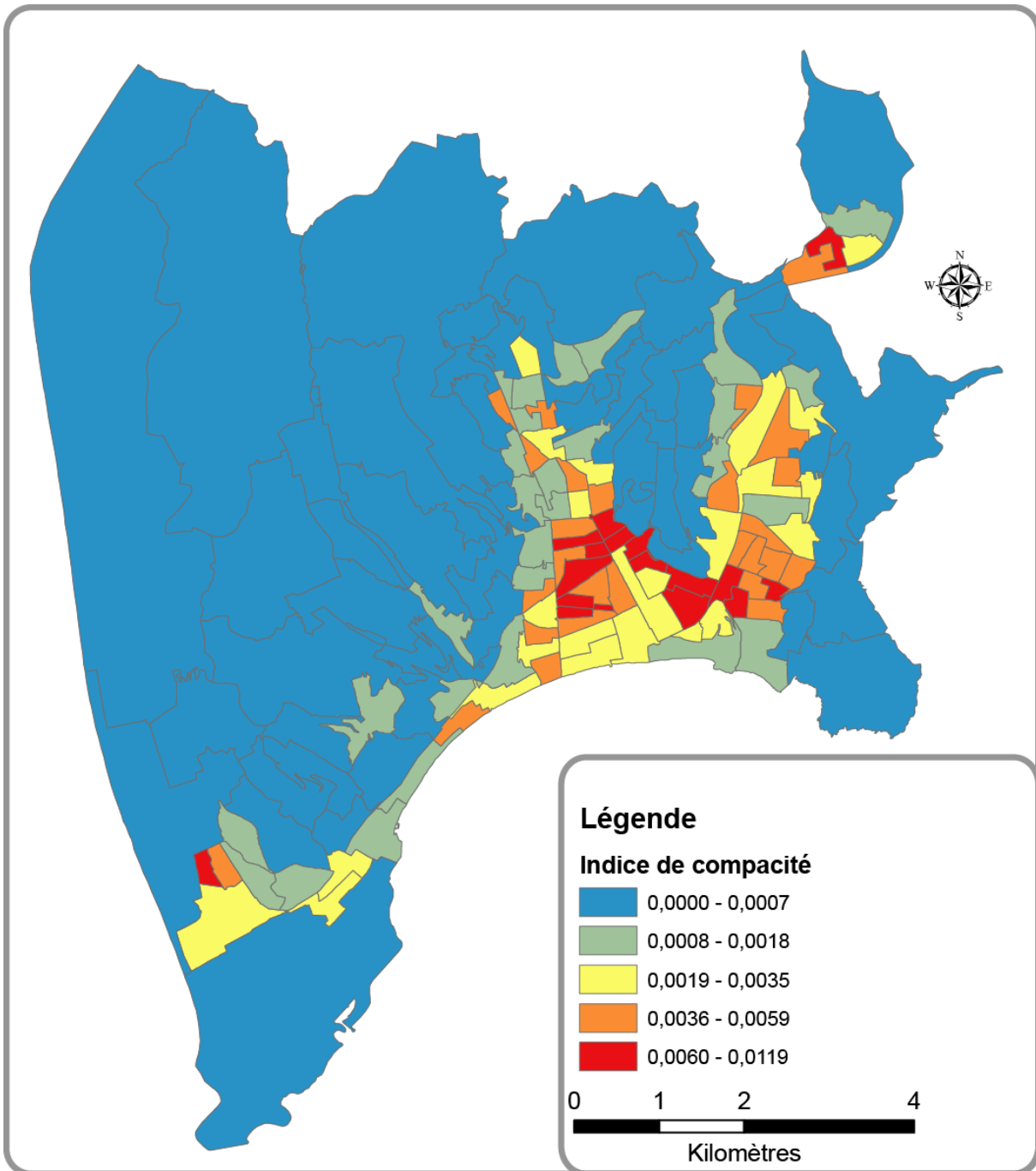


Figure 101 : Indice de compacité 3D des IRIS de la Ville de Nice (Sevenet, 2013)

D'après la figure 102, globalement, les activités niçoises sont concentrées dans les zones basses de la ville. Ces zones bénéficient d'une bonne accessibilité et sont donc propices à l'installation des activités économiques.

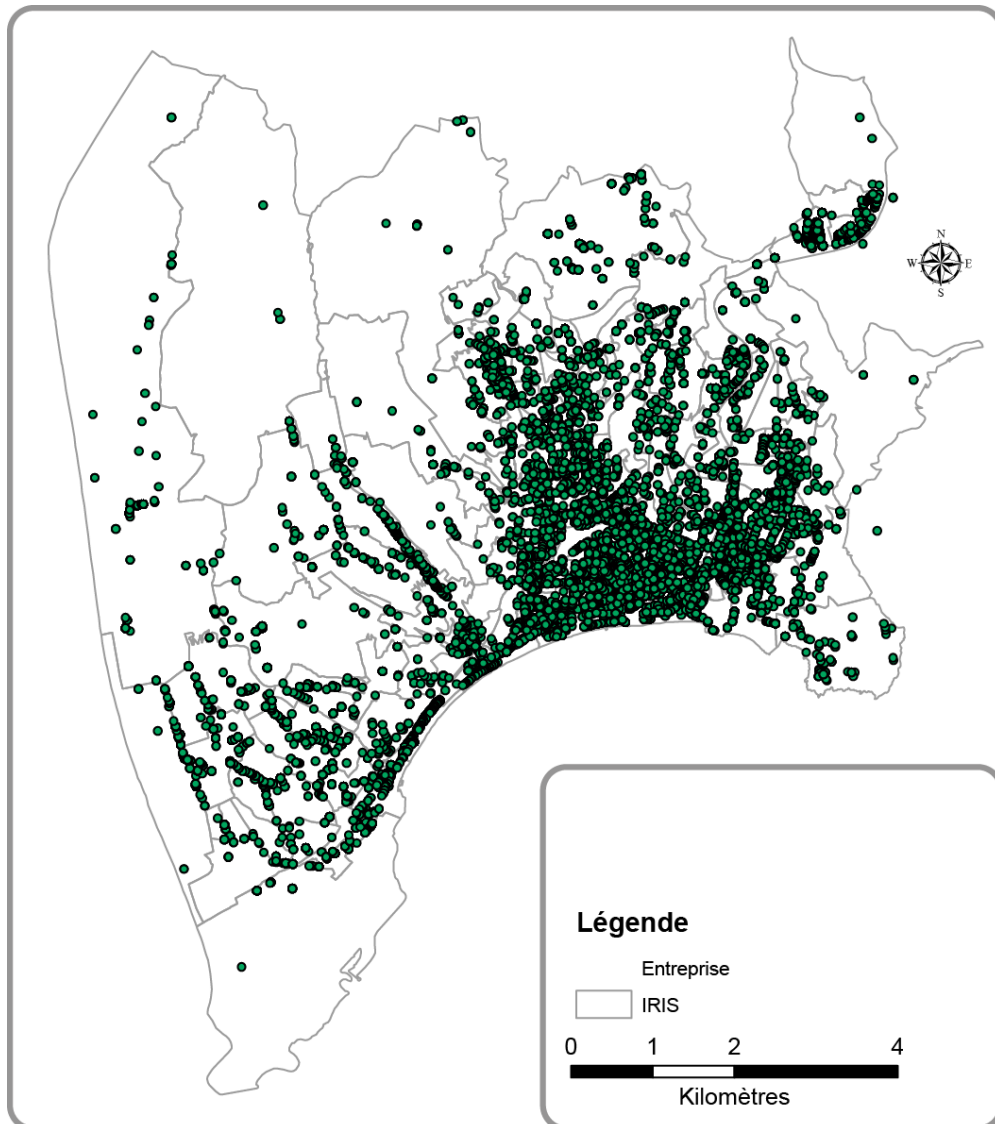


Figure 102 : Localisation des entreprises de Nice d'après les données de SIRENE de l'INSEE, 2008 (Sevenet, 2013)

Cependant, au-delà de la simple présence du nombre d'activités, les préconisations pour un développement durable du territoire soulignent l'importance de la diversité des activités au sein d'un espace. La comparaison des deux cartes (figure 102 et figure 103) indique que présence d'activités ne signifie pas nécessairement diversité de l'offre.

Dans cette optique, les IRIS présentant une diversité des entreprises sont localisés essentiellement dans la plaine du Var et autour de l'avenue Jean Médecin car leur indice respectif est proche de 1. Le reste du territoire est plutôt spécialisé ou ne possède que très peu d'activités.

L'analyse de la diversité des entreprises à l'échelle du découpage spatial de la typologie signale un gradient de diversité des activités, du centre vers la périphérie, mais une diversification très faible sur l'ensemble de la ville, l'indice est proche de 0.

L'utilisation de ce découpage permet de limiter l'effet de taille de certains IRIS tels que Lingostière-Saint-Isidore. En effet, la superficie de cet IRIS est très grande et les activités sont éparses mais dans des secteurs différents. Ainsi, l'indice calculé est important à l'échelle de l'IRIS et faible à l'échelle des types morphologiques.

A l'inverse, les IRIS du centre-ville sont petits et possèdent une forte concentration d'activités plutôt spécialisées, tandis que les types morphologiques sont homogènes et ont créé un découpage large. De ce fait, l'indice est donc plutôt faible au niveau des IRIS et plutôt fort au niveau du type.

En ce qui concerne les activités, ni le découpage par IRIS, ni le découpage par type ne répond au besoin de l'analyse de la diversité économique car cette dernière possède une logique spatiale différente. Néanmoins, il permet de donner une information utile dans le cadre de la planification urbaine, notamment dans la comparaison avec les lieux de peuplement et ceux des activités.

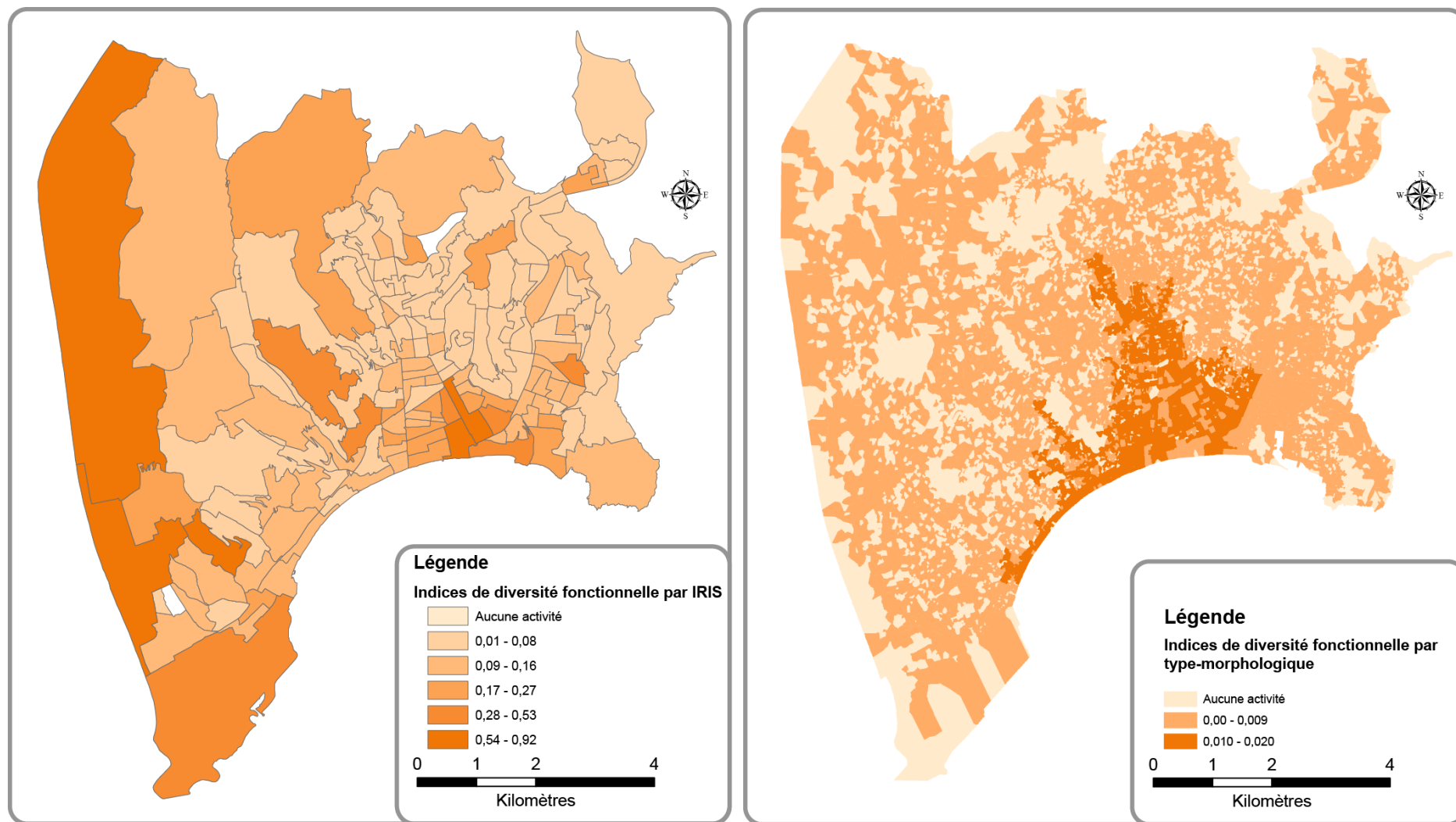


Figure 103 : Indice de diversité sectorielle des IRIS de la Ville de Nice d'après les données INSEE, 2007 (Sevenet, 2013)

Le transport est une des composantes souvent associées à la qualité de vie en milieu urbain. La part des actifs occupés travaillant dans la commune et celle de ceux qui se déplacent en transports en commun sont analysées.

La Ville de Nice est un centre et par conséquent le nombre d'actifs travaillant dans la commune est important, près de 77%. Par contre, moins de 20% des actifs se déplacent en transports en commun (TC). Si les actifs travaillent en majeure partie dans la commune, les distances parcourues sont courtes et le transport public est géré par une seule société. Pourtant les actifs ne font pas le choix d'utiliser les transports en commun. Cela relève sans doute d'une inadéquation de l'offre sur le territoire, notamment dans les collines. La figure 104 indique clairement que l'indice de l'ensemble des IRIS situés sur les collines est compris entre 0 et 10% d'actifs utilisant les TC.

En outre, les IRIS dont les actifs occupés se déplacent le plus en TC, soit entre 30 et 40% des actifs) sont également ceux dont les actifs travaillent pour plus de 80% d'entre eux dans la commune. Il convient donc de s'interroger sur la prégnance de l'automobile.

Parallèlement, un des principes du développement durable urbain est de proposer la diversification des activités et donc de l'offre, afin de limiter les déplacements domicile-travail. Pourtant, d'après l'exemple niçois, il semble que ces deux éléments n'aillent pas de pair. En effet, pour l'IRIS de Lingostière-Saint-Isidore, un des IRIS ayant le plus fort taux de diversité sectorielle (figure 103), l'indice qui mesure la part d'actifs travaillant dans la commune est l'un des plus faibles. Même si le nombre d'activités dans cette zone est limitée (figure 102), il convient de s'interroger sur la pertinence d'une telle préconisation.

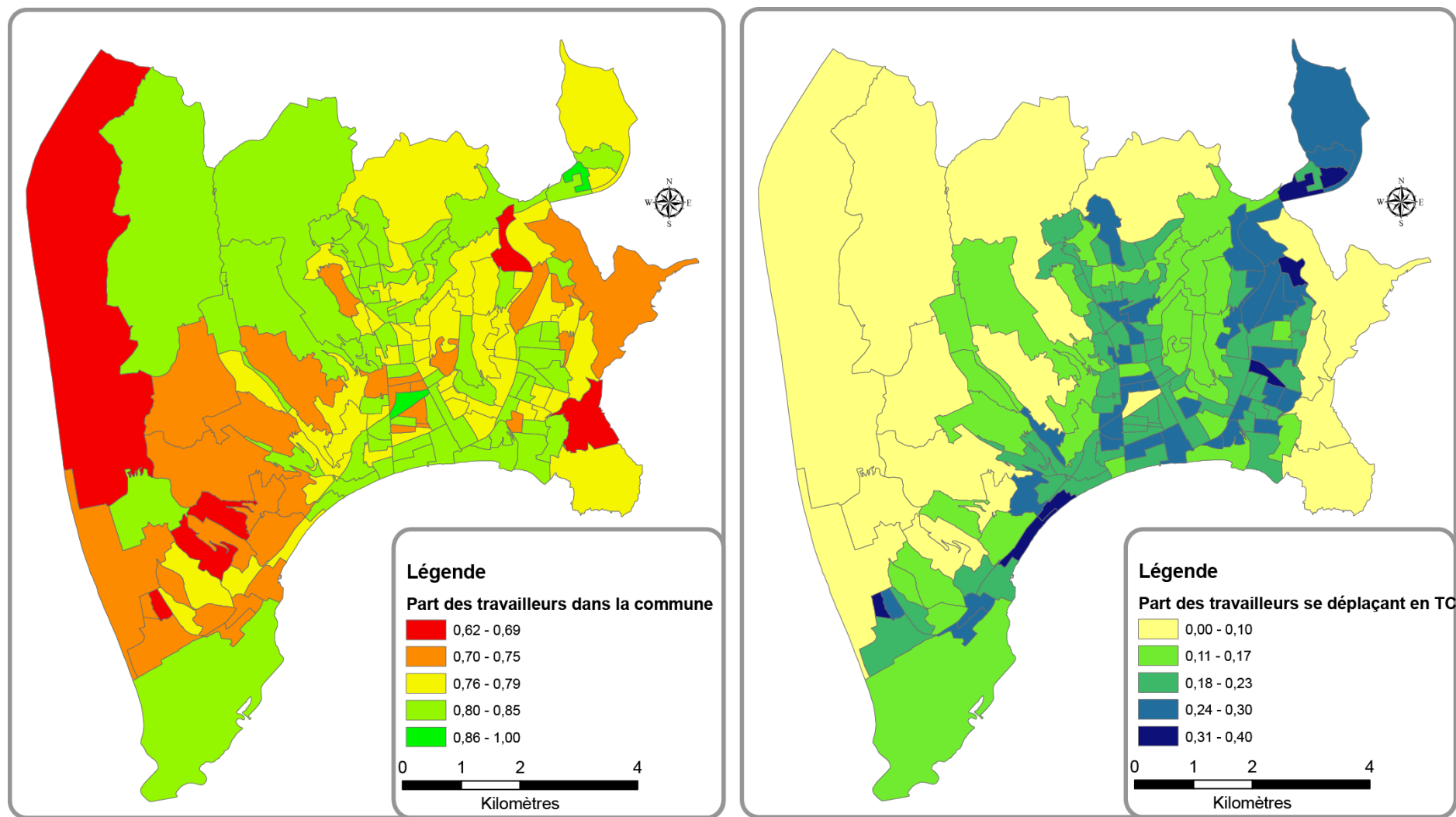


Figure 104 : Part des actifs résidant et travaillant dans la commune de Nice et celle de ceux qui se déplacent en TC par IRIS d'après les données INSEE, 2007 (Sevenet, 2013).

La composante sociale des IRIS joue effectivement un rôle similaire pour la durabilité du territoire, quel que soit l'indice estimé. La mixité intergénérationnelle et la mixité sociale ont un comportement similaire en fonction des IRIS. En effet, le coefficient de corrélation entre les deux composantes est de 0,57. Les IRIS dont la population est jeune correspondent à ceux qui accueillent une grande partie des logements HLM comme La Digue de Français, les Moulins et Ariane-Les Chênes. Inversement, les IRIS dont la population est âgée sont les mêmes que ceux qui manquent de logements HLM, par exemple Thiers-Durante, l'Abbaye de Roseland et Saint-Barthélémy.

Les phénomènes de différenciation socio-spatiale sont particulièrement visibles grâce à l'indice de mixité sociale. Le manque de mixité sociale sur le territoire niçois est important, seuls 15% des IRIS accueillent suffisamment de logements sociaux. En outre, ce type de logements est sur-représenté dans ces IRIS.

Par ailleurs, il est intéressant de noter que les IRIS les plus peuplés correspondent également aux IRIS dont le nombre de logements HLM est sur-représenté. Le coefficient de corrélation de ces deux variables est d'ailleurs de 0,59.

Hormis cet indice, les deux autres présentent plus de diversité. Des IRIS ont une population plus jeune ou plus âgée qu'ils ne devraient mais la plupart ne présentent pas de sur ou sous-représentation d'une des deux classes d'âge.

Parallèlement, l'écart interdécile de revenu n'est pas très fort puisque le rapport entre les revenus les plus élevés et les plus faibles ne dépassent 3 ; en France, il est de 3,5. Les différences entre les IRIS sont, de plus, assez faibles.

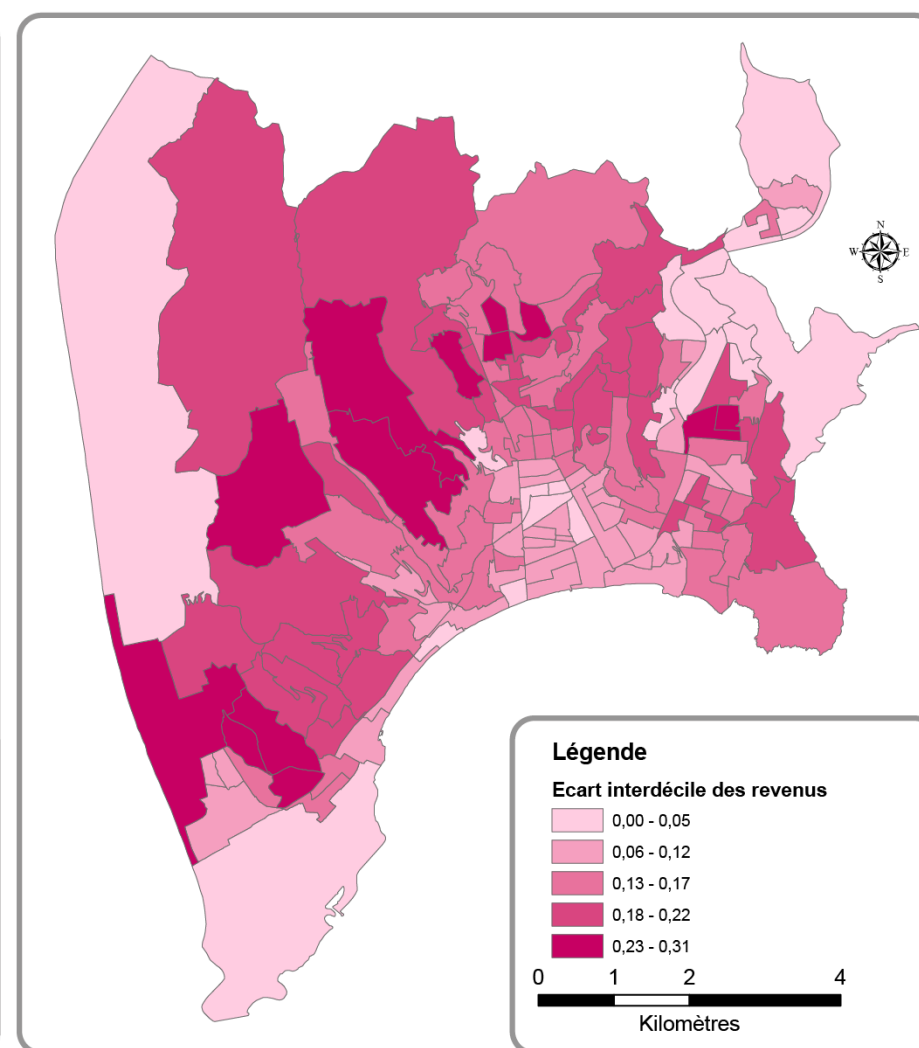
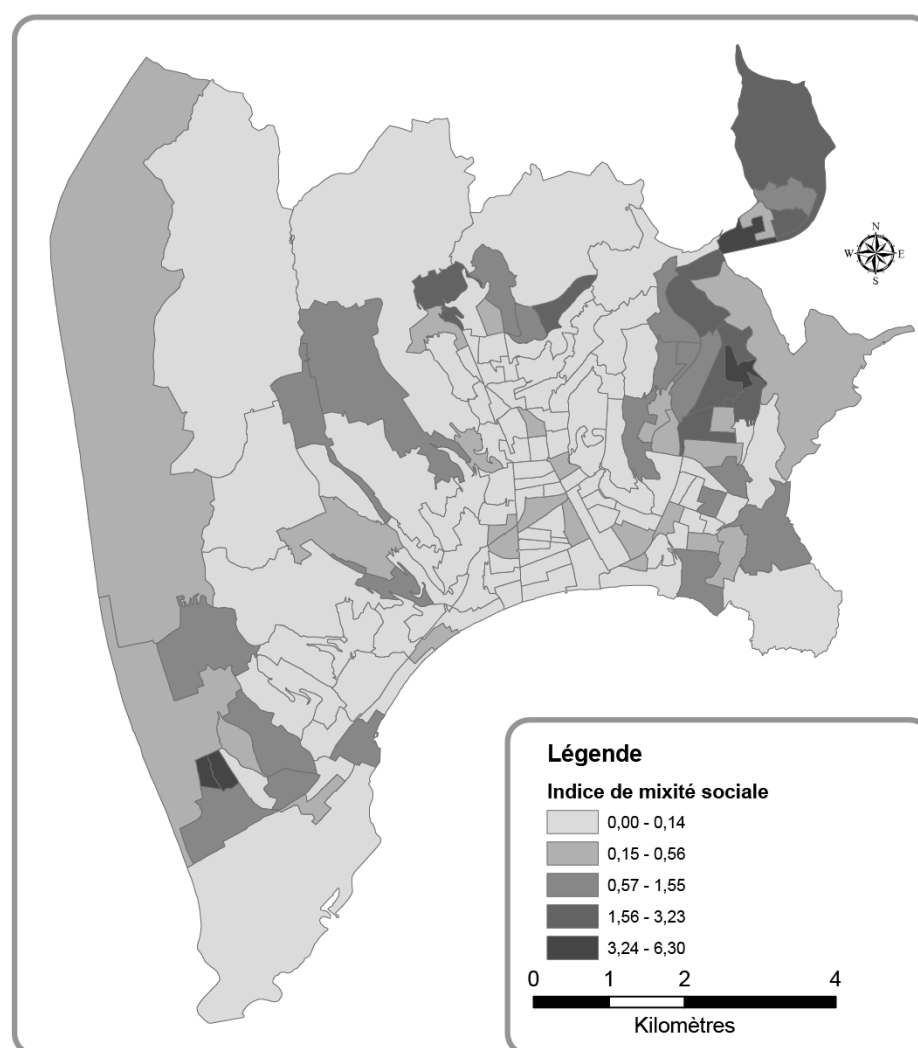
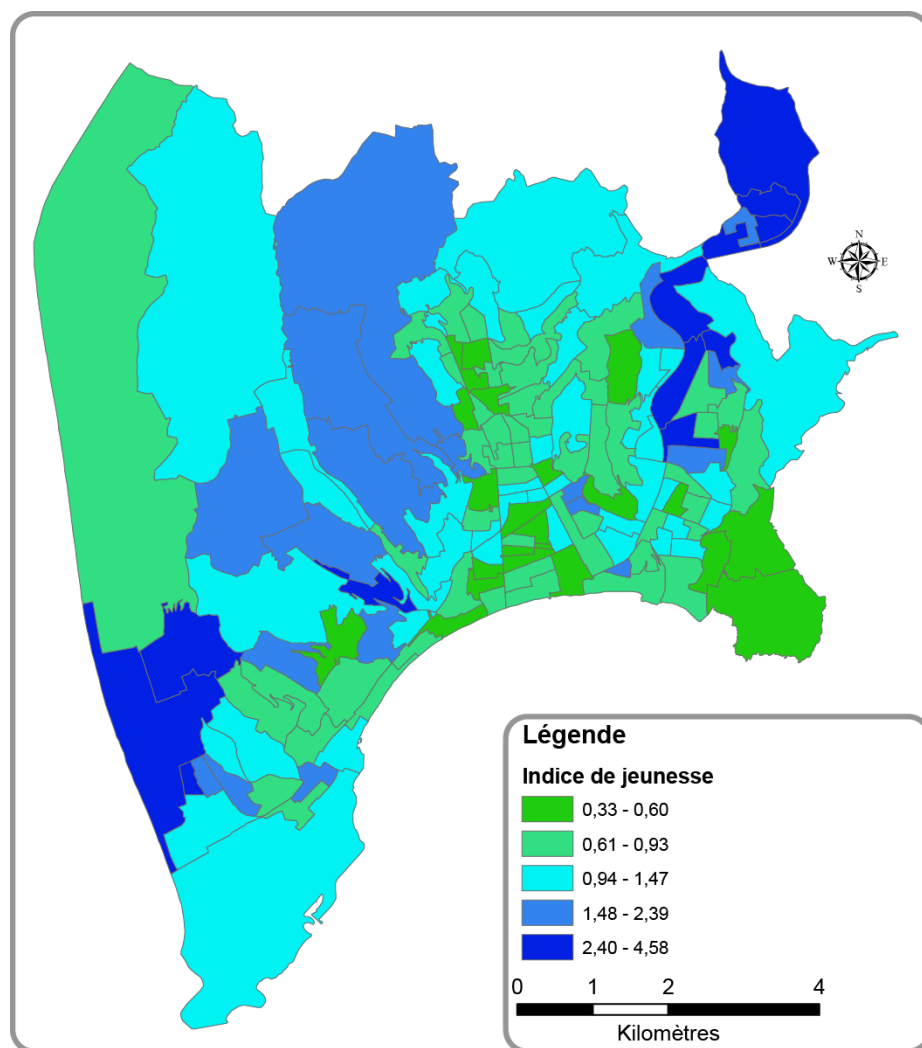


Figure 105 : Indice de mixité sociale des IRIS de la Ville de Nice d'après les données INSEE, 2007 (Sevenet, 2013)

La Ville de Nice, étant située dans le sud de la France, elle bénéficie d'un bon ensoleillement, 1500-1600 kWh/m² selon GeoModel Solar s.r.o.*. Il apparaît que l'analyse du potentiel de l'électricité par panneaux photovoltaïques présente un intérêt important d'un point de vue économique et environnemental.

L'indice ne permet pas d'analyser la situation de la ville en ce qui concerne le niveau d'équipement mais fournit un potentiel pour le développement de cette énergie renouvelable. En d'autres termes, son analyse permet de proposer des recommandations mais pas d'analyser la durabilité de la zone d'étude à un temps donné.

La figure 106 nous indique que la majorité des IRIS de Nice peuvent fournir beaucoup plus que le seuil de 1200 kWh/ habitants. Seuls quelques IRIS en zone de plaine dans des zones d'ombres ne peuvent fournir la production recommandée : Nice-Nord-Saqui, Gravier, Henry Dunant, Gorbella, Canavese, Pierre Senard, Pasteur, Cessole, Grosso, Chateauneuf, Les Moulins, Digue des Français et Riquier-Fontaine de la Ville. Ces zones se situent toutes dans des parties encaissées de la ville où le peuplement est assez important (figure 100).

L'analyse par types morphologiques présente davantage de nuances.

A part pour les IRIS Les Moulins et Digue des Français, les résultats de l'indice par type morphologique sont différenciés. Les effets de masque entre bâtiments sont plus marqués et expliquent les résultats obtenus.

D'autre part, les différenciations observées entre les types morphologiques à l'intérieur d'IRIS favorables au potentiel, s'expliquent par l'absence de bâtiment résidentiel. Les différenciations spatiales sont plus visibles grâce à la typologie mais elles s'expliquent essentiellement par l'absence de population résidente de ces zones.

Ces deux niveaux d'analyse sont donc importants et complémentaires, ils fournissent différents types d'informations.

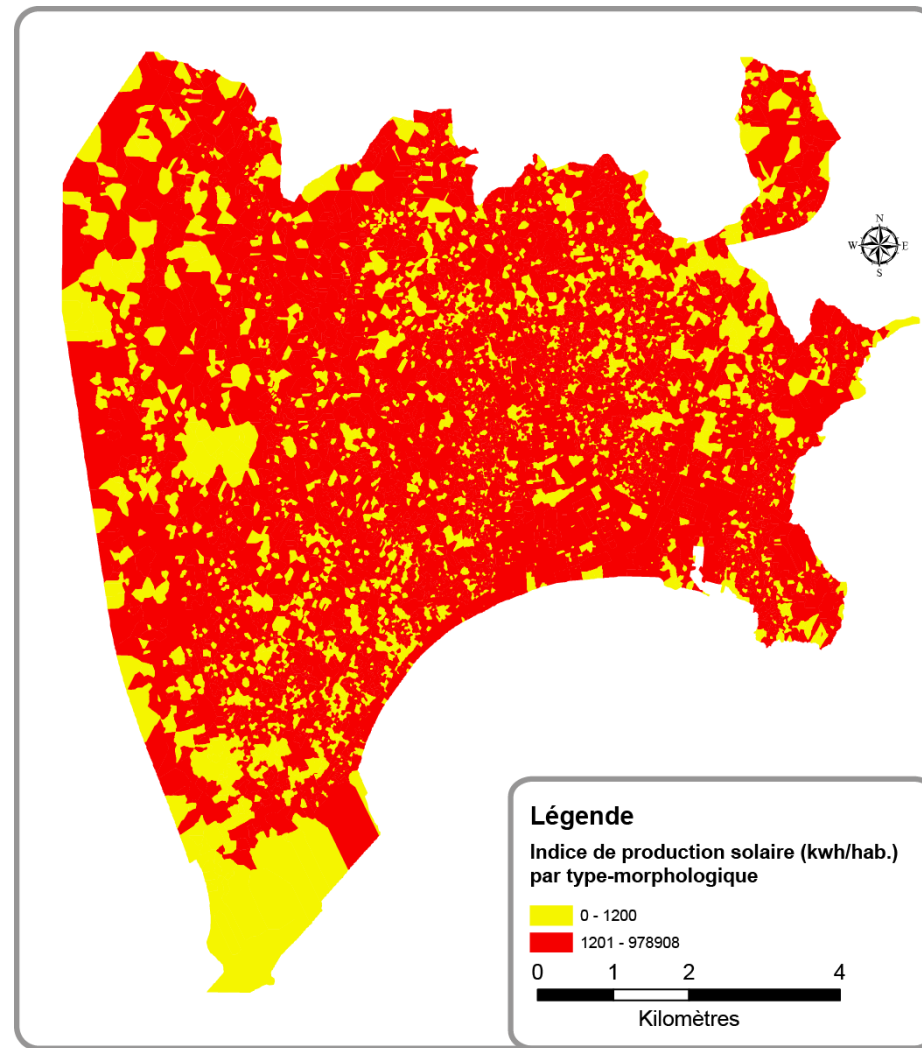
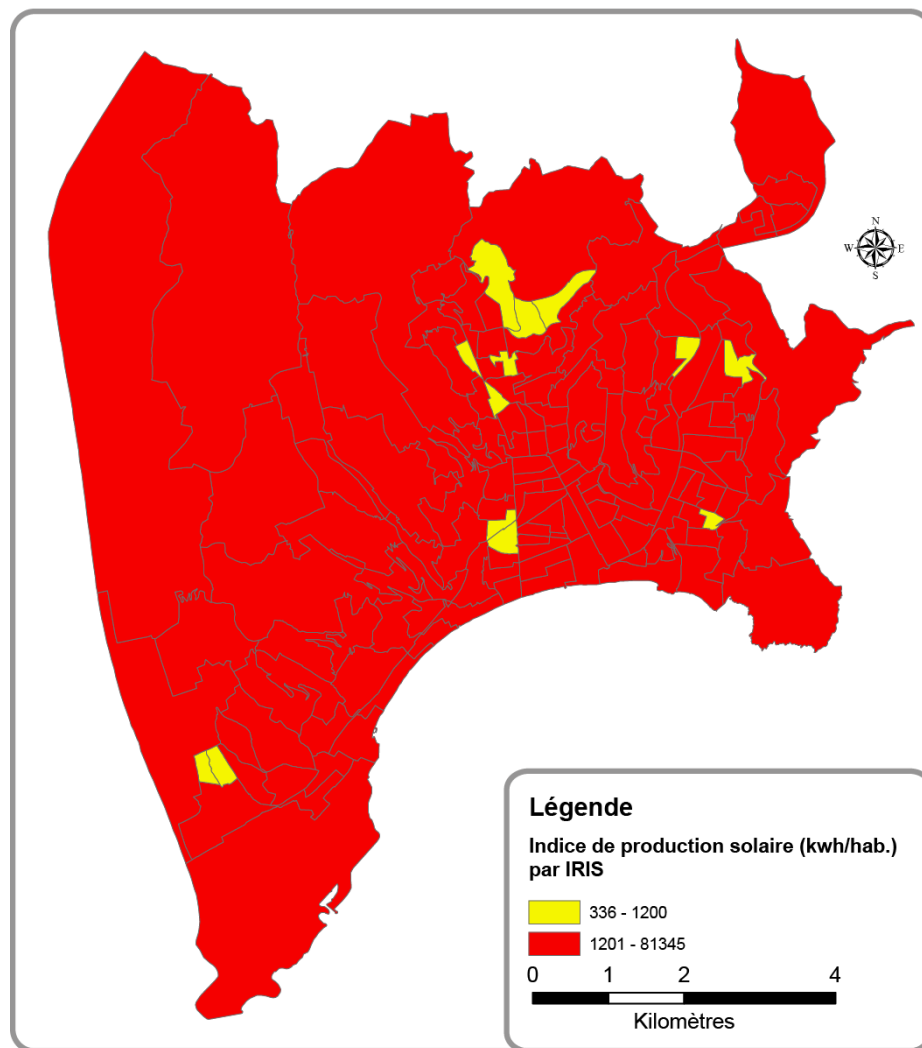


Figure 106 : Indicateur de production solaire par habitant de la Ville de Nice (Sevenet, 2013)

Cette présente analyse montre le poids des découpages spatiaux dans le calcul d'indices. Les résultats de l'analyse de variance indiquent que la typologie caractérisant la hauteur, la surface et l'espacement symbolise mieux les indicateurs de rugosité, de végétalisation et de surpeuplement. Par conséquent, la valeur des indices calculés à ce niveau est similaire à celle des IRIS.

Par contre, la deuxième typologie a créé des zones très disparates en taille et plus homogène sur le territoire. La valeur prise par les indices est très différente de celle des deux autres découpages.

L'analyse au niveau de l'IRIS vise à effectuer un premier diagnostic. Elle permet de prendre connaissance rapidement des potentialités et des faiblesses d'un territoire. De plus, la désagrégation de certaines variables à une échelle plus fine n'est pas pertinente. Par exemple, le calcul de la diversité économique doit être envisagé uniquement au niveau de l'IRIS voir de la ville car le nombre d'entreprises n'est pas suffisant à cette échelle. De ce fait, la proximité des résidences et des activités à une échelle micro ne peut se produire.

La reconnaissance et l'analyse des tissus visent, ensuite, à proposer des opérations ciblées sur le territoire ce qui n'est pas possible à l'échelle de l'IRIS. Intervenir sur un tissu permet de conserver une cohérence paysagère et d'améliorer la qualité des espaces urbains.

Il est donc nécessaire d'articuler ces niveaux pour une prise de décision cohérente.

4. Dynamique urbaine et durabilité : attractivité ou répulsivité

4.1. *Quelle dynamique du territoire niçois entre 1999 et 2007*

La figure 107 indique la dynamique urbaine de la Ville de Nice en termes de nombre et de superficie bâtie. Les deux premières cartes confirment les résultats obtenus dans les paragraphes 1.2 et 1.3 du chapitre précédent. Les IRIS bénéficiant d'une croissance du nombre de bâtiments se situent principalement en périphérie et plus particulièrement dans la partie Nord et Ouest de la ville (plus de 50 nouveaux bâtiments entre 1999 et 2007). Principales réserves foncières de la commune, les collines sont donc en cours d'urbanisation. L'opposition entre centre et périphérie est évidente sur la deuxième carte : le centre et la première couronne stagne ou se déconstruit au profit de la périphérie.

Le problème de l'unité spatiale est ici soulevé, car le périmètre d'un IRIS est fonction du nombre d'habitants (soit 2000)*. Par conséquent, les IRIS de la périphérie de Nice sont beaucoup plus grands que ceux du centre-ville. Cela étant, l'évolution de la densité de bâtiments par IRIS montre la même dynamique, mais de manière plus nuancée.

Au regard de l'évolution de la part des surfaces bâties, l'intensité de l'urbanisation semble moins forte en périphérie. Seule la couronne qui entoure la partie la plus anciennement urbanisée semble être la plus dynamique, en perte ou en gain.

Rappelons que ces IRIS subissant de grandes transformations sont à considérer comme des espaces à enjeux pour la ville. Il s'agit de comprendre pourquoi ils se différencient des autres. La figure 107 représente les dynamiques urbaines grâce à différentes variables : le nombre de bâtiments construits et la densité bâtie.

Nous observons une fois de plus que les constructions nouvelles se localisent essentiellement en périphérie de la ville, le centre-ville dense reste stable tandis que la première couronne subit une déconstruction. Par contre, l'analyse de la densité bâtie indique que la périphérie est plutôt stable, voire en légère augmentation et que le centre-ville est stable ou se desserre un peu. Par contre, les dynamiques dans la première couronne sont beaucoup plus contrastées dans la mesure où elle renferme les IRIS connaissant le maximum de croissance ou de décroissance.

Les processus d'interactions spatiales évoquées dans le chapitre 1 prennent sens dans ce chapitre. Les processus d'attractivité et de répulsivité, autrement dit de différenciation spatiale, peuvent expliquer les transformations territoriales. En effet, la dimension représentative des espaces et de leur qualité est extrêmement déterminante dans les comportements qui induisent les choix résidentiels. Par conséquent, la suite de l'analyse s'appuie sur les IRIS dont la surface urbanisée a perdu ou a gagné plus de 15 % de sa taille. Il s'agit maintenant d'analyser la durabilité sous l'angle morphologique de ces zones et de voir si leurs caractéristiques ont pu jouer un rôle majeur dans leur dynamique.

En 2008, une retouche très partielle du découpage est intervenue pour prendre en compte les évolutions importantes de la voirie et de la démographie. Cette retouche a été limitée à une centaine d'IRIS afin de préserver la continuité des séries de diffusion. (INSEE)

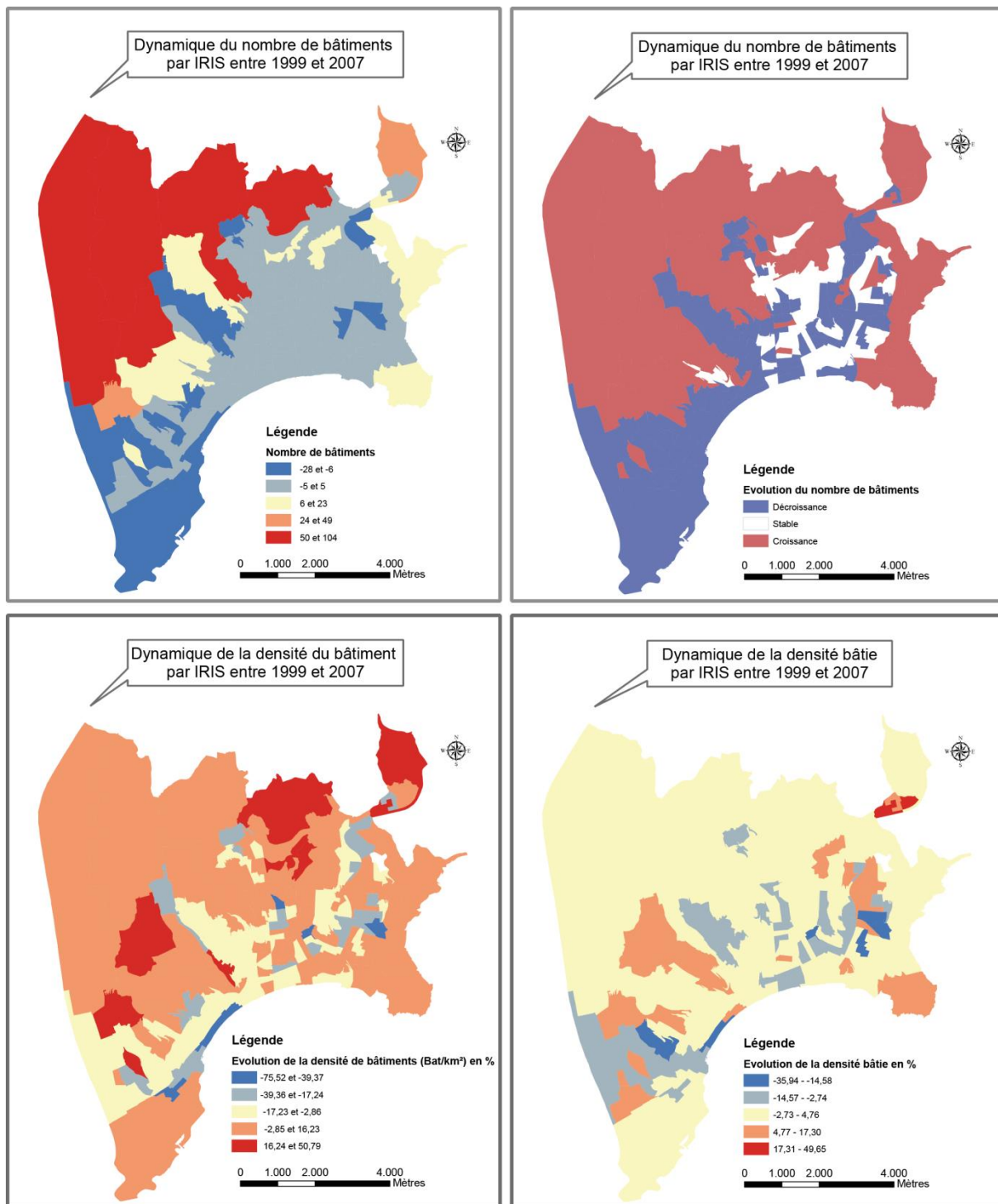


Figure 107 : Dynamique du bâti niçois entre 1999 et 2007 par IRIS (Sevenet, 2013)

4.2. *Quelle durabilité pour ces zones en transformations ?*

L'analyse s'est concentrée sur les zones ayant connu le plus de modifications pour tenter de comprendre les raisons qui peuvent expliquer ce changement du point de vue de la durabilité. Le tableau 32 et le tableau 33 synthétisent les résultats de tous les indices pour les espaces sur lesquels nous réalisons le focus.

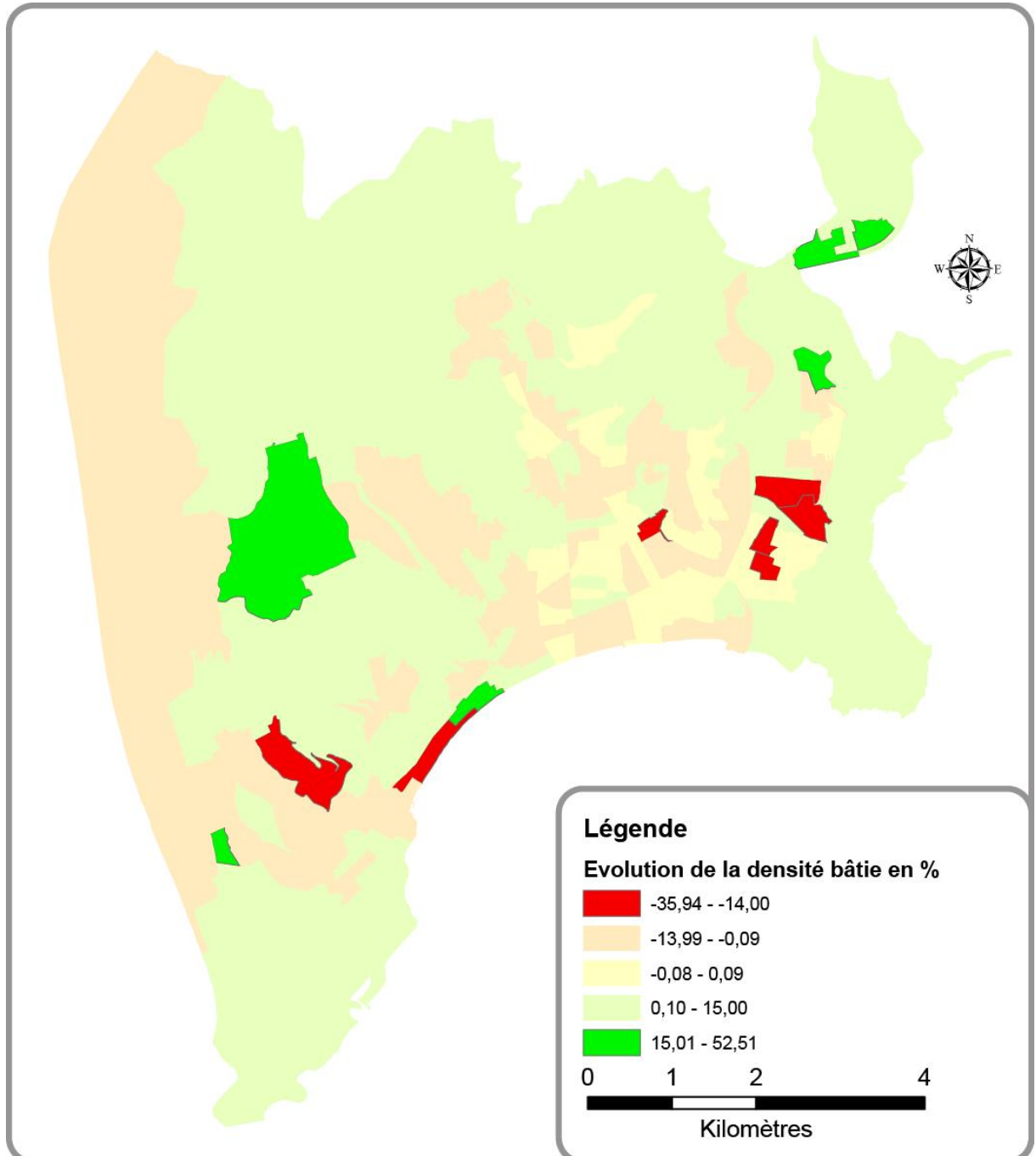


Figure 108 : Localisation des IRIS qui ont connu une évolution significative de leur bâti entre 1999 et 2007 (Sevenet, 2013).

Globalement, les indices de rugosité des IRIS attractifs sont inférieurs à ceux des IRIS répulsifs. Les IRIS TNL-Beaumont et Barla, notamment, possèdent une zone bâtie morphologiquement peu propice à la circulation des fluides. En effet, leurs indices sont tous deux supérieurs à 0.6. A l'inverse, les indices des IRIS Saint-Antoine Ginestière, Ariane-Ripert, Ariane-Les Chênes et Mont-Gros sont proches de 0, indiquant que la morphologie est propice à la circulation des fluides.

Cependant, dans les deux types de zones analysées, l'indice de compacité se révèle très faible puisqu'il est proche de 0. Ces IRIS peuvent être considérés comme peu denses, peu compacts et hétérogènes. *De facto*, le peuplement des bâtiments coïncide avec la législation et ces IRIS ont tendance à être sous-peuplés. Néanmoins, les IRIS attractifs présentent des indices de peuplement plus faibles que les IRIS répulsifs, ils sont donc bien plus sous-peuplés que ces derniers.

Paradoxalement, la présence d'espaces verts n'est pas notable dans ces espaces. La faible compacité de ces IRIS n'est pas compensée par une forte végétalisation de leur territoire. En effet, l'indice de végétalisation est inférieur à 1 pour la plupart des IRIS. Toutefois, deux IRIS attractifs possèdent un indice supérieur à 1. Plus généralement, les IRIS attractifs bénéficient de valeurs d'indice plus élevées.

La faible représentation des espaces verts dans ces IRIS laisse penser à la présence d'infrastructure ou d'autres activités. Même si l'activité est bien présente dans ces IRIS, sa diversité est faible et ce quel que soit le type d'IRIS.

En parallèle, une autre composante de la qualité de vie qui participe également à la densité urbaine a été analysée : la distance domicile-travail. La distance n'a pas été mesurée en tant que telle puisque que nous nous sommes appuyée sur la part des actifs travaillant dans la commune. Globalement, la population active occupée, quel que soit l'IRIS, travaille en majorité à l'intérieur de la commune de résidence (plus de 70% pour la plupart de ces IRIS). Ces chiffres sont équivalents à la moyenne de la ville qui est de 77%). Il faut tout de même noter que les IRIS attractifs possèdent des indices plus élevés (83%) que ceux des IRIS répulsifs (80%). Cependant, l'indice ne présente pas de différence majeure par rapport au reste des IRIS. En revanche, la part d'actifs se déplaçant en TC diffère dans les deux groupes. Même si cette part est faible dans tous les cas, les actifs des IRIS répulsifs ne se déplacent que très peu avec les TC tandis que les actifs des IRIS attractifs font partie de ceux qui se déplacent le plus avec ce moyens de locomotion.

La diversité sociale est souvent avancée pour expliquer le niveau d'attractivité d'un espace. Pour mesurer son effet, l'indice de mixité sociale et l'écart interdécile du revenu ont été calculés.

Les résultats montrent que les IRIS attractifs n'ont pas de profil particulier sur ce thème puisque l'indice de mixité sociale indique soit une sous-représentation des HLM (Lenval et Saint-Antoine Ginestière) soit une sur-représentation (Digue des Français, Ariane-Ripert et

Ariane-Les Chênes). En outre, quel que soit l'IRIS attractif, les écarts de revenus sont assez faibles.

Parallèlement, les IRIS répulsifs présentent presque tous une sous-représentation des logements HLM, excepté l'IRIS des Diables Bleus qui possède un indice proche de 1 et donc respecte la législation. De plus, même si les écarts de revenus sont plus élevés que pour les IRIS attractifs, ils restent faibles, c'est-à-dire autour de 0.2. Par contre, ces IRIS accueillent une population très jeune, l'indice de jeunesse est très supérieur à 1, excepté pour Saint-Antoine de Ginestière.

LIBIRIS	Rugosité	Surpeuplement	Végétalisation	Diversité fonctionnelle	Mixité sociale	Ecart interdécile	Indice de jeunesse	Travailleurs dans la commune	Travailleurs en transport en commune	Production de PV	Compacité
Lenval	0,37	0,06	0,02	0,06	0,25	0,04	0,73	0,83	0,40	1,46	0,0037
Digue des Français	0,57	0,20	0,27	0,04	5,14	0,08	3,78	0,83	0,38	0,28	0,0071
Saint-Antoine Ginestiere	0,01	0,05	1,49	0,11	0,02	0,23	1,84	0,83	0,08	5,27	0,0000
Ariane-Ripert	0,01	0,11	0,05	0,06	2,16	NC	2,54	0,84	0,38	1,53	0,0027
Ariane-Les Chenes	0,00	0,21	0,23	0,23	4,00	0,00	2,63	0,80	0,34	1,86	0,0039
Mont Gros	0,04	0,19	2,05	0,12	2,67	NC	3,39	0,73	0,37	1,51	0,0013

Tableau 32 : Synthèse des indices des IRIS « attractifs » (Sevenet, 2013)

LIBIRIS	Rugosité	Surpeuplement	Végétalisation	Diversité fonctionnelle	Mixité sociale	Ecart interdécile	Indice de jeunes	Travailleurs dans la commune	Travailleurs en transport en commune	Production de PV	Compacité
Napoleon III	0,12	0,08	0,54	0,64	0,01	0,22	0,65	0,69	0,06	2,16	0,0004
TNL-Beaumont	0,68	0,08	0,19	0,08	0,00	0,18	0,56	0,79	0,21	2,40	0,0059
Saint-Jean d'Angely	0,35	0,09	0,18	0,08	0,56	0,15	1,72	0,80	0,26	1,58	0,0015
La Californie	0,50	0,06	0,02	0,10	0,02	0,08	0,62	0,76	0,40	1,88	0,0018
Diabes Bleus	0,46	0,09	0,11	0,51	1,17	0,12	0,98	0,81	0,21	1,97	0,0024
Barla	0,69	0,08	0,00	0,09	0,01	0,15	1,13	0,78	0,23	2,09	0,0049
Raimbaldi	0,12	0,08	0,54	0,64	0,01	0,22	0,65	0,69	0,06	2,16	0,0004

Tableau 33 : Synthèse des indices des IRIS « répulsifs » (Sevenet, 2013)

La recherche se focalise à présent, sur l'analyse des IRIS par rapport au reste de la ville. Le graphique se lit de la manière suivante : chacune des dimensions est représentée sur le graphique par IRIS analysés. Les valeurs ont été standardisées pour pouvoir les comparer.

D'après le graphique 11, les IRIS « attractifs » ne présentent pas de profil similaire mais ne sont pas non plus représentatifs des autres IRIS de la commune. Chacun des IRIS « attractifs » possède des caractéristiques morphologiques différentes.

- L'indice de rugosité est plutôt inférieur au reste de la ville.
- L'indice de végétalisation est supérieur pour les IRIS de Mont Gros et Saint Antoine de Ginestière situés sur les collines et bien inférieur pour l'Ariane les chênes, la Digue des Français et Lenval
- L'indice de surpeuplement est beaucoup plus important pour Mont Gros, Ariane les Chênes et la Digue des Français.
- L'indice de compacité ne présente pas de particularité pour les IRIS de ce groupe.

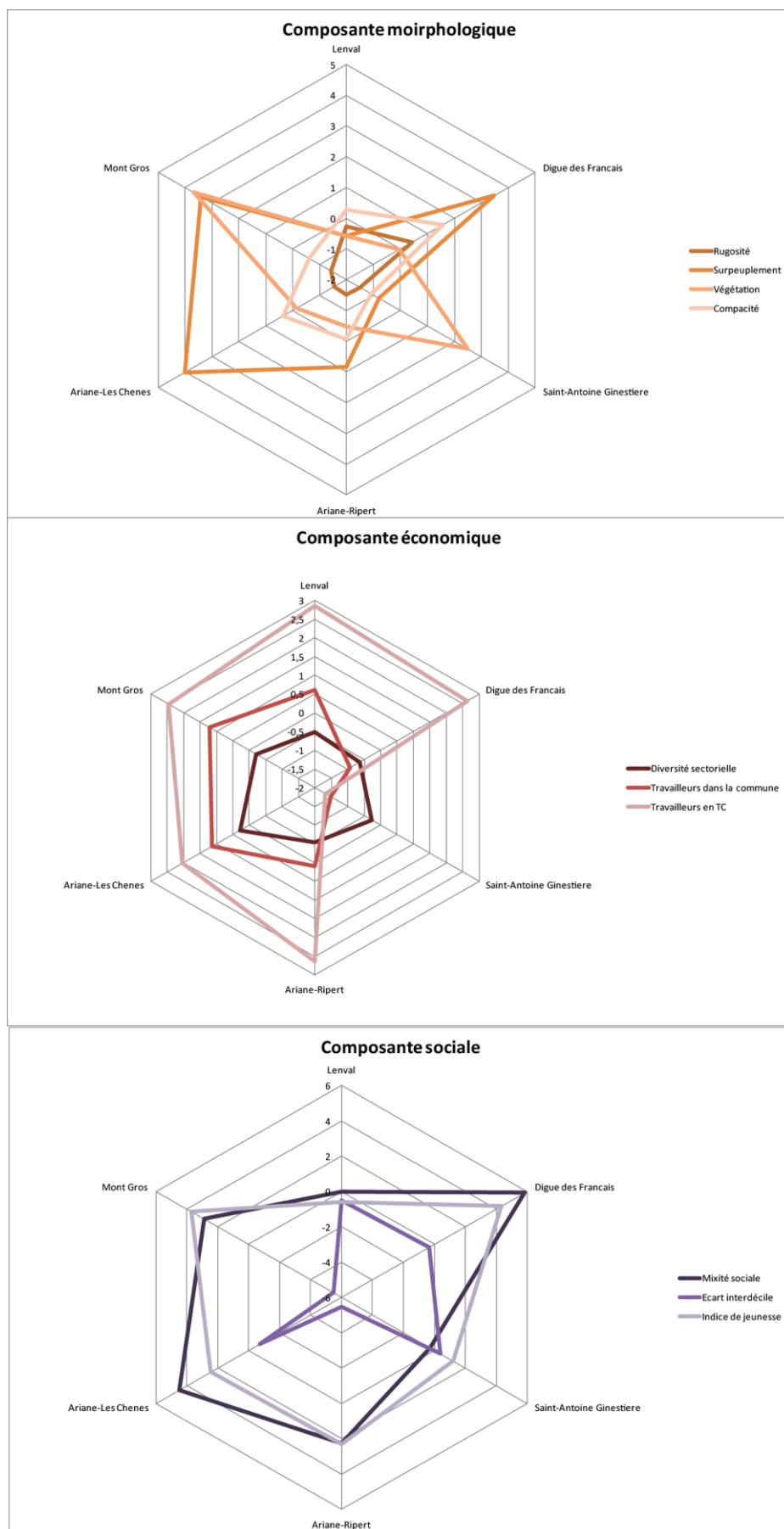
Par contre la dimension économique montre une légère différence. A l'exception de Saint Antoine de Ginestière, les IRIS « attractifs » possèdent des indices de travailleurs en TC et dans la commune supérieurs au reste des IRIS. La diversité sectorielle étant très faible sur tout le territoire, les différences entre les IRIS ne peuvent être marquées.

Par ailleurs, la composante sociale indique des résultats intéressants. L'écart interdécile de ces IRIS se situe dans la moyenne, à part pour Mont-Gros et Ariane Ripert. Ces deux IRIS possèdent donc des ménages dont les revenus ont très peu d'écart.

Pour les deux autres indices, deux groupes se dessinent :

Lenval et Saint-Antoine de Ginestière ne possèdent pas de profils atypiques par rapport au reste de la ville.

Mont-Gros, Ariane les chênes et la Digue des Français, par contre, présentent des profils très atypiques et très supérieurs au reste de la ville. La population vivant dans ces IRIS est plutôt jeune et le nombre de logements HLM n'est pas sous-représenté.



Graphique 11 : Durabilité des IRIS « attractifs » (Sevenet, 2013)

Les IRIS « répulsifs » ne présentent pas non plus de profil similaire du point de vue des indices. De même les écarts observés par rapport au reste de la commune sont plus faibles que pour les IRIS « attractifs ».

A la vue du graphique 12, quelques résultats sont à noter.

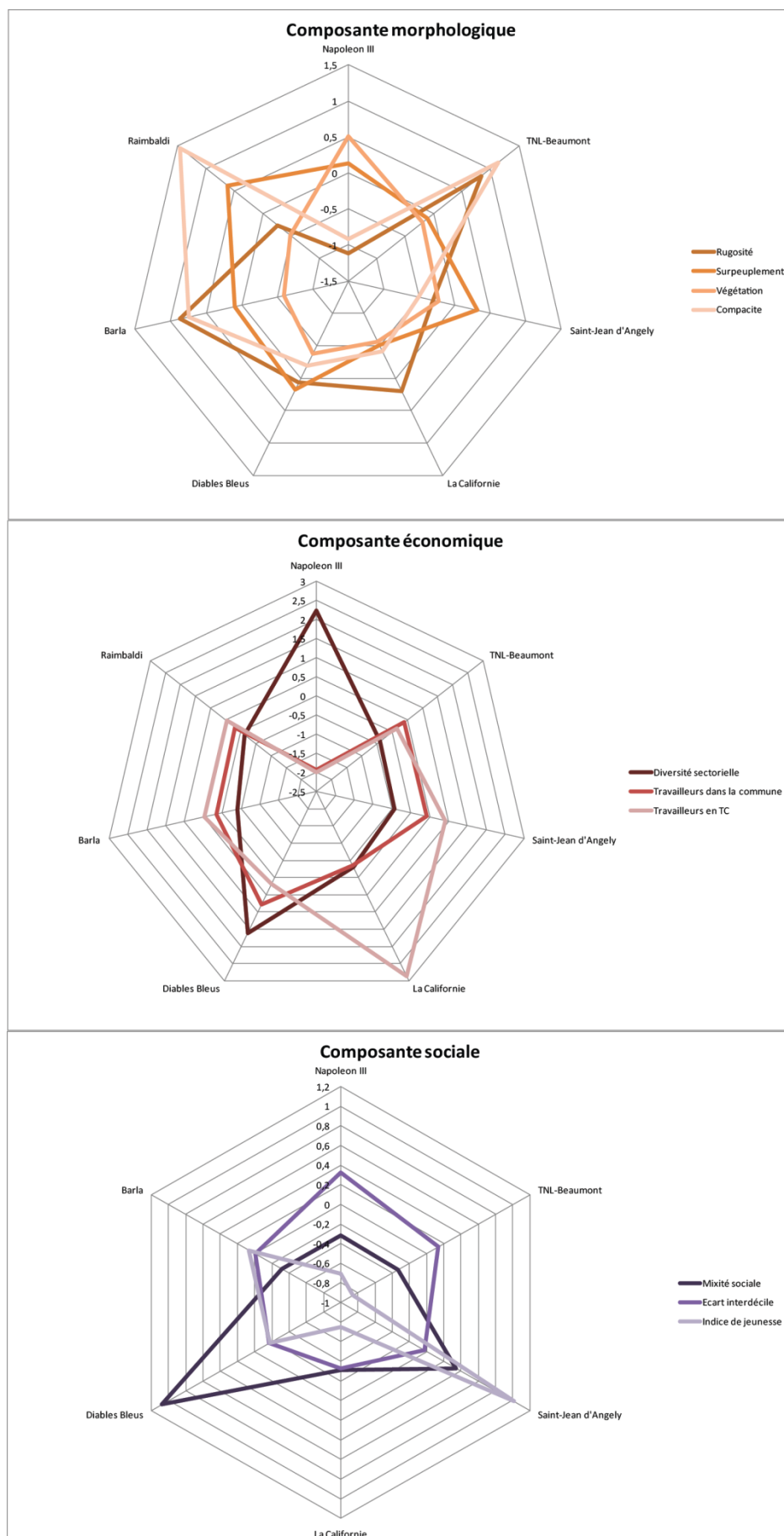
Du point de vue morphologique, les IRIS de TNL-Beaumont et de Barla possèdent une rugosité et une compacité supérieures à la moyenne. Situés dans le même quartier, ces deux espaces ont un bâti assez similaire. A l'inverse, Napoléon III expose un indice de rugosité et un indice de compacité plus faible que la moyenne.

Pour la composante économique, il y a très peu de profil atypique, à part Napoléon III qui offre une diversité sectorielle supérieure à la moyenne et une qualité de transport en commun moindre dans la mesure où les deux indices concernant les actifs sont inférieurs à la moyenne.

Le même constat peut être fait pour la composante sociale : peu de situation atypique. Les Diables Bleus possèdent, néanmoins, une offre de HLM en adéquation avec la législation et Saint Jean d'Angély constitue un IRIS plutôt jeune.

Ces résultats montrent un certain nombre de limites. L'explication des transformations tient, sans doute au gros projet de construction sur la ville et le niveau d'avancement aux moments de la constitution des données : L'Ariane, la Digue des Français, Saint Jean d'Angély, TNL et les Diables bleus étaient concernés par ces projets.

Les facteurs d'explication liés à la qualité de vie ne suffisent pas à expliquer les dynamiques intra-urbaines de la ville. En premier lieu, le prix du foncier reste une variable majeure dans cette explication, même si elle dépend d'éléments participant à la qualité de vie. Les logiques individuelles sont difficilement appréhendables dans leur ensemble. Chaque territoire possède ses propres spécificités et ses propres logiques de localisation résidentielle. Néanmoins, ces indices fournissent des informations qui peuvent participer à la cohérence des documents de planification urbaine.



Graphique 12 : Durabilité des IRIS « répulsifs » (Sevenet, 2013)

Les zones collinaires constituent une des principales réserves foncières de la ville. Le faible indice de rugosité et de peuplement est le signe de potentialités de développement importantes. Néanmoins, les nombreuses zones végétales doivent être préservées en raison de leurs qualités paysagères et de la biodiversité. Au-delà de la densification des zones bâties, des améliorations peuvent être apportées en termes d'optimisation spatiale. En effet, ces zones accueillent une population travaillant dans la commune, cependant, l'utilisation des transports en commun est pratiquement inexistante. Il semble donc qu'une adéquation entre les réseaux, les bâtiments résidentiels et les zones d'activités doive être proposée.

Parallèlement, les zones de plaine apparaissent plus contrastées. Même si les opportunités de densification sont plus limitées. Tout d'abord, il y a un centre-ville dense, économiquement intéressant mais pour lequel la ville doit travailler sur la qualité des transports. L'indice de rugosité est élevé, ainsi que la part des actifs se déplaçant en TC. L'offre de TC doit être repensée afin d'être utilisée par les habitants et de manière à moins nuire à la qualité de leur environnement.

Par ailleurs, dans une optique d'amélioration de la qualité de vie, ces IRIS doivent faire l'objet d'une attention particulière en termes d'organisation des transports. L'inertie des formes urbaines que ce soit celles des infrastructures ou des bâtiments, limite les possibilités d'intervention sur ce secteur. A court terme, il est plus aisé d'intervenir sur le trafic de véhicules ou sur les modes de transports.

Toutes les transformations des zones bâties doivent être simulées afin d'analyser leur durabilité en fonction des indices proposés ci-dessus. Autrement dit, les différents documents d'aménagement et d'urbanisme produisant des zonages doivent tenir compte de ces indices afin de répondre au mieux aux objectifs d'un développement urbain durable.

Conclusion de chapitre

Depuis l'instauration du développement durable, de nombreux indicateurs ont été proposés pour analyser la durabilité d'un territoire : de l'échelle nationale au quartier. Ces indicateurs présentent l'avantage d'être simples et compréhensibles par tous. Néanmoins, ils sont peu adaptables à toutes les échelles, soit ils sont trop généraux pour refléter une situation locale, soit ils sont trop particuliers pour être reproductibles. Par contre, l'analyse des formes urbaines et intra-urbaines pèse de plus en plus dans l'analyse même si les formes ne sont qu'appréhendées en deux dimensions ou sous l'angle de la compacité. Ce dernier point souligne l'intérêt de ce type d'analyse.

Les analyses proposées dans ce chapitre ont été conduites en prenant en compte plusieurs contraintes. Tout d'abord, des indices sont proposés afin de fournir une **aide à la décision** pour des non spécialistes. Dans le cas de certaines variables, les indices tiennent compte de la verticalité ou du volume. Lorsque cela est possible, ils sont calculés à **plusieurs niveaux spatiaux**, et la pertinence au regard de la problématique donnée, de chaque échelle spatiale, est testée. Par ailleurs, dans un souci de cohérence, de **reproductibilité** et de **facilité de mise en œuvre**, les **données** qui ont été retenues sont **gratuites ou disponibles pour toute la France**.

Le tableau 34, ci-dessous, permet de comparer les indices morphologiques mis en place pour ce travail de recherche avec les grands thèmes « qualitatifs » de la durabilité retrouvés dans les expérimentations.

1970	2006	Nos indicateurs
Milieu de vie (l'état du logement et les caractéristiques du quartier)	Qualité de l'environnement sonore	Indice de compacité « 3D »
	Qualité de l'air	Indice de rugosité ou de sensibilité aux différents fluides
	Taille des logements	Indice Sur ou Sous population :
Instruction (le niveau de scolarité)	Infrastructures éducatives	
Services de loisirs et de consommation de masse	Disponibilité des espaces verts,	Indice de végétalisation
	Potentialités commerciales	Surface de bâtiments d'activités- Industrielles, commerciales
Lien social (les types de famille, la vie sociale et la démocratie)	Réseau de transport en commun	

Tableau 34 : Comparaison des indicateurs proposés dans ce travail et ceux existants (Sevenet, 2013)

Ce chapitre a permis d'analyser la pertinence d'indicateurs simples adaptés à la morphologie de l'espace urbain. Ainsi, nous pouvons dire que la typologie fondée sur les variables surface/hauteur/espacement permet de mieux prendre en compte les différences spatiales, elle montre plus d'homogénéité dans la répartition et la localisation des différentes valeurs des indices. Elle est plus fine et adaptée à certains indices directement liés à la morphologie, tels que la rugosité, la végétalisation et le surpeuplement.

Néanmoins, le découpage par IRIS reste l'échelon incontournable pour traiter les données statistiques au niveau le plus fin et généraliser les méthodes produites à tous les territoires. En outre, certaines variables ne nécessitent pas une désagrégation totale. Par exemple, l'activité économique est le résultat d'une agrégation d'individus et de décisions individuelles, il est donc important de situer l'analyse à un autre niveau.

L'objectif de cette thèse était, entre autres, de mettre en place des indicateurs d'analyse des composantes du développement durable urbain et de la qualité de vie. Les résultats présentés offrent des opportunités d'améliorations mais il reste difficile d'intégrer l'ensemble des dimensions du développement durable sans faire catalogue. Toutefois, les indices que nous avons retenus présentent l'avantage d'être simples et de fournir des informations et des recommandations à tirer pour la planification.

Conclusion de la partie 3

Les précédentes parties ont présenté les différentes options urbanistiques souhaitables dans les prochaines années. Depuis le début du XXI^{ème} siècle, l'évolution urbaine doit concourir à la densification de la ville. Par ailleurs, cette forme de croissance doit être privilégiée pour la Ville de Nice compte tenu de sa configuration. L'analyse indique que la ville tend à se densifier car l'essentiel des transformations est constitué d'opérations de renouvellement urbain et qu'elles sont regroupées spatialement. Pourtant la reconstruction de la ville sur elle-même ne constitue pas encore le mode de transformations privilégié puisqu'elles se localisent en périphérie de la ville où subsistent des réserves foncières. Les processus qui marquent le début du XXI^{ème} siècle ne correspondent pas complètement aux préconisations édictées.

Compte tenu de ces éléments, il s'agit ensuite de connaître précisément les types de tissus urbains afin que les acteurs de la ville puissent intervenir directement sur les tissus à densifier. L'analyse des ressemblances par le calcul de l'autocorrélation a dégagé des similitudes des formes intra-urbaines proches au sein du territoire. Seule la première couronne périurbaine montre une hétérogénéité des formes. Ainsi plusieurs méthodes de détection des types morphologiques dans leurs trois dimensions ont été proposées mais seule la méthode s'appuyant sur ces deux groupes de paramètres suivants ont été retenus :

- la morphologie des bâtiments (l'emprise au sol et la hauteur) et l'agencement de ces bâtiments entre eux (l'espacement et leur régularité) et
- la complexité des objets 3D (complexité 2D et 3D ainsi que volume).

La pertinence de ces deux typologies a été testée et le résultat de l'analyse de variance indique que le couple morphologie-agencement est plus adapté à la détection des tissus. Elle a permis de définir 13 types. Ceux-ci correspondent aux typologies retenues par les experts et décrits dans le paragraphe sur la caractérisation des formes urbaines. Néanmoins des limites persistent, l'aspect morphologique ne suffit pas pour distinguer correctement les bâtiments par rapport à leur fonction.

Au-delà de l'aspect morphologique, les types de tissus sont, ensuite, confrontés aux aspects de durabilité et de qualité de vie. Faire de la densité ne signifie pas seulement construire des bâtiments à l'intérieur des espaces urbanisés. L'ensemble des transformations urbaines doit être accepté par les citoyens. Par conséquent, les formes urbaines doivent s'insérer dans un cadre de vie convenable. En ce sens, plusieurs indices, couplant notamment morphologie et aspects sociaux, économiques et environnement, ont été proposés et confrontés à chacune des typo-morphologies et au découpage statistique sur lequel les données socio-économiques s'appuient.

Une fois de plus, la typologie alliant morphologie-agencement permet de mieux prendre en compte les différences spatiales de certaines dimensions telles que la rugosité, la végétalisation et le surpeuplement. Néanmoins, même si le découpage par IRIS n'est pas adapté à l'analyse de certaines composantes, notamment économique, il reste l'échelon privilégié des données statistiques au niveau le plus fin. Le rôle du changement d'échelle est crucial. Chacun des

phénomènes doit être décrit à son niveau pertinent puis chacune des échelles identifiées doit être articulée pour porter une réponse cohérente pour le devenir de l'espace urbain, ainsi que celui-ci et ses voisins.

En outre, les résultats présentés offrent des opportunités d'améliorations mais il reste difficile d'intégrer l'ensemble des dimensions du développement durable sans faire « catalogue ». Toutefois, les indices que nous avons retenus présentent l'avantage d'être simples et de fournir des informations pour l'aide à la décision et des recommandations pour la planification. Les recommandations proposées aux acteurs du territoire visent, ainsi, plusieurs thématiques en interaction. Une densification de l'espace urbain peut être proposée tout en ciblant les secteurs de la ville en fonction de critères économiques, sociaux et environnementaux.

Conclusion générale

Les deux principales évolutions que la recherche connaît actuellement - l'apparition et l'amélioration des outils informatiques ainsi que le renouvellement des problématiques urbaines conduisent à de nouveaux questionnements, tant sur les concepts que sur les méthodes et les modèles de l'analyse spatiale, et plus généralement de la science.

L'espace constitue un repère possédant au moins trois dimensions, quatre si le temps est pris en compte. Il est considéré comme un contenant en trois dimensions qui met en relation les objets qui y sont contenus possédant eux-mêmes trois dimensions.

Si nous nous en tenons à son aspect mesurable, la **troisième dimension** est la **hauteur** des objets, couplée à la largeur et la longueur, elle participe au **volume**. Les éléments présents à la surface possèdent 0, 1, 2 ou 3 dimensions ; la représentation en 3D est nécessaire pour retranscrire la réalité de l'espace géographique. Toutefois, elle permet également d'apporter des éléments d'explication car elle traduit une forme résultat particulière issue de pressions ou de dynamiques. En effet, les forces qui s'exercent en un point conduisent à l'**accumulation** puis à des **déformations** de l'espace. Par exemple, l'arrivée massive de population au sein des villes a conduit à sa croissance verticale et horizontale.

En outre, de manière qualitative, la forme constitue une figure qui se détache du fond. R. Thom (1999) décrit ce phénomène par la notion de **saillance**, c'est-à-dire un élément visuel distinguable par ses propriétés physiques et/ou ses aspects cognitifs mis en jeu lors de leur perception. Cet aspect cognitif fait appel à des structures abstraites issues d'images mentales qui reflètent des mentalités culturelles du moment.

Celles-ci peuvent susciter des réactions psycho-physiologiques, autrement dit une attraction ou à une répulsion, ainsi la forme devient **prégnante** pour un individu et se traduit parfois par une réaction. Par exemple, à Nice, les espaces collinaires sont les secteurs les plus attractifs de la ville. Pour caricaturer, zones naturelles et vue mer conduisent au développement sous forme de maisons individuelles avec jardin privatif. Dans ces conditions, l'espace urbain peut être chargé de sens par ses habitants et entraîner certains comportements d'attractions ou de rejets. Autre exemple, la ville future a été dépeinte dans la science-fiction par des gratte-ciels qui s'élèvent à l'infini. Cette verticalité exagérée est souvent associée à la dégradation de la qualité de vie par la dégradation de l'environnement et par l'accentuation des divisions sociales.

Dans ces conditions, formes urbaines et bien-être sont associés par la prégnance qu'elles suscitent. Le phénomène contemporain d'individuation entraîne un élargissement de la notion de **qualité de vie** avec le bien-être qui lui, dépend de l'intensité et de la diversité des perceptions sensorielles des habitants (Fleuret et Alii, 2004). Même si le bien-être assure la qualité de vie, le premier relève de la perception individuelle tandis que la seconde traduit la **composante objective** du premier. Ainsi, l'optimisation de la qualité de vie d'une société ne signifie pas nécessairement l'optimisation de la somme de bien-être individuel. Améliorer la

qualité de vie de la population urbaine, c'est maximiser la composante objective de celle-ci : Agencement des vides et des pleins (ambiances), emplois, infrastructures, accessibilité, services. Elle impacte directement l'attractivité d'une zone et donc sa valeur.

Depuis plus d'une dizaine d'années, les espaces urbains sont critiqués pour la qualité de vie qu'ils offrent et pour leur croissance non maîtrisée. Des principes de développement durable ont été proposés, cependant, ils ne suffisent pas pour produire un développement urbain soutenable. Les résultats en termes de croissance urbaine depuis une dizaine d'années n'ont pas été satisfaisants, et ce principalement parce qu'ils ne correspondent pas aux besoins à court terme de la société. Désormais, il est nécessaire de trouver un compromis entre les attentes de la population et la préservation de la planète. La notion de qualité de vie permet de pallier les manques des préconisations du développement durable. Dans ce travail, la qualité de vie correspond au niveau d'intervention le plus pertinent puisque qu'elle agit à la fois sur la sphère sociétale et sur la sphère individuelle. La prise en compte de ces attentes, la maximisation des besoins de la société permettrait d'adapter et faire accepter les transformations urbaines.

En outre, la maîtrise de la croissance urbaine implique de densifier les espaces déjà bâtis. Nous venons de l'expliquer, cette forme urbaine ne suscite pas l'adhésion des habitants. Dans ces conditions, il est nécessaire d'allier **connaissance fine des densités et de la qualité de vie** afin de concilier les deux impératifs actuels. La recherche en urbanisme a proposé des **formes durables de la ville**, au sens de celle qui se maintient dans le temps. Ces conceptions se fédèrent autour du renouvellement de la notion de **proximité** spatiale et des pôles **hiérarchisés** de manière **multiscale**. Cette approche est particulièrement pertinente dans le cadre d'un développement urbain durable. En effet, le développement urbain durable doit être articulé et optimisé de l'échelle locale à l'échelle globale.

La question des échelles est cœur des problématiques géographiques et plus particulièrement de l'analyse spatiale. Les recherches réalisées dans le cadre de la théorie des fractales, de la Théorie de Relativité d'Echelles ou de la loi constructale offrent de pistes de réflexions pour l'optimisation des formes notamment urbaine. Même si leurs principes diffèrent, les éléments qu'elles proposent notamment pour l'articulation et l'optimisation des échelles de chaque espace enrichissent les concepts des méthodes proposées.

Compte tenu des transformations urbaines attendues, la **connaissance fine du territoire** est nécessaire. L'évolution vers des **données tridimensionnelles** extrêmement précises et exhaustives permet de s'affranchir d'une partie de la pratique du terrain. Parallèlement, la généralisation des **SIG** rend des informations spécialisées accessibles pour des non-spécialistes, le SIG offre ainsi, une plate-forme commune entre acteurs locaux et scientifiques. Les niveaux d'analyse qu'il permet dépendent de sa finalité : une bonne visualisation, la mise en relation d'objets spatiaux ou la simulation de phénomènes. La troisième dimension est utilisée principalement pour la visualisation des espaces géographiques. Pourtant la hauteur

des éléments peut être intégrée à l'analyse dans la mesure où les SIG intègrent la 2D1/2 voir la 2D3/4. Néanmoins, le manque d'opérateurs topologiques, essentiels en analyse spatiale, limite ses capacités. En outre, les limites actuelles des SIG n'ont pas empêché le développement d'applications intégrant les formes urbaines dans leurs trois dimensions. Plusieurs études ont permis de mettre en évidence les facteurs morphologiques essentiels. Toutefois, si la donnée tridimensionnelle est disponible à un **niveau désagrégé**, ce n'est pas toujours le cas des autres variables qui lui sont associées. De plus, certaines données ne nécessitent pas une désagrégation à l'individu ou à une échelle extrêmement précise. Au-delà de l'articulation entre ces échelles, cette problématique soulève la question du choix de **l'échelle pertinente d'analyse**. Ce problème est particulièrement sensible lorsque la hauteur des objets est traitée, la valeur qu'elle prend en fonction du niveau d'agrégation auquel elle est décrite, peut être très différente.

D'après ces éléments de réflexion, les choix de transformations des espaces urbains doivent être acceptés par les citoyens. Par conséquent, les formes intra-urbaines doivent s'insérer dans un cadre de vie convenable. Des contraintes ont été fixées pour la construction d'une **méthode d'analyse de la durabilité des formes intra-urbaines en trois dimensions**.

Tout d'abord, l'analyse de leur évolution sur la dernière décennie confirme que, pour la ville de Nice, bien que la densification des espaces bâtis est en cours, elle n'est pas la forme prégnante du territoire. La force liée aux aspirations individuelles est encore très marquée.

Après la mise en œuvre de plusieurs méthodes de détection des tissus, la typo-morphologie fondée sur la morphologie (surface et hauteur) et sur l'agencement des bâtiments indiquent une bonne prise en compte des tissus marqués cependant par des nombreuses ruptures dans l'espace et une forte irrégularité des contours. Parallèlement, des éléments viennent compléter le constat fait ci-dessus : le tissu bâti diffus occupe une grande partie du territoire.

Parallèlement, des **indices** sont proposés afin d'**aider à la décision** à des non spécialistes pour leurs choix urbanistique. Lorsque cela est possible, les indices ont été calculés à plusieurs niveaux spatiaux, et la pertinence au regard de la problématique donnée, de chaque échelle spatiale, a été testée. Par ailleurs, dans un souci de cohérence, de reproductibilité et de facilité de mise en œuvre, les données qui ont été retenues sont gratuites ou disponibles pour toute la France.

La typo-morphologie alliant morphologie-agencement permet de mieux prendre en compte les différences spatiales de certaines dimensions telles que la rugosité, la végétalisation et le surpeuplement. Rappelons que le **rôle de l'échelle pertinente** est crucial. Chacun des phénomènes doit être décrit à son niveau pertinent puis chacune des échelles identifiées doivent être articulées pour porter une réponse cohérente pour le devenir de l'espace urbain, ainsi que celui-ci et ces voisins. Toutefois, l'objectif de reproductibilité de la méthode implique l'utilisation de données exhaustives sur tout le territoire français. Le découpage par IRIS reste l'échelon privilégié des données statistiques au niveau le plus fin, il contraint donc l'analyse de certaines variables à cette échelle qui n'est pas nécessairement adaptée. Par

exemple, l'aspect social nécessite de coupler deux échelles. Une qualifiée d'horizontale, l'IRIS, visant à analyser le respect de la législation concernant le nombre de logements sociaux. Une autre qualifiée de verticale nécessite de connaître précisément la localisation des logements en x, y et z. Cette donnée permettrait d'analyser la possible apparition d'une ségrégation verticale. De même, l'aspect économique est généralement analysé à l'échelle de l'aire urbaine. Toutefois, les impératifs de limitation des émissions de GES associées aux déplacements domicile-travail implique une connaissance de la répartition des activités au sein de la ville, pas nécessairement à celle de l'IRIS. Ces niveaux doivent être articulés entre eux pour une même variables/aspect mais également entre toutes les dimensions du développement durable.

Les résultats présentés doivent être développés et améliorés mais il reste difficile d'intégrer l'ensemble des dimensions du développement durable sans faire « catalogue », seule une méthode multiscalaire offrirait cette cohérence. Toutefois, les indices que nous avons retenus présentent l'avantage d'être simples et de fournir des informations pertinentes pour l'aide à la décision et des recommandations pour la planification.

Pour des questions de temps, certains aspects de l'état de l'art n'ont pas été traités de manière opérationnelle, néanmoins ils offrent des perspectives de recherche. Notamment, en prenant appui sur la loi Constructale, l'intérêt d'une telle démarche vise ensuite à recomposer les formes urbaines durables. A partir d'une optimisation multicritères, il s'agit d'agrèger les informations collectées, des niveaux inférieurs aux supérieurs.

Tout d'abord, il serait intéressant de connaître les flux d'entrée et de sortie de la ville (par exemple la population, les emplois, les déplacements *etc.*). Ce qui permet d'estimer les stocks et vérifier qu'ils soient adéquats. Par exemple, le nombre de logements et leur superficie doivent être concordants avec la population résidente, de même pour le nombre d'emplois. Lorsque l'adéquation entre les stocks a été réalisée, il faudrait ensuite les redistribuer au sein des bâtiments. Un couplage entre un système dynamique et une simulation multi-agent offrirait un cadre méthodologique adapté afin de répondre à ces objectifs.

Il faut se rappeler que la somme de la durabilité des sous-espaces ne conduit pas nécessairement à la ville durable. Par conséquent, après la redistribution, il sera nécessaire de tester les indicateurs sur plusieurs configurations et à plusieurs échelles de manière à trouver l'organisation spatiale la plus optimale. La modélisation des options d'urbanisme sera intégrée dans un SIG. Leur développement actuel permet d'envisager sous peu l'intégration complète de la troisième dimension en leur sein.

Après la présentation de ces perspectives, il reste une question à laquelle il est impératif de répondre : quelle est la meilleure échelle pour optimiser la ville ?

La méthode expliquée ci-dessus s'est également appuyée sur la segmentation des types de formes urbaines. Les nouveaux enjeux urbains mettent l'accent sur la densification, pour ce faire, une connaissance fine des volumes est une nécessité.

L'analyse des transformations du bâti niçois a révélé que la ville tend à se densifier car l'essentiel des changements est constitué d'opérations de renouvellement urbain. Pourtant la reconstruction de la ville sur elle-même ne constitue pas encore le mode de transformations privilégié puisqu'elles se localisent en périphérie de la ville où subsistent des réserves foncières. Les processus qui marquent le début du XXIème siècle ne correspondent pas parfaitement aux préconisations édictées. De manière générale, les transformations se localisent dans deux zones géographiques : la plaine littorale, plus particulièrement dans la plaine du Var à l'ouest de la ville, et les collines, soit, principalement en périphérie de la ville. Les résultats de l'analyse indiquent que la vue sur mer peut jouer également un rôle dans l'explication de la localisation des dynamiques spatiales.

Afin de préciser l'analyse, des méthodes d'identification des formes urbaines ont été proposées. La corrélation recherchée entre la hauteur et la surface n'est pas significative, la superficie n'explique pratiquement pas la hauteur d'un même bâtiment. Par contre, l'analyse des ressemblances met en évidence des similitudes dans les formes urbaines au sein du territoire. Seule la 1ère couronne périurbaine montre une hétérogénéité des formes.

En conséquence de quoi, la détection des types de formes urbaines s'est appuyée sur plusieurs paramètres de morphologie des bâtiments (l'emprise au sol et la hauteur) et l'agencement de ces bâtiments entre eux (l'espacement et leur régularité). La morphologie mathématique offre des outils d'analyse d'image procédant de la même manière que l'œil. Les types étant observables à partir d'images aériennes, elle est donc tout à fait adaptée pour automatiser ce processus. La méthode de détection des types morphologiques retenue permet de distinguer 13 types de bâtiments qui correspondent aux typologies habituellement retenues dans la littérature. L'avantage de cette méthode est qu'elle ne se limite pas à des caractères pré-établis mais cherche les caractères similaires et est donc amenée à évoluer. Elle peut donc être utilisée pour l'analyse de différentes thématiques.

Néanmoins, cette typologie est encore très détaillée pour être opérationnalisée et s'en tenir uniquement aux paramètres morphologiques n'est pas suffisant. L'aspect fonctionnel doit être mieux pris en compte, tout du moins la distinction entre le résidentiel, l'industriel et le commercial.

En outre, les indicateurs de durabilité ont été calculés à l'échelle de la typologie mise en place. Elle permet de mieux prendre en compte les différences spatiales de certaines dimensions telles que la rugosité, la végétalisation et le surpeuplement. Néanmoins, même si le découpage par unités spatiales, issues de la statistique, n'est pas adapté à l'analyse de certaines composantes, notamment économique, il reste l'échelon privilégié des données statistiques au niveau le plus fin.

Une autre perspective est envisagée. La théorie des fractales et les avancées de la Théorie de la Relativité d'Echelle semblent prometteuses pour caractériser les types de tissus. Le gradient d'irrégularité démontré par M. Guérois (2003) et I. Thomas et Alii (2009) ouvre de nouvelles perspectives. Le problème des différences entre la taille des unités spatiales et les types de

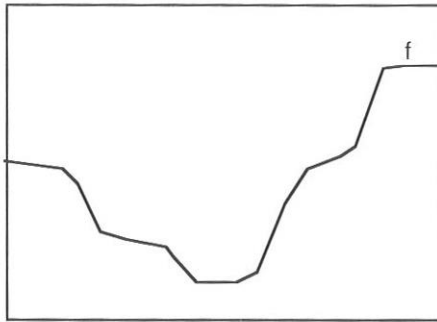
tissus a été souligné également dans ce travail. Les espace centraux présentent des formes denses, régulières et se traduisent pas des unités statistiques et même administratives (IRIS, quartier) de tailles réduites. A l'inverse, la diffusion du bâti des espaces périphériques est regroupée au sein de grandes unités spatiales. L'intermédiaire est une zone en constant changement et qui ne répond pas aux mêmes logiques. Si l'on se place du point de vue de la typologie, le découpage des espaces centraux est plus grand que celui des espaces périphériques, dans la mesure où leur densité est plus homogène. Les deux comportements scalants mis en exergue par M. Guérois (2003) offrent une réponse possible à l'analyse des formes urbaines. Il semble que la détection de ces types doive être proposée à différentes échelles.

Ce travail de thèse a souhaité ouvrir la réflexion et des pistes de recherche pour intégrer la 3D en analyse spatiale. L'objectif était d'offrir une application complète mais simple dans le cadre d'un processus de planification d'un système urbain. Nous avons conscience que l'approfondissement de chacune des parties de ce traitement permettrait de s'approcher du réel mais augmenterait sa complexité et donc sa reproductibilité. Cette recherche a été conduite avec une vision globale, de la même manière que le Tout ne s'organise pas sans les parties, la morphologie est prise avec toutes, sinon la plupart de ses interactions avec le système urbain.

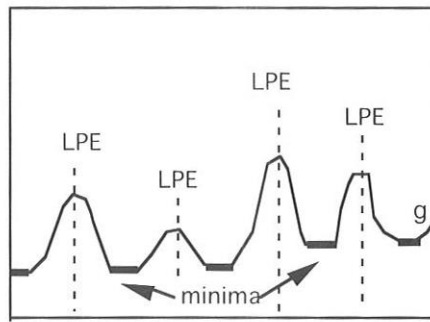
.

ANNEXES

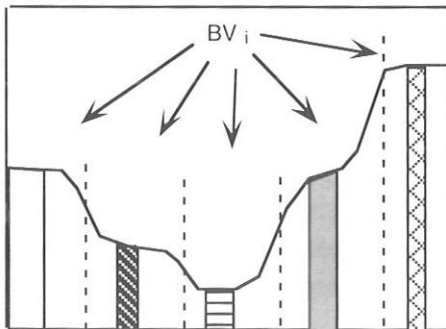
Annexe A. Etapes de la création d'une image mosaïque



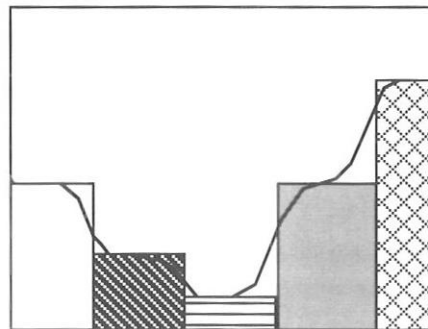
fonction numérique initiale f



gradient g de la fonction f et sa ligne de partage des eaux



niveaux de gris de f correspondant aux minima du gradient g



fonction-mosaïque f' résultant de l'extension des niveaux de gris à l'ensemble des bassins versants

Annexe B. Exemple de résultats de l'analyse de la fractalité urbaine.



Cluster 1. Besançon *n1* (city centre)
 $D_{aDc} = 1.841$ $D_{Dc} = 1.838$ $a = 0.988$



Cluster 2. Stuttgart *n4* (peripheral area)
 $D_{aDc} = 1.804$ $D_{Dc} = 1.621$ $a = 0.430$



Cluster 3. Brussels *n6*
 $D_{aDc} = 1.666$ $D_{Dc} = 1.683$ $a = 1.112$



Cluster 4. Cergy *n2* (new town)
 $D_{aDc} = 1.645$ $D_{Dc} = 1.455$ $a = 0.406$

(Source : Thomas et Alii, 2009)

Annexe C. Exemples de configurations d'îlot et analyse de la qualité de l'air et du degré d'optimalité

	R2V	R4V	C2V	C4V	I2V	I4V
Optimalité forte						
Optimalité faible ←-----→ Optimalité forte						
Optimalité faible ou nulle						

R2V = rues à deux voies,
 R4V= rues à 4 voies,
 C2V=croisement à deux voies,
 C4V=croisement à 4 voies,
 I2V= intersection à 2 voies,
 I4V=intersection à 4 voies)

(Source : Maignant, 2009)

Annexe D. Extrait d'une image aérienne de la Ville de Nice (IGN)



Annexe E. Formule de calcul de l'autocorrélation spatiale (Indice de Moran) dans le logiciel ArcGIS®

The Moran's I statistic for spatial autocorrelation is given as:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} z_i z_j}{S_0 \sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (1)$$

where z_i is the deviation of an attribute for feature i from its mean ($x_i - \bar{X}$), $w_{i,j}$ is the spatial weight between feature i and j , n is equal to the total number of features, and S_0 is the aggregate of all the spatial weights:

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} \quad (2)$$

The z_I -score for the statistic is computed as:

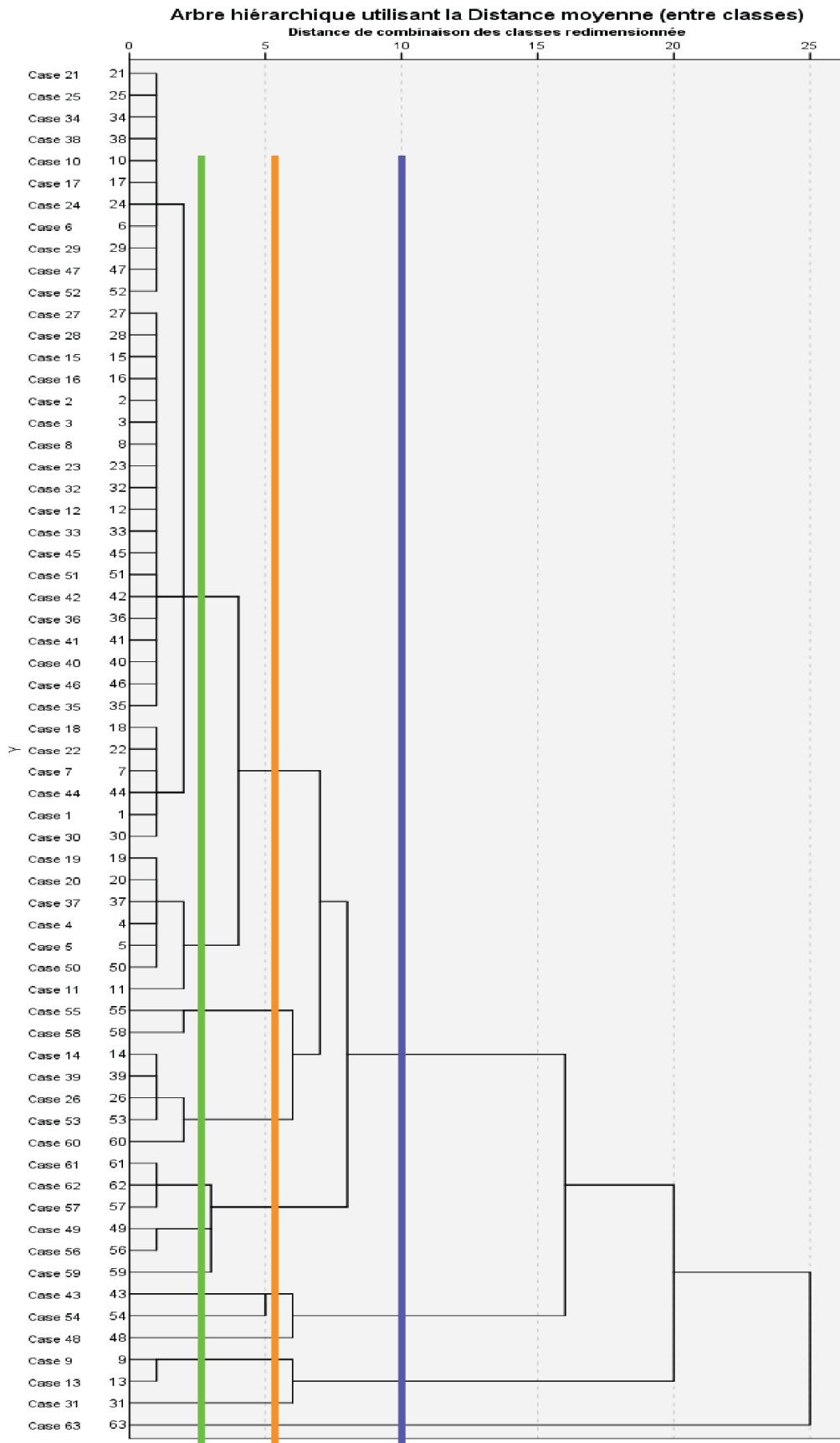
$$z_I = \frac{I - E[I]}{\sqrt{V[I]}} \quad (3)$$

where:

$$E[I] = -1/(n - 1) \quad (4)$$

$$V[I] = E[I^2] - E[I]^2 \quad (5)$$

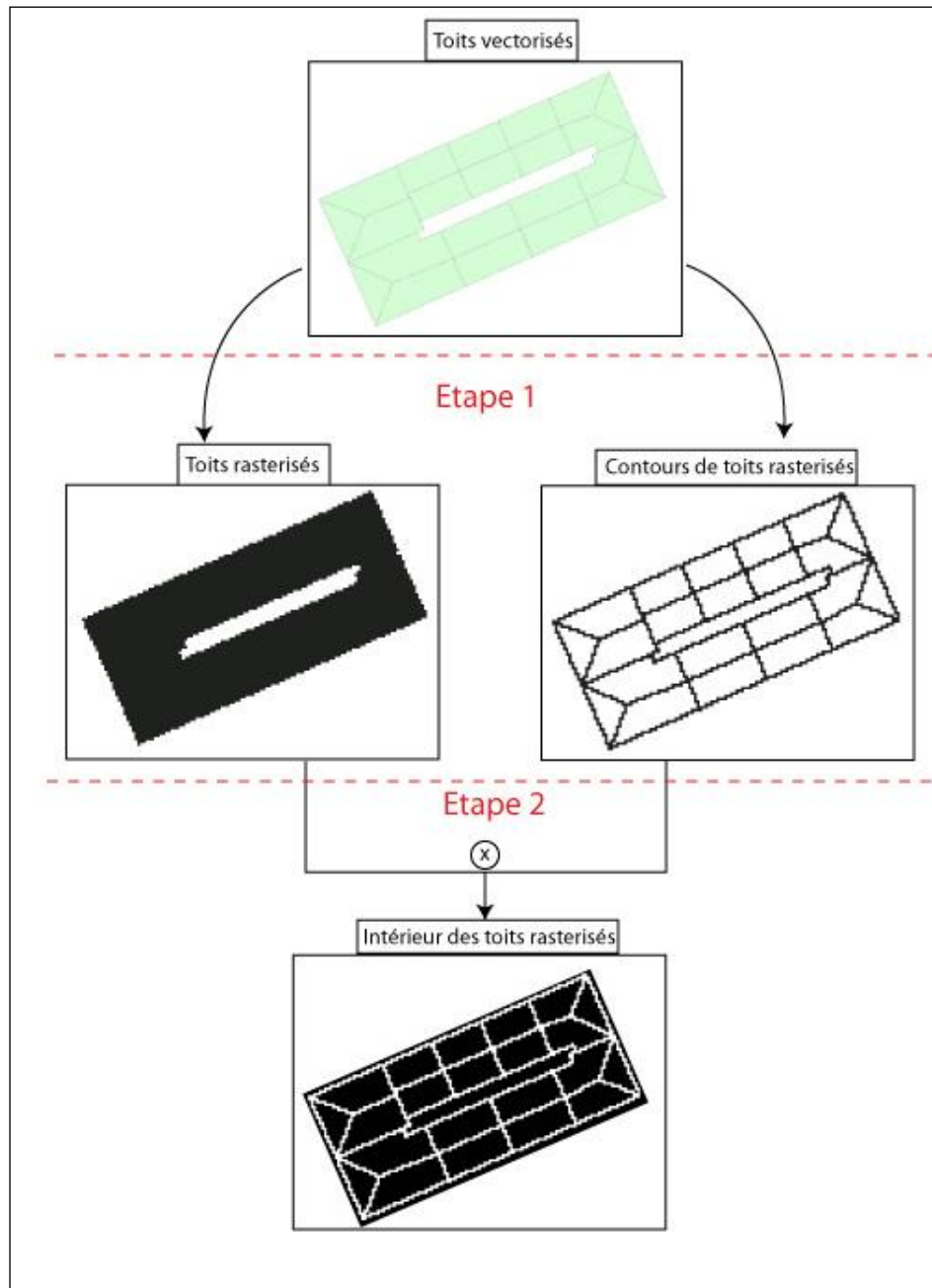
Annexe F. Arbre de classification de 2^{ème} groupe d'indicateurs



Annexe G. Localisation des IRIS de la Ville de Nice (INSEE)



Annexe H. Méthode de calcul du nombre de panneaux totalement inclus dans chaque toit



Annexe I. Méthode de calcul de la surface réelle occupée par un panneau sur un toit plat

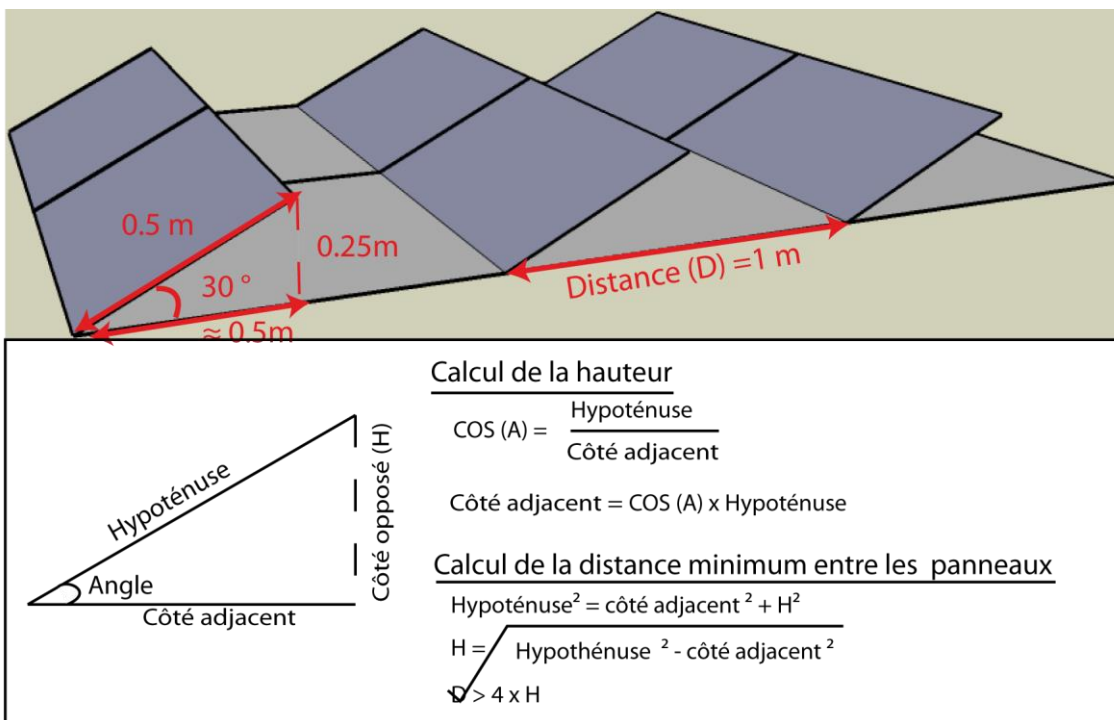


Table des matières

REMERCIEMENTS	1
RESUME	3
ABSTRACT	5
INTRODUCTION GENERALE	7
PARTIE 1. LA 3D REALITE OU FICTION	11
INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE	13
CHAPITRE 1. FORME ET ESPACE : FORMALISATION	15
1. LA STRUCTURATION DE L'ESPACE ET DE SES DIMENSIONS	18
1.1. LES DIMENSIONS DE L'ESPACE	19
1.2. ESPACE ABSOLU ET ESPACE RELATIF	21
1.3. L'ESPACE : UNE CONSTRUCTION EMANANT DE MISES EN RELATION MULTIPLES	23
1.4. LA DIMENSION SPATIALE DE L'ESPACE GEOGRAPHIQUE	27
2. DU DIALOGUE ENTRE FORCES ET FORME(S) NAIT L'ESPACE GEOGRAPHIQUE	30
2.1. LA FORME, UN CONTENANT ET UN CONTENU	30
2.1.1. CE QUI NOUS ENTOURE : UN SYSTEME OU AGISSENT DES FORCES.	30
2.1.2. CE QUI NOUS SEPRE : LA DISCONTINUITE	33
2.2. FORME(S) ET FORCES : DEUX CONCEPTS INDISSOCIABLES	35
2.2.1. STABILITE DYNAMIQUE DES FORMES ET RESILIENCE PAR L'ADAPTATION	36
2.2.2. LA FORME TRIDIMENSIONNELLE COMME RESULTANTE DE LA PRESSION	38
3. LA FORMALISATION DE LA FORME EN 2D ET 3D DANS LES ANALYSES GEOGRAPHIQUES	42
3.1. COMMUNIQUER PAR LA CARTE UNE INFORMATION SPATIALISABLE	42
3.2. LA TROISIEME DIMENSION : OUTIL DESCRIPTIF ET PEDAGOGIQUE	43
3.2.1. L'UTILISATION DE LA TROISIEME DIMENSION EN GEOGRAPHIE	43
3.2.2. DES PRECAUTIONS A PRENDRE EN COMPTE	49
3.3. L'APPORT DE LA TROISIEME DIMENSION DANS L'EXPLICATION	50
4. L'ANALYSE SPATIALE ET SA RELATION A LA FORME TRIDIMENSIONNELLE	52

4.1. DISTANCE ET INTERACTION SPATIALE	52
4.2. LE POINT DE VUE SPATIAL	54
4.3. LA TROISIEME DIMENSION A-T-ELLE SA PLACE ?	55
4.4. L'ANALYSE D'IMAGE PAR LA MORPHOLOGIE MATHEMATIQUE	61
4.4.1. PRINCIPES GENERAUX	62
4.4.2. EXEMPLES DE TRANSFORMATIONS MORPHOLOGIQUES APPLIQUEES A L'ESPACE URBAIN	63
4.4.2.1. ANALYSE DES DISTRIBUTIONS DE TAILLE ET DES ESPACEMENTS	63
4.4.2.2. SQUELETTISATION ET SEGMENTATION	64
4.4.2.3. REGIONALISATION : LA « LIGNE DE PARTAGE DES EAUX »	65
4.4.2.4. LPE DE L'IMAGE GRADIENT ET HIERARCHISATION DES CONTOURS	67
CONCLUSION DE CHAPITRE	69
<hr/>	
CHAPITRE 2. ESPACE ET FORMES URBAINES DANS LE SYSTEME URBAIN	73
<hr/>	
1. SYSTEME SPATIAL URBAIN ET ESPACE URBAIN	75
<hr/>	
1.1. ANALYSE DES FORMES URBAINES	76
1.1.1. LES ELEMENTS DE L'ESPACE URBAIN : QUELLES DIMENSIONS ?	76
1.1.2. LA VILLE EST UN PALIMPESTE	79
1.1.3. EVOLUTION DES STRUCTURES SPATIALES ET EVOLUTION DES VILLES	85
1.2. LA VALEUR DE L'ESPACE COMME RESULTAT DE FORCES QUI S'Y DEROULENT	87
1.3. L'ESPACE URBAIN : PRODUIT DU DIALOGUE ENTRE FORMES ET FORCES	90
1.3.1. LA VERTICALITE ET/OU LA DENSITE ?	91
1.3.2. INTERACTION DE LA FORME URBAINE AVEC SON ENVIRONNEMENT	94
2. EVALUATION ET MESURE DE LA FORME URBAINE	98
<hr/>	
2.1. DENSITE ET COMPACITE	98
2.1.1. QUELLES DENSITES ?	98
2.1.2. LES INDICES DE COMPACITE	100
2.1.3. INTEGRER LA VERTICALITE	103
2.2. LES MODELES URBAINS : LA GEOMETRIE AU SERVICE DE LA GEOGRAPHIE	106
2.2.1. LES PREMIERS MODELES MORPHOLOGIQUES URBAINS	106
2.2.2. LA FILIATION ENTRE FORME URBAINE ET FORME DU VIVANT PAR LA GEOMETRIE FRACTALE	107
2.2.3. L'APPORT DES MODELES D'AGREGATION A LA MODELISATION DE LA CROISSANCE URBAINE	111
CONCLUSION DE CHAPITRE	115
<hr/>	
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE	117

PARTIE 2. DE LA VILLE MONODIMENSIONNELLE ET HORIZONTALE A LA VILLE MULTIDIMENSIONNELLE ET VERTICALE	119
INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE	121
CHAPITRE 3. LES ENJEUX D'UNE ANALYSE SPATIALE DE LA DURABILITE URBAINE	123
1. RECONSTRUIRE LA VILLE SUR ELLE-MEME	125
1.1. POURQUOI ACCABLER L'ESPACE URBAIN ?	125
1.2. ADAPTABILITE DE LA VILLE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES : ALLIER PRATIQUES INDIVIDUELLES ET PRATIQUES PROGRAMMEES.	127
1.2.1. LE DEBAT : VILLE ETALEE VERSUS VILLE DENSE	128
1.2.2. LES FORMES PRECONISEES EN REPOSE AU DEBAT	132
1.3. MIEUX VIVRE : QUALITE ET HARMONIE	134
2. TROUVER LA CONFIGURATION ET LA DISTRIBUTION URBAINE OPTIMALE DANS LE CONTEXTE DU DEVELOPPEMENT DURABLE	137
2.1. COMMENT TROUVER UNE FORME D'ORGANISATION ALTERNATIVE AU ZONAGE ET AUX DEPLACEMENTS ASSOCIES	137
2.1.1. QUELS SONT LES ELEMENTS FAVORABLES AU ZONAGE	137
2.1.2. UNE ALTERNATIVE : LA COMPACITE ET LE VOLUME?	138
2.1.3. QUELLES ADAPTATIONS DE LA STRUCTURE DE LA VILLE A CES DYNAMIQUES FUTURES?	139
2.2. REFLEXIONS AUTOUR DE L'ORGANISATION SPATIALE OPTIMALE	140
2.2.1. IMBRICATION DU BATI / NON BATI ET DENSIFICATION REFLECHIE	140
2.2.2. LA DURABILITE COMME OPTIMUM MULTISCALEAIRE ?	141
2.2.3. LA FORME IDEALE AU NIVEAU DU BATIMENT EST-ELLE DUPLICABLE OU MULTIPLIABLE AU NIVEAU DE TOUTE UNE VILLE ? LA SOMME DES PARTIES FAIT-ELLE UN TOUT ?	142
2.2.4. RECHERCHER UNE FORME URBAINE RESPECTUEUSE DE LA QUALITE DE VIE ET DU CONFORT URBAIN	143
2.2.5. UNE VILLE ADAPTABLE, COHERENTE ET REVERSIBLE	145
3. ET CO-CONSTRUIRE SA VILLE	146
3.1. UN NOUVEAU MODE DE (GEO)GOUVERNANCE	146
3.2. DES EXPERIENCES PLUS OU MOINS ENCOURAGEANTES	146
CONCLUSION DE CHAPITRE	151
CHAPITRE 4. LES REPONSES DE L'ANALYSE SPATIALE AUX QUESTIONNEMENTS SUR LA DURABILITE URBAINE	153

1. LES ANCRAGES THEORIQUES : ECHELLE ET OPTIMISATION	156
1.1. AUTOSIMILARITE ET INVARIANCE D'ECHELLE	156
1.2. LA THEORIE DE LA RELATIVITE D'ECHELLE	158
1.3. VERS UNE MODELISATION OPERATIONNELLE : L'OPTIMISATION	160
1.3.1. APPORT DE LA GEOMETRIE FRACTALE AU CONCEPT D'OPTIMISATION	160
1.3.2. LA METHODE CONSTRUCTALE : L'OPTIMISATION SOUS CONTRAINTES	162
1.3.3. LA VILLE DURABLE NAIT-ELLE DES QUARTIERS DURABLES ?	166
2. LES AVANCEES TECHNOLOGIQUES ALIMENTANT LA REFLEXION DE L'ANALYSE SPATIALE	168
2.1. VERS LA THRS : DONNEES, PRECISIONS, ECHELLES	168
2.1.1. LES TYPES DE DONNEES DISPONIBLES	169
2.1.2. LES DONNEES DESAGREGES	171
2.2. LES SYSTEMES D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES: UTILITE ET LIMITES	172
2.2.1. L'ASPECT MULTICRITERE ET MULTISCALEIRE DES SIG	172
2.2.2. SIG ET MODELISATION 3D	175
3. DES DONNEES AGREGES AUX DONNEES DESAGREGES	179
3.1. METHODES ET MODELISATION D'ANALYSE MICRO INTEGRANT L'INDIVIDU DANS LE CADRE DU DEVELOPPEMENT DURABLE.	179
3.1.1. EMERGENCE DE L'APPROCHE INDIVIDU-CENTRE	179
3.1.2. LE MAUP ET LA QUESTION DE L'UNITE SPATIALE PERTINENTE POUR L'ANALYSE DE LA DURABILITE URBAINE	180
4. INTEGRATION DE LA 3D DANS L'ANALYSE SPATIALE	186
4.1. MODELISATION DES ELEMENTS DU SYSTEME URBAIN DANS SES TROIS DIMENSIONS	186
4.1.1. ESTIMATION DE POTENTIEL: INTERACTION ENTRE ECHELLES MICRO ET MACRO	186
4.1.2. MODELISATION 3D ET SIMULATION D'IMPACT	188
4.1.3. AMBIANCES URBAINES	190
4.2. ANALYSE SPATIALE ET TRAITEMENT SIG	191
4.3. LA 3D DANS LES DEMARCHES PARTICIPATIVES	192
CONCLUSION DE CHAPITRE	197
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE	199
PARTIE 3. A LA RECHERCHE DES RELATIONS ENTRE MORPHOLOGIE ET DURABILITE INTRA-URBAINE. APPLICATION A NICE	201

INTRODUCTION DE LA TROISIEME PARTIE	203
CHAPITRE 5. CARACTERISER LA FORME INTRA-URBAINE EN 2D ET 3D	205
1. ÉVOLUTION URBAINE DE NICE ENTRE 1999 ET 2007	207
1.1. PRESENTATION DES DONNEES : PRECAUTIONS D'EMPLOI	207
1.2. ANALYSE DE L'ÉVOLUTION DU BATI	210
1.3. LOCALISATION DES TRANSFORMATIONS DU BATI	212
2. CARACTERISER DES FORMES DU BATI	219
3. LA RELATION ENTRE EMPRISE AU SOL/HAUTEUR SUFFIT-ELLE A CARACTERISER LA FORME DU BATI ?	222
4. ANALYSE DES RESSEMBLANCES	225
4.1. HYPOTHESES ET METHODES	225
4.2. RESULTATS	226
4.3. CARTOGRAPHIE DES RESULTATS	228
5. DETECTION DE TYPES MORPHOLOGIQUES A PARTIR DE BASE DE DONNEES BATIMENTS (BD TOPO®)	231
5.1. PRESENTATION DE LA METHODE DE TYPOLOGIE PAR LA MORPHOLOGIE MATHÉMATIQUE	232
5.2. DETECTION DES DISCONTINUITES SUR LA HAUTEUR, L'ESPACEMENT ET LA SURFACE	233
5.2.1. PREMIER ESSAI DE DETECTION DES DISCONTINUITES PAR HIERARCHIE DES GRADIENTS (HG)	233
5.2.2. DEUXIEME ESSAI DE DETECTION DES DISCONTINUITES PAR OUVERTURE, CONNEXITE ET DISCRETISATION (OC)	234
5.3. TYPOLOGIE BASEE SUR LA COMPLEXITE DE LA FORME DES OBJETS.	240
5.4. ANALYSE DES DISCONTINUITES DES SIX VARIABLES.	242
5.5. TYPOLOGIE	245
CONCLUSION DE CHAPITRE	253
CHAPITRE 6. ANALYSE DE L'INTERACTION ENTRE LA MORPHOLOGIE URBAINE ET LES FACTEURS DE DURABILITE	256
1. LES INDICATEURS DE DEVELOPPEMENT DURABLE URBAIN : EVALUER LA DURABILITE DES TERRITOIRES.	259
1.1. QU'EST-CE QU'UN INDICATEUR DE DEVELOPPEMENT DURABLE ?	259
1.2. INDICATEURS DE DURABILITE: POUR QUI? POUR QUOI? COMMENT? OU?	260
1.3. EVALUER LE DEVELOPPEMENT DURABLE PAR LA QUALITE DE VIE	262
2. DES INDICATEURS SIMPLES POUR RENDRE COMPTE D'UNE SITUATION COMPLEXE	265
2.1. MORPHOLOGIE ET QUALITE DE VIE	266
2.1.1. INDICATEUR DE LA QUALITE DU MILIEU DE VIE	267

2.1.2.	ADEQUATION ENTRE NATUREL ET ARTIFICIEL : LA BIODIVERSITE	268
2.1.3.	L'ADEQUATION ENTRE TAILLE DES MENAGES ET TAILLE DES LOGEMENTS	271
2.2.	MORPHOLOGIE ET FONCTION URBAINE	272
2.2.1.	ANALYSE DES SURFACES UTILES	272
2.2.2.	QUELLE MIXITE SOCIALE ?	273
2.2.3.	LOCALISATION DES LIEUX DE VIE : DOMICILE ET TRAVAIL	274
2.3.	MORPHOLOGIE ET ENVIRONNEMENT/ENERGIE	275
2.3.1.	L'ENSOLEILLEMENT	275
2.4.	CARACTERISER LA MORPHOLOGIE D'UNE UNITE SPATIALE	277
2.4.1.	PAR UNE TYPO-MORPHOLOGIE	277
2.4.2.	QUELLE MORPHOLOGIE DES IRIS ?	278
3.	<u>QUELLE DURABILITE POUR LA VILLE DE NICE ?</u>	279
4.	<u>DYNAMIQUE URBAINE ET DURABILITE : ATTRACTIVITE OU REPULSIVITE</u>	300
4.1.	QUELLE DYNAMIQUE DU TERRITOIRE NIÇOIS ENTRE 1999 ET 2007	300
4.2.	QUELLE DURABILITE POUR CES ZONES EN TRANSFORMATIONS ?	302
	<u>CONCLUSION DE CHAPITRE</u>	312
	<u>CONCLUSION DE LA PARTIE 3</u>	314
	<u>CONCLUSION GENERALE</u>	316
	<u>ANNEXES</u>	322
ANNEXE A.	<u>ETAPES DE LA CREATION D'UNE IMAGE MOSAÏQUE</u>	323
ANNEXE B.	<u>EXEMPLE DE RESULTATS DE L'ANALYSE DE LA FRACTALITE URBAINE.</u>	324
ANNEXE C.	<u>EXEMPLES DE CONFIGURATIONS D'ILOT ET ANALYSE DE LA QUALITE DE L'AIR ET DU DEGRE D'OPTIMALITE</u>	325
ANNEXE D.	<u>EXTRAIT D'UNE IMAGE AERIENNE DE LA VILLE DE NICE (IGN)</u>	326
ANNEXE E.	<u>FORMULE DE CALCUL DE L'AUTOCORRELATION SPATIALE (INDICE DE MORAN) DANS LE LOGICIEL ARCGIS®</u>	327
ANNEXE F.	<u>ARBRE DE CLASSIFICATION DE 2^{EME} GROUPE D'INDICATEUR</u>	328

<u>ANNEXE G. LOCALISATION DES IRIS DE LA VILLE DE NICE (INSEE)</u>	<u>329</u>
<u>ANNEXE H. METHODE DE CALCUL DU NOMBRE DE PANNEAUX TOTALEMENT INCLUS DANS CHAQUE TOIT</u>	<u>330</u>
<u>ANNEXE I. METHODE DE CALCUL DE LA SURFACE REELLE OCCUPEE PAR UN PANNEAU SUR UN TOIT PLAT</u>	<u>331</u>
<u>TABLE DES MATIERES</u>	<u>332</u>
<u>LISTE DES FIGURES</u>	<u>340</u>
<u>LISTE DES TABLEAUX</u>	<u>346</u>
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	<u>350</u>
<u>SOURCES WEB</u>	<u>371</u>

Liste des Figures

Figure 1 : L'espace à trois dimensions : coordonnées	Source : Encarta – Universalis	20
Figure 2 : Exemple d'opération de mise en relation	(Sevenet, 2013)	24
Figure 3 : L'aspect multiscalaire de la forme et échelle spatiale	(Sevenet, 2013)	32
Figure 4 : Deux exemples de discontinuités observables illustrées par les flèches en s'appuyant sur la verticalité des objets	(Sevenet, 2013)	35
Figure 5 : Explication intuitive d'une transition catastrophique	(Kéfi, 2012)	37
Figure 6 : Formes résultant des pressions ou des forces s'exerçant sur un espace	(Sevenet, 2013)	39
Figure 7 : Benidorm 1960 et 2010	(source : [2] et Common Wikimedia)	39
Figure 8 : Modèles de maisons rurales, deux niveaux de réduction réelle	(d'après Lebeau, 2004)	43
Figure 9 : Représentation des formes karstiques par bloc diagramme	(Ferras, 1975)	44
Figure 10 : Représentation de la chaîne des Pyrénées	(Brunet et Bertrand, 1975)	44
Figure 11 : Evolution paysagère du début du XX ^{ème} siècle jusqu'aux années 1970 et exemple de scénario prospectif de l'évolution de ce paysage	(Poux, 2011)	45
Figure 12 : Lien entre prix du foncier, organisation spatiale et formes urbaines	(D'après Paulet, 2000)	53
Figure 13 : Représentation schématique de différente distribution de densité urbaine avec une densité et une superficie bâtie constante	(Bertaud, 2004)	57
Figure 14 : Les principales utilisations de la 3D	(Niggeler, 2008)	58
Figure 15 : Les pulsations en 3D de la ville de Besançon au cours d'une journée type	(Thévenin, 2002)	58
Figure 16 : Construction d'un tableau de données spatialisées	(d'après Voiron, 1995)	60
Figure 17 : Exemple de capture et de partition d'un bassin versant	(Voiron, 1997)	61
Figure 18 : Résultat d'une ouverture hexagonale de taille 1 (image B) de l'image initiale A	(Voiron, 1995)	63
Figure 19 : Comparaison entre les squelettes simulé et réel, Cas d'application sur les collines niçoises	(Sevenet, 2006)	64
Figure 20 : Squelette par zone d'influence réalisée autour de bâtiments	(Sevenet, 2013)	65
Figure 21 : Exemple de construction d'une LPE par simulation d'immersion	(Manzanera, 2005)	66
Figure 22 : Exemple d'un résultat de traitement de ligne de partage des eaux	(Voiron, 1997)	66
Figure 23 : Hiérarchisation du gradient des densités communales du Gard et de l'Hérault	(Voiron, 1995)	68
Figure 24 : Le système morphologique de la ville	(d'après Allain, 2004)*	76
Figure 25 : Représentation de la combinaison entre plusieurs éléments urbains	Source : Géoportail de l'IGN 2013	78
Figure 26 : Exemple de quartier issu de la période du Moyen-âge de la ville de Nice	Source : Google Map, 2013	80
Figure 27 : Exemple de quartier issu de la période Hygiéniste de la ville de Nice – en jaune sur l'image	Source : Google Map, 2013	81
Figure 28 : Exemple de grands ensembles de la ville de Nice	Source : Google Map, 2013	83
Figure 29 : Exemple de lotissements de la ville de Nice	Source : Google Map, 2013	84
Figure 30: Exemples de formes urbaines issues d'un processus de planification ou d'auto-organisation	Source : [3] et [4]	87
Figure 31 : Interactions des formes urbaines sur les éléments du système urbain*	(Sevenet, 2013)	88
Figure 32 : La croissance : association entre les formes naturelles et anthropiques	(Sevenet, 2013)	90
Figure 33 : NewYork	(Sevenet, 2013)	91
Figure 34 : De la forme urbaine au développement durable	(Sevenet, 2013)	95
Figure 35 : Densité et ségrégation	(Sevenet, 2013)	96
Figure 36 : Densités comparées des formes urbaines	(IAURIF, 2005b)	99
Figure 37 : Indices de forme caractérisant la configuration des tâches urbaines	(Guérois, 2003)	100
Figure 38 : La compacité dans les formes urbaines	(Fusco, 2003)	101

Figure 39 : Exemple d'une surface urbanisée et de son barycentre (Fusco, 2003).	102
Figure 40 : Normalisation de la distance standard D , mesurée pour la surface urbanisée réelle, par le biais du rayon r du cercle de surface équivalente (Fusco, 2003).	102
Figure 41 : Indicateurs renseignant sur la morphologie du site (Weber, 2001).	104
Figure 42 : Indicateurs morphologiques des bâtiments (Carneiro et Alii, 2009).	105
Figure 43 : Les modèles d'écologie urbaine (d'après Paulet, 2000).	106
Figure 44 : Exemple d'objets fractals – la courbe de Koch et le chou romanesco (Sevenet, 2013)	108
Figure 45 : Photographie aérienne de Nice Source : Google Earth, 2013.	109
Figure 46 : Analyse fractale du bâti de l'agglomération lyonnaise (Guérois, 2003).	110
Figure 47 : Schéma représentant le modèle DLA (d'après Dauphiné, 2003).	112
Figure 48 : Les interactions entre les formes urbaines et les phénomènes éco et socio-spatiaux (Sevenet, 2013)	115
Figure 49 : Les interactions entre les formes et les ambiances urbaines (Sevenet, 2013)	115
Figure 50 : Densité urbaine et consommation d'énergie liée aux transports (Newman et Kenworthy, 1989)	129
Figure 51 : Les sphères du développement urbain durable (Sevenet, 2013).	134
Figure 52 : La ville de trois millions d'habitants de Le Corbusier Source : [7].	137
Figure 53 : La proposition de SCHÖFL pour l'aménagement de la bordure d'une agglomération. La zone verte et le bâti s'entrelacent. (Frankhauser et Genre-Grandpierre, 1998).	140
Figure 54 : Imbrication des échelles dans l'espace urbain (Sevenet, 2013)	142
Figure 55 : Critères subjectifs de la qualité de vie quotidienne lyonnaise (CETE, 2006).	144
Figure 56 : Le triangle de Sierpinski.	156
Figure 57 : Schématisation de la théorie des lieux centraux Source : [8].	157
Figure 58 : Reconstitution de la forme de la ville optimale grâce à la géométrie fractale (Genre-Grandpierre et Frankhauser, 1998).	161
Figure 59 : Paradigme de la Géographie et de l'optimisation (Maignant, 2009).	163
Figure 60 : Schématisation de la recomposition des formes urbaines selon la méthode Constructale (Sevenet, 2013).	164
Figure 61 : Echelles urbaines et évaluation de la mixité sociale (Dutozia, 2004).	164
Figure 62 : Exemple de répartition sociale différenciée en fonction des niveaux d'analyse (Dutozia, 2004).	165
Figure 63 : Exemple de processus constructal d'élaboration d'un quartier optimal d'un point de vue dispersion de polluants (Maignant, 2009).	166
Figure 64 : Modèle Numérique d'Élévation produit par InfoTerra Résolution : 1 mètre, Date : 2000.	170
Figure 65 : Environnement des fonctionnalités SIG (Bordin, 2006).	173
Figure 66 : Dualité de la perception de la carte 3D (De Cambay, 1994a)	176
Figure 67 : Topologie dans un SIG (IAAT, 2003).	177
Figure 68 : Volume bâti moyen calculé à plusieurs échelles (Sevenet, 2013 d'après les données IRIS et BD TOPO®).	182
Figure 69 : Surface et volume moyens calculés à plusieurs échelles (Sevenet, 2013 d'après les données IRIS et BD TOPO®).	183
Figure 70 : Interactions entre qualité environnementale et bâtiment (Ramos, 2003).	189
Figure 71 : Organisations générales de la démarche modélisatrice (Musy et Alii, 2004).	190
Figure 72 : Sortie graphique du calcul de l'indice de proximité du voisinage (Sevenet, 2013).	213
Figure 73 : Localisation des transformations du bâti entre 1999 et 2007 (Sevenet, 2013).	214
Figure 74 : Problème d'agrégation des bâtiments en zone dense sur la BD TOPO® (Source : Géoportail de l'IGN, 2013).	215
Figure 75 : Zone de visibilité depuis la mer et depuis les nouveaux bâtiments en 2007 (Sevenet, 2013).	218

Figure 76 : Cartographie des résidus de la régression entre les variables "hauteur" et "surface" A – sur tous les bâtiments et B : sur les bâtiments « résidentiels » (Sevenet, 2013).....	224
Figure 77 : Autocorrélation spatiale mesurée par l'Indice de Moran (Sevenet, 2013).....	227
Figure 78 : Analyse de la similitude de la hauteur et de la surface des bâtiments (Sevenet, 2013). Les cartes de gauche présentent les résultats de l'indice pour les surfaces et celles de droite pour les hauteurs.	229
Figure 79 : Squelette par zone d'influence (B) fait à partir des bâtiments (A) puis affectation des niveaux de gris de la variable complexité 2D à chaque zone (C) (Sevenet, 2013).....	233
Figure 80 : Extraction de la couche bâtiments de la BD Topo 2007 (Sevenet, 2013).	235
Figure 81 : Images résultats de l'analyse de connexité au pas de dilatation 2 et 7 (Sevenet, 2013).	240
Figure 82 : Images résultats de la classification des variables emprise au sol, hauteur et espacement (Sevenet, 2013).	243
Figure 83 : Images résultats de la classification des variables complexité 2D, complexité 3D et volume (Sevenet, 2013).	244
Figure 84 : Typo-morphologie du bâti niçois selon leur hauteur, emprise au sol et espacement* (Sevenet, 2013).	248
Figure 85 : Typo-morphologie du bâti niçois selon leur complexité 2D et 3D, ainsi que leur volume (Sevenet, 2013).	250
Figure 86 : Comparaison des typologies proposées ci-dessus (Sevenet, 2013).	251
Figure 87 : Exemples de tissu de chaque type défini par la méthode (Sevenet, 2013).....	255
Figure 88 : Méthode de calcul pour la désagrégation d'un ilot au bâtiment (d'après Banos et Thévenin, 2008)	266
Figure 89 : Schéma présentant la méthode de désagrégation de la population au bâtiment (Banos et Thévenin, 2008).....	267
Figure 90 : Méthode d'estimation de la population exposée au bruit ou aux polluants (Sevenet, 2013).....	268
Figure 91 : Préparation des données pour le calcul de la diversification sectorielle (Sevenet, 2013).	272
Figure 92 : Méthode d'estimation du potentiel d'énergie photovoltaïque (Sevenet, 2013).....	275
Figure 93 : Représentation d'une installation de panneaux photovoltaïques sur un toit plat (Sevenet, 2013) ..	276
Figure 94 : Indice de rugosité des IRIS de la Ville de Nice d'après les données INSEE, 2007 (Sevenet, 2013)	280
Figure 95 : Indice de rugosité pour les deux typo-morphologies de la Ville de Nice d'après les données INSEE, 2007 (Sevenet, 2013)	281
Figure 96 : Localisation des espaces naturels protégés sur la Ville de Nice d'après les données de l'INPN, 2011 et de l'IGN, 2007 (Sevenet, 2013).....	282
Figure 97 : Indice de végétalisation des IRIS de la Ville de Nice d'après les données de l'IPN, 2008 et l'INSEE, 2007 (Sevenet, 2013)	284
Figure 98 : Indice de végétalisation pour les types morphologiques de la Ville de Nice d'après les données de l'IPN, 2008 et l'INSEE, 2007 (Sevenet, 2013).....	285
Figure 99 : Indice de surpeuplement des IRIS de la Ville de Nice d'après les données INSEE, 2007 (Sevenet, 2013)	287
Figure 100 : Indice de surpeuplement des types-morphologiques de la Ville de Nice d'après les données INSEE, 2007 (Sevenet, 2013)	288
Figure 101 : Indice de compacité 3D des IRIS de la Ville de Nice (Sevenet, 2013).....	289
Figure 102 : Localisation des entreprises de Nice d'après les données de SIRENE de l'INSEE, 2008 (Sevenet, 2013)	290
Figure 103 : Indice de diversité sectorielle des IRIS de la Ville de Nice d'après les données INSEE, 2007 (Sevenet, 2013).....	292

<i>Figure 104 : Part des actifs résidant et travaillant dans la commune de Nice et celle de ceux qui se déplacent en TC par IRIS d'après les données INSEE, 2007 (Sevenet, 2013).</i>	294
<i>Figure 105 : Indice de mixité sociale des IRIS de la Ville de Nice d'après les données INSEE, 2007 (Sevenet, 2013)</i>	296
<i>Figure 106 : Indicateur de production solaire par habitant de la Ville de Nice (Sevenet, 2013)</i>	298
<i>Figure 107 : Dynamique du bâti niçois entre 1999 et 2007 par IRIS (Sevenet, 2013)</i>	301
<i>Figure 108 : Localisation des IRIS qui ont connu une évolution significative de leur bâti entre 1999 et 2007 (Sevenet, 2013)</i>	302

Liste des Tableaux

Tableau 1 : La catégorie d'espace: quatre approches (Lévy et, Lussault, 2003)	27
Tableau 2 : Les différentes catégories de modèles 3D (d'après De La Losa, 2000)	47
Tableau 3 : Densité - avantages ou inconvénients? (d'après K.S. Pun cité par Fouchier et Merlin, 1994).	93
Tableau 4 : La variété des phénomènes d'agrégation en géographie (d'après J-Fgouyet cité par Dauphiné, 2003).	112
Tableau 5 : Exemples de correspondance entre principes fondateurs du développement durable et la mise en œuvre du développement durable urbain (d'après Dutozia, 2004).	127
Tableau 6 : Evolution de la mobilité quotidienne et du temps passé dans les déplacements locaux selon l'urbanisation du lieu de résidence Source : Insee - SOeS - Inrets, enquêtes nationales transports et communication 1993-1994, transports et déplacements 2007-2008.	130
Tableau 7 : Valeurs relatives de la toiture (Nowak, 2004).	188
Tableau 8 : Harmonisation des nomenclatures de 1999 et de 2007* (Sevenet, 2013).	208
Tableau 9 : Evolution des catégories de bâtiments de Nice entre 1999 et 2007 (Sevenet, 2013).	209
Tableau 10 : Evolution de la forme urbaine – hauteur et surface au sol – de la commune de Nice (Sevenet, 2013).	209
Tableau 11 : Comparaison entre les bâtiments construits et détruits sur la commune de Nice entre 1999 et 2007 (Sevenet, 2013).	211
Tableau 12 : Transformations des bâtiments niçois entre 1999 et 2007 (Sevenet, 2013)	211
Tableau 13 : Répartition des catégories en fonction des types de transformations* (Sevenet, 2013).	212
Tableau 14 : Exemples de typologies des formes urbaines (Sevenet, 2013).	220
Tableau 15 : Résultats statistiques de la cartographie de l'autocorrélation spatiale (Sevenet, 2013).	230
Tableau 16 : Exemple de résultats de l'analyse de variance réalisée sur les classifications issues de la hiérarchisation du gradient (Sevenet, 2013).	234
Tableau 17 : Variances en fonction des classes sur la forme et la surface du bâti (Sevenet, 2013).	238
Tableau 18 : Variance en fonction des classes pour le nombre d'étages du bâti (Sevenet, 2013).	238
Tableau 19 : Synthèse des bornes de classes pour chacun des indicateurs (Sevenet, 2012).	240
Tableau 20 : Effet d'appartenance à la 1 ^{ère} typologie en fonction de la CAH (Sevenet, 2013).	247
Tableau 21 : Effet d'appartenance à la 2 ^{ème} typologie en fonction de la CAH (Sevenet, 2013).	247
Tableau 22 : Indicateurs nationaux retenus par la SNDF (d'après SNDF, 2003)	261
Tableau 23 : Comparaison des dimensions de la qualité de vie urbaine entre 1970 et 2006 (Sevenet, 2013 d'après Sénécal et Alii, 2005, CERTU, 2006).	263
Tableau 24 : Indicateurs retenues par Sénécal et Alii (2005) pour analyser la qualité de vie.	264
Tableau 25 : Comparaison des dimensions de la qualité de vie urbaine entre 1970 et 2006, les thématiques retenues pour la mise en place des indicateurs (Sevenet, 2013 d'après Sénécal et Alii, 2005, CERTU, 2006) ...	265
Tableau 26 : Poids des espaces verts dans l'espace perçu en fonction de leur type, exprimé en mètre (d'après la BD TOPO®, 2006)	269
Tableau 27 : Synthèse des espaces protégés (Sevenet, 2013)	270
Tableau 28 : Classification NAF au 1 ^{er} niveau source : INSEE	272
Tableau 29 : Évolution des déplacements par motif Source : Insee - SOeS - Inrets, enquêtes nationales transports et communication 1993-1994, transports et déplacements 2007-2008. (Hubert, 2009)	274
Tableau 30 : Test de la relation entre le type-morphologique et les autres indices morphologiques de durabilité (Sevenet, 2013).	277
Tableau 31 : Comparaison du nombre de pièces par IRIS en fonction du peuplement (Sevenet, 2013)	286
Tableau 32 : Synthèse des indices des IRIS « attractifs » (Sevenet, 2013)	305
Tableau 33 : Synthèse des indices des IRIS « répulsifs » (Sevenet, 2013).	305
Tableau 34 : Comparaison des indicateurs proposés dans ce travail et ceux existants (Sevenet, 2013)	312

Liste des équations

Équation 1 : la distance standard définie par R. Bachi (Fusco, 2003).....	101
Équation 2 : Indice de Landsberg (CSTB cité par Maignant, 2002).....	104
Équation 3 : Indice de rugosité ou de sensibilité aux différents fluides (Sevenet, 2013).	268
Équation 4 : Indice de végétalisation (Sevenet, 2013).....	271
Équation 5 : Indice de surpeuplement (Sevenet, 2013).....	271
Équation 6 : Indice de diversification sectorielle	273
Équation 7 : Indicateur de mixité sociale (Sevenet, 2013).....	273
Équation 8 : Indicateur mesurant la part des actifs travaillant et résidant au sein d'une même ville (Sevenet, 2013)	274
Équation 9 : Indicateur mesurant la part des actifs se déplaçant en TC (Sevenet, 2013)	275
Équation 10 : Indice de compacité 3D.....	278

Liste des graphiques

Graphique 1 : Les nouveaux bâtiments résidentiels en fonction de l'altitude et des pentes (Sevenet, 2013).	216
Graphique 2 : Distribution statistique des variables hauteur et surface (Sevenet, 2013).	222
Graphique 3 : Distribution des Indices de Moran de la hauteur et de la surface des bâtiments (Sevenet, 2013).	228
Graphique 4 : Résultats de l'analyse granulométrique selon quatre formes d'élément structurant (Sevenet, 2013).	236
Graphique 5 : Fréquences cumulées des éléments supprimés à chaque itération (Sevenet, 2013).	236
Graphique 6 : Fréquences cumulées des bâtiments en fonction du nombre d'étages (Sevenet, 2013).	237
Graphique 7 : Analyse de la connexité des bâtiments de Nice (Sevenet, 2013).	239
Graphique 8 : Fréquences cumulées des modalités des indicateurs complexité 2D et 3D (Sevenet, 2013).	241
Graphique 9 : Fréquences cumulées des modalités de la variable volume (Sevenet, 2013).	241
Graphique 10 : Arbre de classification de la 1 ^{ère} typologie (Sevenet, 2013).....	246
Graphique 11 : Durabilité des IRIS « attractifs » (Sevenet, 2013)	307
Graphique 12 : Durabilité des IRIS « répulsifs » (Sevenet, 2013).....	309

Bibliographie

- Aalborg**, 2004, *Les engagements d'Aalborg*, Conseil des Communes et Régions d'Europe, 9p.
- AGAM**, 2005, *Densité et formes urbaines dans la métropole marseillaise*, Marseille, ed. Imbernon, Marseille, 191p.
- Allain R.**, 2004, *La morphologie urbaine*, Paris, ed. Armand Collin, col. U, 256 p.
- Antoni J-P**, Thévenot J, 2005, « Modélisation et prospective territoriale, La démarche du SCOT de Montbéliard appuyée sur le modèle CWS », in Sign@ture, la lettre d'informations géographiques, CERTU, n°31, pp.12-19
- Architecture et Comportement**, 1991, « Qualification sonore des espaces publics urbains », Lausanne, vol. 7, n°1, 82p.
- Ascher F.**, 2008, *Les nouveaux principes de l'urbanisme*, Paris, ed. L'Aube, 109p.
- Aubrée L.**, Bonduelle A., Métivier S., 2011, *Lille Bas Carbone*, Rapport du programme de recherche « Repenser la ville dans une société post-carbone », Septembre 2011, 104p. http://ville-post-carbone.typepad.com/files/lillebas carbone_rapport_final_logos.pdf (15-03-2013)
- AURAN**, 1998, *Evaluation socio-économique du tramway : synthèse d'étude*, DISTRICT de l'Agglomération Nantaise, Agence d'étude URbaine de l'Agglomération Nantaise, 60p. <http://www.auran.org/download/75.98.pdf> (15-03-2013)
- AURAN**, 2005, *Quartiers de villes. Quartiers de vies. Habitat et formes urbaines*, Agence d'étude URbaine de l'Agglomération Nantaise, 35p.
- AURBA**, 2002, « Densités et formes urbaines dans l'agglomération bordelaise : La ville habitée », Agence d'Urbanisme de Bordeaux Métropole Aquitaine, in *Les cahiers techniques de l'agence d'urbanisme de Bordeaux Métropole Aquitaine*, 13p.
- Augoyard J-F.**, 1995, « L'environnement sensible et les ambiances architecturales » in *Espaces Géographiques* n°4, pp.302-318
- Avargues M.**, et Alii, 1972, *Nuisances dues aux activités industrielles. Précis général des nuisances*, Saint-Amand, ed. Guy Le Prat, 363p.
- Bachelet B.**, 1998, *L'espace*, Paris, ed. PUF, col. Que sais-je ?, 127p.
- Badariotti D.**, 2005, « Auto-similarité et auto-référence en urbanisme », in *12èmes journées de Rochebrune*, Paris, Ecole nationale supérieure des télécommunications, pp.1-9
- Bailly A.** et Alii, 2001, *Les concepts de la géographie humaine*, Paris, ed. Masson, 333p.
- Bailly E.**, 1999, *Modèle de simulation fractal et croissance urbaine : étude de cas : Nice, Marseille, Gênes*, Thèse de doctorat en Géographie, Université de Nice Sophia Antipolis, 235p.

- Balaÿ O.**, Buffet V., 2001, « DAQUAR, Du diagnostic acoustique d'un quartier à l'urbanité sonore » in *Echo Bruit*, N°97, pp.46-50
- Balibar F.**, 1994, *Galilée, Newton lus par Einstein, espace et relativité*, Paris, ed. PUF, col. Philosophies, 127p.
- Banos, A.**, 2001, *Le lieu, le moment, le mouvement. Pour une exploration spatio-temporelle désagrégée de la demande de transport en commun en milieu urbain*, Thèse de doctorat en Géographie, Université de Franche-Comté, 356p.
- Banos A.**, Thevenin T., 2008, « Création de champs de potentiel et simulation d'itinéraires à partir de l'enquête ménages-déplacements », in *Information géographique et dynamiques urbaines*, sous la dir. de Thériault M. et Des Rosier .M, ed Hermès, col. Traité IGAT, 352p.
- Barraqué B.**, Theys J., (dir.), 1988, « La lutte contre le bruit en France », in *Les politiques d'environnement. Évaluation de la première génération : 1971-1995*, Paris, ed. Recherches, 391p.
- Basile M.**, Bordin P., 2005, « Méthode d'analyse de l'ambiance urbaine à l'aide d'un SIG », in *Colloque Liège 2005*, 4p.
- Batty M.**, Longley P., 1994, *Fractal cities, A Geometry of Form and Function*, Londres, ed. Academic Press, 394p.
- Batty M.**, Longley P., 1996, *Spatial Analysis : Modelling in GIS environment*, ed. John Wiley and Sons, 392p.
- Batty M.**, Dodge M., Jiang B., Smith A., 1998, "GIS and Urban Design " in *Working papers series*, paper 3, Londres, 31p. <http://www.bartlett.ucl.ac.uk/casa/latest/publications/working-papers> (15-03-2013)
- Batty M.** et *Alii*, 2000, "Visualizing the city: Communicating Urban Design to Planners and Decision-Makers" in *Working papers series*, paper 26, Londres, 38p. <http://www.bartlett.ucl.ac.uk/casa/publications/working-paper-26> (15-03-2013)
- Batty M.**, Hudson-Smith A., 2005, "Urban Simulacra London", in *Architecture Design*, Vol. 75 (6), Londres, pp.42-47. <http://www.casa.ucl.ac.uk/andy/papers/VL.pdf> (15-03-2013)
- Bavoux J-J.**, 1998, *Introduction à l'analyse spatiale*, Paris, ed. Armand Colin, col. Synthèse, 95p.
- Béaur G.**, 1999, « Introduction ». In: *Histoire et Mesure*, 1999 vol.14, n°3-4. Habitat et espace urbain. pp. 215-220.
- Beaujeu-Garnier J.**, 1995, *Géographie urbaine*, Paris, ed. Armand Colin, 349p.
- Bejan A.**, Lorente S., 2006, *La loi constructale*, Paris, ed. L'Harmattan, col. Epistémologie et philosophie des sciences, 109 p.

- Bertaud A.**, 2004, “The Spatial Organization of Cities: Deliberate Outcome or Unforeseen Consequence?” in *IURD Working Paper Series*, 33p.
<http://escholarship.org/uc/item/5vb4w9wb> (15-03-2013)
- Billen R.**, Zlatanova S., 2003, “3D spatial relationships model: A useful concept for 3D cadastre?”, in *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 27, pp.209-229.
- Bordin P.**, 2006, *SIG : concepts, outils et données*, Paris, ed. Hermès Lavoisier, 259p.
- Boutot A.**, 1993, *L'invention des formes*, Paris, ed. O. Jacob, col. Philosophie, 376p.
- Boutot A.**, 2008, « Sciences » in *Sciences et Philosophie*, Encyclopédie Universalis, <http://www.universalis.fr/>
- Bouyer J.**, 2009, *Modélisation et simulation des microclimats urbains. Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments*, Thèse de doctorat en Sciences pour l'ingénieur, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes, 324p.
- Botte M-C.**, Chocholle R., 1984, *Le Bruit*, Paris, ed. PUF, col. Que sais-je ? , n°885, 125 p.
- Boutefeu, E.**, 2011, *La nature en ville : rôle du végétal vis-à-vis de la qualité de la vie, la biodiversité, le microclimat et les ambiances urbaines*, CERTU, 17-01-2011, http://www.certu.fr/fr/_Ville_et_environnement-n29/Nature_en_ville-n140/La_nature_en_ville_:_role_du_vegetal_vis_a_vis_de_la_qualite_de_la_vie,_la_biodiversite,_le_microclimat_et_les_ambiances_urbaines-a2008-s_article_theme.html (15-03-2013)
- Brunet R.**, Bertrand G., 1975, « Il y a toujours des Pyrénées » in *Découvrir la France*, Paris, Larousse, n° 93, pp. 1-20
- Brunet R. et Alii**, 1996, *Les mots de la géographie, dictionnaire critique*, Paris, ed. Reclus – La documentation française, col. Dynamique du territoire, 518p.
- Burgel G.**, Alii, 1988, « Formes urbaines » in *Ville en parallèle*, n°13-14, 389p.
- Burton E.**, 2000, « The Compact City: Just or Just Compact? A Preliminary Analysis » in *Urban Studies*, Vol. 37, n°11, pp 1969 – 2001.
- Calvet M.**, 2010, *Coûts et avantages des différentes formes urbaines - Synthèse de la littérature économique*, Paris, Commissariat Général au Développement Durable, col. Etudes et document du Service de l'Economie, de l'Evaluation et de l'Intégration du Développement Durable, 32p.
- Carneiro C. et Alii**, 2009, “GIS and LIDAR Data Analysis for the Integration of Multidimensional Indicators on Urban Morphogenesis Multi-agent Vector Based Geosimulation” in *Geocomputation and Urban Planning*, Murgante B., Brruso G., Lapucci A., Springer, Berlin, pp.187-207.
- CASA**, 2007, *Plan de Déplacement Urbain de la Communauté de Antibes Sophia Antipolis*, Communauté d'Agglomération de Sophia-Antipolis, 277p.

http://www.pdu-casa.fr/document_pdu_arrete.html

Castel J-C., 2005a, « Le marché favorise t-il la densification ? Peut-il produire l'habitat alternatif à la maison individuelle ? » in *Colloque ADEF*, 15p.

Castel J-C., 2005b, « Les couts de la ville dense ou étalée », Paris, in *Les Etudes Foncières*, ADEF, n°119, 8p.

CCTS, 2010, Centre Canadien de Télédétection Spatiale, <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/>

CERTU, 2006, *De la qualité de vie au diagnostic urbain : vers une nouvelle méthode d'évaluation, le cas de la ville de Lyon*, Rapport d'étude, 131p.

CERTU, 2012, « La mobilité urbaine en France. Principaux enseignements des années 2000-2010 », Paris, Mobilité et Transport, *Le point sur...*, n°23, 8p.

Cervero R., Kockelman K., 1997, "Travel demand and the 3Ds: density, diversity and design" in *Transportation Research part D*, vol. 2, No.3, pp. 199-219

CETE, 2004, *La densité des formes du développement résidentiel*, Paris, ed. CERTU, col. Aménagement et Urbanisme. 52 p.

Chadule, 1997, *Initiation aux pratiques statistiques en géographie*, Paris, ed. Armand Colin, Col. U, 203 p.

Charles L., et *Alii*, 2007, « Les multiples facettes des inégalités écologiques », in *Développement durable et territoire*, Dossier 9 : Inégalités écologiques, inégalités sociales, <http://developpementdurable.revues.org/3892> (15-03-2013)

Charleux L., 2005, « GWR, MAUP et lissage par potentiels », in *Revue Internationale de Géomatique*, Vol. 15/2, pp.195-209.

Chaline C., 1999, *La régénération urbaine*, ed. PUF, col. Que sais-je ?, n°3496, 198p.

Chamboredon J-C, **Lemaire M**, 1970, « Proximité spatiale et distance sociale. Les grands ensembles et leur peuplement », in *Revue française de sociologie*, 11-1, pp. 3-33.

Charlot-Valdieu C., 1999, « La ville et le développement durable2 », in *Cahier du CSTB*, Janvier- Février, 70p. <http://www.box.net/shared/glg1ny9zce> (15-03-2013)

Charre J., 1995, *Statistique et territoire*, Montpellier, ed. GIP Reclus, col. Espaces modes d'emploi, 119 p.

Charre J., 1996, « L'humain et l'inhumain. Le Naturel, le Physique et le Social. À la recherche de l'espace perdu » in *Géopoint*, Avignon, Groupe Dupont, , pp. 91-93.

Charre J., 2004, *Déclaration de politique scientifique du contrat quadriennal de l'UMR ESPACE*, Avignon

- Chehata N.**, 2002, « Interprétation de scènes urbaines à partir d'images satellitaires THR : reconstruction de facettes 3D et optimisation globale 3D » in *Bulletin d'Information de l'IGN*, Paris, n° 73, vol.3, 12p.
- Clanché F.** ; Rascol O., 2011, « Le découpage en unités urbaines de 2010 » in *INSEE PREMIERE*, n°1364, Août 2011, 4p., www.insee.fr/fr/ffc/ip1364/ip1364.pdf
- Cluzet A.**, 2007, *Ville libérale, ville durable ? Répondre à l'urgence environnementale*, Paris, ed. L'aube, col. Monde en cours, 189p.
- CNRTL**, 2010, Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales, <http://www.cnrtl.fr/>
- Grand Avignon** (Communauté d'agglomération), 2009, « Formes urbaines ? Bâti, construction, typologie, mixité, densité, urbanisation. » in *Guide du PLH*, Avignon, Fiche n°7, 4p.
- Compagnon R.**, 2004, “Solar and daylight availability in the urban fabric” in *Energy and Buildings*, Vol. 36, pp.321–328
- Couch C.**, Karecha J., Nuissl H., Rink D., 2005, “Decline and sprawl: an evolving type of urban development – observed in Liverpool and Leipzig” in *European Planning Studies*, Vol.13, No.1, pp.117-136
- Coudroy de Lille L.**, 1998, « Histoires des formes urbaines ou formes d'une histoire urbaine » in *Techniques, Territoires et Sociétés*, n°35, 9p. http://urbanisme.u-pec.fr/servlet/com.univ.collaboratif.utils.LectureFichiergw?ID_FICHER=1259766016579. (15-03-2013)
- Crozet Y.**, Mercier A., Ovtracht N., 2007, « Distance spatiale, distance sociale... L'accessibilité peut-elle se substituer à la mixité? », in *Territoires 2030*, vol. 4, DIACT, ed. La Documentation française, pp 67-76.
- Dauphiné A.**, Voiron-Canicio Ch., 1986, *Variogrammes et structures spatiales*. Montpellier, ed. Reclus, 56 p.
- Dauphiné A.**, 1995, *Chaos, fractales et dynamiques en géographie*, Montpellier, ed. GIP Reclus, col. Espaces modes d'emploi, 135p.
- Dauphiné A.**, 2003, *La théorie de la complexité chez les géographes*, Paris, ed. Economica, col. Géographie, 248p.
- De Cambray B.**, 1994a, “Multidimensionnal (2D, 2.5D, 3D) geographical model” in *International Conference on management of data*, Minneapolis, 20p.
- De Cambray B.**, 1994b, *Etude de la Modélisation de la Manipulation et de la Représentation de l'Information Spatiale Tridimensionnelle dans les Bases de Données Géographiques*, Thèse de doctorat en Informatique, Université Paris VI, 212p.

- De La Losa A.**, 2000, *Modélisation de la troisième dimension dans les bases de données géographiques*, Thèse de doctorat en Sciences de l'Information Géographique, Université de Marne La Vallée, 174p.
- Diebolt W.**, et *Alii*, 2005, *Les inégalités écologiques en milieu urbain*, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Rapport général de l'inspection générale de l'environnement, IGE/04/022, 68 p.
- Dongtan**, 2010, « Mais où est passée l'éco-ville modèle de Dongtan ? » in *Aujourd'hui, la Chine* rubrique ACTUALITÉS > ACTUALITÉS : News et informations sur la Chine, article paru le 16 février 2010. <http://www.aujourdhuilachine.com/actualites-chine-mais-ou-est-passee-l-eco-ville-modele-de-dongtan--13718.asp?1=1> (15-03-2013)
- Drodz C.**, Meunier V., Simonnot N., Amphoux P., 2008, « Les ambiances dans la conception architecturale : une « histoire » de représentations », in *Faire une ambiance creating an atmosphere*, Grenoble, 7p.
- Dugrand R.**, Ferras R., 1975, « Grands Causses, Gorges du Tarn », in *Découvrir la France*, Paris, Larousse, n° 69, pp. 62-79
- Dupuy G.**, 1991, *L'urbanisme des réseaux, théories et méthodes*, Paris, ed. Armand Colin, 198p.
- Durand M-F.**, Lévy J., Retailé D., 1993, « Espaces-monde, mode d'emploi », in *Le monde, espaces et systèmes*, Dalloz, Presses de la fondation nationale des sciences politiques, pp19-44
- Dutozia J.**, 2004, *Mixité sociale et développement durable des espaces urbains. Interactions, contradictions, conciliation. Application à la ville de Nice* ; Mémoire de Maîtrise, Université de Nice Sophia Antipolis, 94p.
- Emelianoff C.**, 2002, *Comment définir une ville durable*, <http://base.d-ph.info/en/fiches/dph/fiche-dph-8294.html> (15-03-2013)
<http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/agenda21/intro/emelia.htm>
- Emelianoff C.**, 2004, « Les villes européennes face au développement durable : une floraison d'initiatives sur fond de désengagement politique », in *Cahiers du PROSES*, n° 8, 27 p.
- Emelianoff C.**, 2008, « Pour un partage de la fabrique urbaine » in *Urbanisme*, Dossier : la ville durable en question(s), pp. 45-47
- Encyclopédie Universalis**, <http://www.universalis.fr/>
- Espaces et sociétés**, 2005, *Le sens des formes urbaines*, ed. CNRS et CNL , n°4, 240 p.
- Ferras R.**, 1991, *Ville, paraître, être à part*, Montpellier, ed. GIP Reclus, col. Géographie, 143p.
- Fleuret S.**, et *Alii*, 2004, *Peut-on prétendre un espace de qualité et de bien-être ?*, Angers, actes du colloque du 23 et 24 septembre, 100 p.

Flitti M., Piobini A., 2003, « Morphologie urbaine et mobilité pédestre. Identification des configurations spatiales déterminant les caractères locaux des déplacements piétonniers », 6^{ème} Rencontres de Théo Quant., Besançon, 8p.

Florentin D., Fol S. et Roth, H., 2009, « La "Stadtschrumpfung" ou "rétrécissement urbain" en Allemagne : un champ de recherche émergent » in *Cybergeo : European Journal of Geography*, Espace, Société, Territoire, article 445, mis en ligne le 26 mars 2009, <http://cybergeo.revues.org/22123>, (15-03-2013)

FNAU, 2004, « Les valeurs de la ville. Ville dense/ville étalée, 25^{ème} Rencontre nationale des agences d'urbanisme : les actes » in *Revue Urbanisme*, Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme, 70p.

FNAU, 2005, « Du désir de bien-être urbain à la mesure de la qualité de vie, peut-on évaluer le bonheur territorial » in *Les dossiers de la FNAU*, n°19, Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme, 5p.

FNAU, 2006, *Habitat, formes urbaines : Densités comparées et tendance d'évolution en France*, Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme, 276p.

Foley J.D., Van Dam A., Feiner S., Hughes J.F., Philipps R.L., 1995, *Introduction à l'infographie*, Paris, Addison-Wesley France, 573p.

Forriez M., Martin P., 2006a, « De l'utilité de la théorie de la relativité d'échelle de L. Nottale en géographie. Partie 1 : Recherche d'un modèle scalaire spatio-temporel », Colloque Géopoint, 2006, *Demain la géographie*, Avignon, juin 2006, Groupe Dupont et UMR ESPACE 6012 du CNRS, Brouillons Dupont, pp. 297-303

Forriez M., Martin P., 2006b, « De l'utilité de la théorie de la relativité d'échelle de L. Nottale en géographie. Partie 2 : Application d'un modèle scalaire spatio-temporel », Colloque Géopoint 2006 : Demain la géographie, Avignon, juin 2006, Groupe Dupont et UMR ESPACE 6012 du CNRS, Brouillons Dupont, pp. 305-312

Forriez M., Martin P., Nottale L., 2009, « Formalisation de trois lois d'échelle permettant de quantifier des structures spatiales ponctuelles, linéaires ou surfaciques : exemples de transitions fractal – non fractal en géographie », ThéoQuant 2009, Colloque tenu les 4-6 mars 2009, Besançon, 18p.

Forriez M. et Alii, 2010, « Lois d'échelle et transitions fractals– non fractal en géographie » in *L'Espace géographique*, Tome 2, Vol. 39, pp.97-112.

Fouchier V., Merlin P., 1994, « Les fortes densités urbaines : une solution pour nos villes ? », in *French Advances and Communication on Technology and Science*, Service Culturel du Consulat général de France à Hong-Kong, 76 p.

- Frankhauser P**, Genre-Grandpierre C, 1998, « La géométrie fractale - Un nouvel outil pour évaluer le rôle de la morphologie des réseaux de transport public dans l'organisation spatiale des agglomérations », *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, n°33, pp41-78.
- Frankhauser P**, Gilon P, Moine A, Tannier C, 1996, « Vers une nouvelle approche pour simuler l'influence du comportement des agents sur l'évolution du tissu urbain », XXXII^{ème} colloque de l'ASRDLF, Berlin, 20p.
- Frankhauser P**, Mille M-N, Bäck T, 1995, « Un modèle pour simuler l'impact d'un projet d'aménagement sur la dynamique urbaine », congrès Urban Utopia, Berlin, 27p.
- Frankhauser P. et Alii**, 2003, *Modélisation des villes émergentes en Europe à travers les analyses fractales*, Rapport de recherche THEMA – MEDTL – PUCA, Besançon, 242p.
- Franz P.**, 2004, “Shrinking Cities. Shrinking Economy ? The Case of East Germany”, in *German Journal of Urban Studies*, Vol.43, No.1, 23p.
- Frédéric B.**, Daniel S., Bédard Y., Papanoditis N., 2008, « Saisie semi-automatique de bâtiments 3D dans une BDRM », in *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 18, n°1, pp67-94.
- Fuchs F.**, Jibrini H., Maillet G., Papanoditis N., Deseilligny M-P., Taillandier F., 2002, « Trois approches pour la construction automatique de modèles 3-D de bâtiments en imagerie aérienne haute résolution » in *Bulletin d'Information de l'IGN*, Paris, n° 73, vol.3, 10p.
- Fusco G.**, 2003, *Un modèle systémique d'indicateurs pour la durabilité de la mobilité urbaine : les cas de Nice et Gênes dans une comparaison internationale*, Thèse de doctorat de Géographie, Université de Nice Sophia Antipolis, 728p.
- Garat I.**, Gravari-Barbas M., Veschambre V., 2008, « Préservation du patrimoine bâti et développement durable : une tautologie ? Les cas de Nantes et Angers », in *Développement durable et territoires*, Dossier 4 : La ville et l'enjeu du Développement Durable, <http://developpementdurable.revues.org/index4913.html>
- Genre-Grandpierre C.**, Foltête J-C, 2003, « Morphologie urbaine et mobilité en marche à pied », 3^{ème} colloque du Groupe de Travail Mobilités spatiales et fluidité sociale (GT23) : *Offre urbaine et expériences de la mobilité*, Strasbourg, 20-21 et 22 mars 2003, 22p.
- GeOpenSim**, 2011, <http://geopensim.ign.fr/> (15-03-2013)
- George P.**, 1936, « L'emploi des blocs-diagrammes dans l'enseignement de la géographie », in *L'information géographique*, Vol. 1, n°1-2, pp. 73-75
- George P.**, 1974, « Espace géographique, analyse géographique, géographie sociale, géographie politique et géographie humaine », in *Annales de Géographie*, vol. 83, n°460, pp. 729-733.
- Godard O.**, 1996, « Le développement durable et le devenir des villes : bonnes intentions et fausses bonnes idées », in *Futuribles*, Paris, pp.29-35

- Gordon P.**; Richardson H-W., 1997, "Are compact cities a desirable planning goal?" in *American Planning Association. Journal of the American Planning Association*; n° 63-1, Academic Research Library, pp.95-106
- Groleau D.**, Woloszyn P., 1999, « Traitement des données géométriques pour la simulation des phénomènes physique des ambiances urbaines », Ecole thématique, La modélisation de la ville 2, Nantes, p.
- GTMG**, 2010, Groupe de Travail en Modélisation Géométrique, <http://newlsiit.u-strasbg.fr/gtmg2012/index.php/Accueil> (15-03-2013)
- Guermont, Y.** (dir.), 2005, *Modélisations en géographie, déterminismes et complexités*, Paris, Hermès – Lavoisier, Information Géographique et Aménagement du Territoire - Traité IGAT, 392p.
- Guérois M.**, 2003, *Les formes des villes européennes vues du ciel. Une contribution de l'image CORINE à la comparaison morphologique des grandes villes d'Europe occidentale*, Thèse de doctorat de Géographie, Université de Paris I, 310 p.
- Guérois M.**, 2008, « Les formes des villes européennes vues du ciel », *Journées ESIU*, Paris, 21 mars 2008, 17p.
- Guillaume P.**, 1979, *La psychologie de la forme*, Paris, Flammarion, 258 p.
- Gumuchian H.**, 2000, *Initiation à la recherche en Géographie : aménagement, développement territoriale et environnement*, Paris, Anthropos, Economica, 424 p.
- Gutschner M.**, Nowak S., 1998, *Potentiel Photovoltaïque dans le Canton de Fribourg*, Rapport technique, 7p., <http://www.netenergy.ch/pdf/fribourg.pdf> (15-03-2013)
- Gutschner M.**, Nowak S., 2004, *Le Potentiel Solaire dans le Canton de Genève*, Rapport technique, 48p. http://www.netenergy.ch/pdf/potentiel_solaire_geneve.pdf (15-03-2013)
- Haggett P.**, 1973, *L'analyse spatiale en Géographie humaine*, Paris, A. Colin, 390p.
- Harouel J-L.**, 1981, *Histoire de l'urbanisme*, Paris, PUF, Que sais-je ?, n°1892, 127p.
- Houot H.**, 2004, « Les déplacements pédestres Besançon », in *Image de Franche-Comté*, n°30, 14-17 pp.
- Hubert J-P.**, 2009, « Dans les grandes agglomérations, la mobilité quotidienne des habitants diminue, et elle augmente ailleurs » in *INSEE Première*, n°1252, 4p., http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?ref_id=ip1252 (15-03-2013)
- Huyghe R.**, 1971, *Formes et forces : de l'atome à Rembrandt*, Paris, Flammarion, 443p.
- Hypergé**, 2010, <http://www.hypergeo.eu/>
- IAAT**, 2003, *Cahier méthodologique sur la mise en œuvre d'un SIG*, Institut Atlantique d'aménagement des territoires, Futuroscope Chasseneuil, 34p.

- INTERFACES** (Groupe de recherche), 2008, « L'interface : contribution à l'analyse de l'espace géographique », in *L'Espace géographique*, 2008/3, Tome 37, pp.193-207.
- IAURIF**, 2005a, « Appréhender la densité, 1. Les repères historiques », in *Note rapide sur l'occupation du sol*, n°382, Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Ile de France, 6p.
- IAURIF**, 2005b, « Appréhender la densité, 2. Les indicateurs de densité », in *Note rapide sur l'occupation du sol*, n°383, Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Ile de France, 4p.
- IAURIF**, 2005c, « Appréhender la densité, 3. Formes urbaines et densité », in *Note rapide sur l'occupation du sol*, n°384, Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Ile de France, 6p.
- IAU**, 2009, *Densité. Opérations de logements et quartiers urbains*, Institut d'Aménagement et d'Urbanisme, Paris, 95p.
- IEA**, 2002, *Potential for Building Integrated Photovoltaics*, Report in Photovoltaic power systems programm, International Energy Agency, 12p.
- IGN**, 2001, « Le Référentiel à Grande Echelle » in *IGN magazine*, N°6 , 13p.
- IGN**, 2010a, *Bati-3D®*, une modélisation 3D des zones urbaines, IGN, Paris, 2p.
<http://professionnels.ign.fr/ficheProduitCMS.do?idDoc=5289831>
- IGN**, 2010b, Institut Géographique National, <http://seig.ensg.ign.fr>
- Isnard H.**, Racine J-B., Reymond H., 1981, *Problématiques de la géographie*, Paris, Puf, Le géographe, 262p.
- Izquierdo S.**, Rodrigues M., Fueyo R., 2008, “A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations” in *Solar Energy*, Vol. 82 – 10, pp.929-939.
- Jauneau Y.**, Raynaud E., 2009, *Des disparités importantes d'évolutions de niveau de vie*, Paris, INSEE, 20p., http://www.insee.fr/fr/ffc/docs_ffc/ref/revpmen09c.PDF (15-03-2013)
- Jarroush J.**, Even-Tzur G., 2004, “Constructive Solid Geometry as the Basis of 3D Future Cadastre” in *Fédération Internationale des Géomètres (FIG)*, Athènes, 14p.
- Joliveau T.**, 2003, « Analyse des paysages dans un contexte d'aménagement. L'intérêt des outils géomatiques » in *Géoévénement 2003*, Paris, 7p
<http://pagesperso-orange.fr/thierry.joliveau/Biblio/Geoevenement%202003.pdf> (15-03-2013)
- Joliveau T.**, 2004, *Géomatique et gestion environnemental du territoire. Recherche sur un usage géographique des SIG*, Habilitation à Diriger de Recherches, Université Jean Monet Saint-Etienne, 500p.

Joliveau T., 2005, « Voir le monde comme il paraît ou les enjeux des visualisations réalistes dans la gestion territoriale », in *Paysages et valeurs, de la représentation à la simulation, Colloque pluridisciplinaire international*, Limoges, 13p.

<http://pagesperso-orange.fr/thierry.joliveau/Biblio/Limoge2005Joliveau.pdf> (15-03-2013)

Kant E., 2006, *Critique de la raison pure*, Paris, Flammarion, GF, 749p.

Kéfi S., 2012, « Des écosystèmes sur le fil : Comment certains écosystèmes basculent d'un état à un autre » in Société Française d'écologie, Regards et débats, www.sfecologie.org/regards/2012/10/19/r37-hysteresis-sonia-kefi/

Koehl M., Meyer E., Koussa C., Lott C., 2008, « SIG 3D et 3D dans les SIG : Application aux modèles patrimoniaux » in *GéoEvènement 2008*, Paris, 15p.

Koomen E., Kaufholz R., Rietveld P., Scholten H., 2004, *3D-Gis and Urban volum: Applying the third dimension in a morphological study of Amsterdam urban Landscape*, 7th AGILE Conference on Geographic Information Science", Heraklion, 9p.

Korsu, E., Massot, M.-H., Orfeuill, J.-P., 2009, *Le concept de Ville cohérente : réponse aux débats entre ville étalée et ville compacte et étalée*, Paris, Ademe, Rapport final PREDIT Groupe Opérationnel n°1,

Lachance B., Bédard K., Pouliot J., Kirkwood D., 2004, *La modélisation 3D : Application à la Géologie*, Colloque national Géomatique de l'ACSG-CIG, Montréal, 15p.

Lachance B., 2005, *Développement d'une structure topologique de données 3D pour l'analyse de modèles géologiques*, Maîtrise ès sciences, Université de Laval, Québec, 116p.

Lafarge F., Descombes X., Zerubia J., Pierrot-Deseilligny M., 2005, « Modèle paramétrique pour la reconstruction automatique en 3D de zones urbaines denses à partir d'images satellitaires haute résolution » in *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection (SFPT)*, Vol. 180, pp 4-12.

Lafarge F., Descombes X., Zerubia J., Pierrot-Deseilligny M., 2006, "An Automatic Building Reconstruction Metho: A Structural Approach Using High Resolution Images" in *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Atlanta, USA, 4p.

Lafarge F., Descombes X., Zerubia J., Pierrot-Deseilligny M., 2008, "Automatic building extraction from DEMs using an object approach and application to the 3D-city modeling" in *Journal of Photogrammetry et Remote Sensing*, Vol. 63, Issue 3, pp 365-381.

Lampin, C. et Alii. (co-dir.), 2010, *Géographie des Interfaces*, ed. Quae, col. Sciences & Technologies Update, 165p.

Larrivée, S., Y. Bédard et J. Pouliot, 2006, « Fondement de la modélisation conceptuelle des bases de données géospatiales 3D » in *Revue internationale de géomatique*, Vol. 16, n° 1, pp. 9-28

Lebeau R. 2004, *Les grands types de structure agraire dans le monde*, Masson, Paris, 184p.

- Le Berre M.**, 1986, *De l'induction à la modélisation systémique en géographie*, Thèse de doctorat en Géographie, Université de Besançon, 560p.
- Le Bras H.**, 1995, « La densité a-t-elle une influence sur les comportements sociaux ? Des échelles territoriales différentes » in *Les Annales de la Recherche Urbaine*, n°67, pp.15-22
- Le Jeannic T.**, 2007, « On pardonne tout à son quartier sauf... l'insécurité, les dégradations, le bruit », in *INSEE PREMIERE*, N° 1133, 4p.
- Lefèvre P.**, 2008, *Voyages dans l'Europe des villes durables* », La Défense, PUCA/CERTU, Col. Recherche, 395 p.
- Lévy J.**, 1997, « L'espace légitimé », in *L'état de la géographie. Autopsie d'une science*, dir Knafou R., Paris, Belin, Col. Mappemonde, 438p.
- Lévy J., Lussault M.**, (dir), 2003, *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*, Paris, Belin, 1033p.
- Lévy T.**, 1987, *Figures de l'infini. Les mathématiques au miroir des cultures*, Paris, Seuil, Science ouverte, 135p.
- L'Information géographique**, 2007, *Développement durable*, Paris, Armand Colin, Vol.71, n°3, 98p.
- Loubier J-C.**, 2004, *Perception et simulation des effets du changement climatique sur l'économie du ski et la biodiversité (Savoie et Haute-Savoie)*, Thèse de Doctorat en Géographie, 298 p., http://tel.ccsd.cnrs.fr/documents/archives0/00/00/69/90/index_fr.html (15-03-2013)
- Lussault M.**, 2003, « L'espace avec les images », in Debarbieux B. et Lardon S., *Figures du projet territorial*, éditions de l'Aube, pp. 29-60.
- Lussault M.**, 2007, « Les mondes spatiaux du web » in *Revue Urbanisme*, n°357, pp. 69-72.
- Maby J. et Alii**, 2003, *Objets et indicateurs géographiques*, Avignon, Actes Avignon, n°5, 316p.
- Mahfoud I., Josselin D., Fady B.**, 2007, "Effect of the aggregation process on the diversity assessment: toward the 'pertinent scale'" in *10th AGILE International Conference on Geographic Information Science*, Aalborg University, Denmark, 7p. http://agile.gis.geo.tu-dresden.de/web/Conference_Paper/CDs/AGILE%202007/PROC/PDF/130_PDF.pdf; (15-03-2013)
- Mahfoud I., Josselin D., Fady B.**, 2007, « Sensibilité des indices de diversité à l'agrégation » in *Revue Internationale de Géomatique*, Vol 17/3-4, pp.293-308
- Maignant G.**, 2002, *Pollution et développement durable des villes françaises : étude de cas : Nice, Marseille, Lyon et Paris*, Thèse de Doctorat de Géographie, Université de Nice Sophia Antipolis, 460p.

- Maignant G.**, 2009, *Réflexion sur l'optimisation en Géographie ou comment penser la « Géographie du mieux »*, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Nice Sophia Antipolis, 149p.
- Maloutas T.**, 2006, « Mobilité sociale et ségrégation à Athènes: Formes de séparatisme social dans un contexte de mobilité spatiale réduite », Cahier Européen du pôle Ville/métropolis/cosmopolis, n°3, 20p.
- Mandelbrot B.**, 1995, *Les objets fractals*, Paris, Flammarion, Champs, 212p.
- Mann F.**, Gatinel D., Morax S., Hoang-Xuan T., 2006, « Modélisation informatique tridimensionnelle de la cavité orbitaire et des paupières », in *Journal Français d'Ophtalmologie*, Volume 29, Issue 4, pp. 381-390
- Martin P.**, 2000, « Quelle dimension du massif karstique de la Sainte-Baume », in *Karstologia*, Vol.1/2000, n°35, pp.13-36.
- Martin P.**, 2008, « L'optimisation en géographie est-elle une optimisation spatiale donc formelle et scalaire ? », in *Actes du colloque « Géopoint »*, Avignon, 2 p.
- Manzanera A.**, 2005, *Cours de morphologie mathématiques*, http://www.ensta-paristech.fr/~manzaner/Cours/IAD/TERI_MorphoMath.pdf
- Masahiko M.**, 2004, "3D-GIS Application for Urban Planning based on 3D City Model", ESRI User Conference Proceedings, 8p.
- Masson Vincent M. et Alii**, 2012, « La Géogouvernance : un concept novateur ? » in *Cybergeog : European Journal of Geography*, Aménagement, Urbanisme, article 587, mis en ligne le 03 février 2012, <http://cybergeog.revues.org/25086>. (15-03-2013)
- Mazzocut-Mis M.**, 1995, « D'Arcy Thompson, la forme et le vivant », in *Alliage*, n°22, <http://www.tribunes.com/tribune/alliage/22/mazz.htm> (15-03-2013)
- Merlin P.**, 2007, *L'urbanisme*, Paris, PUF, Que sais-je n°187
- Moine A.**, 2006, « Le territoire comme un système complexe : un concept opératoire pour l'aménagement et la géographie » in *Espace Géographique*, Vol. 2-2006, pp 115-132
- Moreno D.**, 2009, *Une approche réseau pour l'intégration de la morphologie urbaine dans la modélisation spatiale individu-centrée*, thèse de Doctorat de Géographie, de Pau et des Pays de l'Adour, 208p.
- Morin E.**, 2005, *Introduction à la pensée complexe*, Paris, Seuil, Points essais, 158p.
- Musy M.**, Ramos F., Siret D., Moreau G. et Marenne Ch., 2004, « Développement SIG 3D dédié au diagnostic des potentialités environnementales des bâtiments », XXIIIèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil - VILLE et GENIE CIVIL. 8p.
- Neuman M.**, 2005, « The compact city fallacy », in *Journal of Planning Education and Research*, Vol. 25, pp. 11-26.

- Newman P.**, Kenworthy J. 1989, *Cities and Automobile Dependence. An international Sourcebook*, Sidney, Gower Technical, 388 p.
- Newton I.**, 1995, *De la gravitation suivi de Du mouvement des corps*, Paris, Gallimard, Tel, 261p.
- Niggeler L.**, 2008, « Genève 3D », in *Info D+M*, n°3, Suisse, 3p.
- OBS VILLE**, Observatoire de la ville, Bouygues Immobilier, TNS SOFRES, 2007, *Synthèse du sondage « Elus locaux et quartiers durables : perceptions et expériences »*, 6p.
- Olivier F.**, 2002, *Le marché immobilier à usage résidentiel dans les aires urbaines de Nice et de Montpellier analyse spatiale et modélisation*, Thèse de doctorat de Géographie, Université de Nice Sophia Antipolis, 437p.
- Openshaw S.**, Taylor P.J., 1981 « The modifiable areal unit problem » in Wrigley N., Bennett R.J., *Quantitative geography: a British view*, Londres, Routledge et Kegan Paul, pp.60-69
- Orfeuill J-P.**, Soleyret D., 2002, « Quelles interactions entre les marchés de la mobilité à courte et longue distance ? », in *Recherche Transport Sécurité*, Vol. 76, pp.208-221.
- Ortner M.**, 2004, *Processus Ponctuels Marqués pour l'extraction automatique de caricatures de Bâtiments à partir de Modèles Numériques d'Élévation*, Thèse de doctorat en Sciences, Université de Nice Sophia Antipolis, 252p.
- Pallagst, K.**, et Alii, 2009, *The Future of Shrinking Cities - Problems, Patterns and Strategies of Urban Transformation in a Global Context*, : Berkeley, Center for Global Metropolitan Studies, Institute of Urban and Regional Development, and the Shrinking Cities International Research Network, Monograph Series, 168p.
- Panerai Ph.**, Castex J., Depaule J-C., 2001, *Formes urbaines : de l'îlot à la barre*, Paris, Parenthèse, Eupalinos, 196p.
- Paparoditis N.**, Alii, 2006, « Modélisation 3D automatique terrestre d'environnements urbains et complexes à très grand échelle », Bulletin d'information de l'IGN, n°75, 8p.
- Paquot T.**, 1997, « Qu'est-ce qu'une ville ? », in *Sciences humaines*, n°70, pp.26-27. <http://www.unites.uqam.ca/aep/Paquot.html>
- Paquot T.**, 1999, « Habiter la ville plutôt qu'y résider », in *Le Monde Diplomatique*, pp. 26-27.
- Paquot T.**, Younès C., (dir), 2004, *Géométrie, mesure du monde*, Paris, La Découverte, 284p.
- Paulet J-P.**, 2000, *Géographie urbaine*, Paris, Armand Colin, Col U, 315p.
- Paulet J-P.**, 2005, *Le développement durable*, Paris, Ellipses, Transversal Débats, 188p.
- Péguy Ch.**, 1996, *L'horizontal et le vertical*, Montpellier, Reclus, col. Géographiques, 176p.

- Péneau J-P.**, 1995, « Des densités aux rugosités, les modalités instrumentales d'une transposition », in *Les Annales de la Recherche Urbaine*, n° 67, pp.128-134
- Perret J.**, 2006, Modélisation d'environnements urbains virtuels, Thèse de doctorat en Informatique, Université de Rennes, 160p.
- Piaget J., 1967, *Biologie et connaissance*, Paris, Gallimard, Col. Idées, 540p.
- Pinchemel P.**, 1979, « La nouvelle géographie de Paul Claval » in *Annales de la Géographie*, Vol. 88, n°490, pp. 729 - 733
- Piron O.** 2003, *Renouvellement urbain, analyse systémique*, Paris, La Documentation Française, PUCA, 132p.
- Pirot F.**, 2004. « Du concept HBDS à la geodatabase topologique : 25 ans les séparent » in Conférence ESRI, Issy-les-Moulineaux,
<http://www.esrifrance.fr/sig2004/communications/pirot/pirot.htm> (15-03-2013)
- Poincaré H.**, 1902, *La science et l'hypothèse*, Association de Bibliophiles Universels,
<http://abu.cnam.fr> (15-03-2013)
- Poux X.**, 2011, « Penser l'espace dans une démarche prospective. L'exemple du Saltus » in Séminaire de Géoprospective, 4-5 avril 2011, Ile Sainte Marguerite.
- Prigogine I.**, Stengers I., 1986, *La nouvelle Alliance. Métamorphose de la science*, Paris, Gallimard, Folio essais, 438p.
- Prud'homme R.**, et Alii, 2002, *Développement urbain: les nouvelles contraintes*, Paris, Les rapports de l'Institut Veolia Environnement, 44 p.
- PSIG**, 1994, « Programme en Sciences de l'Information Géographique (PSIG), Axe A2 : Gestion de données géographiques 3D » in *Journées de la Recherche Cassini*, Lyon, France, pp. 11-20.
- Puissant A.**, 2003, *Information géographique et images à très haute résolution : Utilité et applications en milieu urbain*, Thèse de doctorat en Géographie, Université de Strasbourg 1, 447p.
- Puissant A.**, Weber C., 2003, « Les images à très haute résolution, une source d'information géographique en milieu urbain? État des lieux et perspectives » in *L'espace géographique*, Paris, Vol.4, pp. 345-356
- Pumain D.**, Saint-Julien T., 1997, *L'analyse spatiale : 1. Localisation dans l'espace*, Paris, Armand Colin, Col Cursus, 161p.
- Pumain D.**, 1998a, *Les modèles d'auto-organisation et le changement urbain*, Cahier de la Géographie du Québec, vol. 42, n°117, pp. 349-366
- Pumain D.**, 1998b. « La géographie saurait-elle inventer le futur » in *Revue Européenne des sciences sociales*, Tome XXXVI, n° 110, pp.36-69

- Ramos F.**, 2003, *Modélisation et validation d'un système d'information géographique 3D opérationnel*, Thèse de doctorat de Sciences de l'Information Géographique, Université de Marne-La-Vallée, 175p.
- Raynaud D.**, 1999, « Forme urbaine : une notion exemplaire du point de vue épistémologique dans les sciences sociales », in *Langages singuliers et partagés de l'urbain*, Actes du Colloque LOUEST, Paris, L'Harmattan, pp. 93-120.
- Regnauld H.**, 2010, *Le concept d'espace, une approche distanciée*, Editions Universitaires Européennes, 222p.
- Reigner H.**, 2011, « Faut-il lutter contre l'étalement urbain ? » in Note pour le CS, révision du SRADDT PACA, 5p.
- Revue Urbanisme**, 2005, *Les chemins de la démocratie*, Paris, n°342, 98p.
- Revue Urbanisme**, 2007, *Représenter*, Paris, n°357, p.98
- Revue Urbanisme**, 2008, *La ville durable en question(s)*, Paris, n°363, p.98
- Ribeiro O.**, 1968, « En relisant Vidal de la Blache », in *Annales de Géographie*. vol. 77, n°424, pp. 641-662.
- RIG**, 2006, *Information géographique tridimensionnelle*, Revue Internationale de Géomatique, Paris, Hermès – Lavoisier, vol.16, n°1, 134 p.
- Rivière I. et Alii**, 2010, « Un territoire avant-gardiste dans l'application de la Stratégie Nationale de Développement Durable » in *Revue Administration*, octobre 2010.
- Robert S.**, 2007, « Apports et perspectives des données altimétriques à très haute résolution spatiale pour la détermination des paysages visibles en milieu urbain », Atelier du Programme National de Télédétection Spatiale, *La Très Haute résolution Spatiale en Télédétection Urbaine*, Nantes, [Poster]
- Robert S.**, 2009, *La vue sur mer et l'urbanisation du littoral. Approche géographique et cartographique sur la Côte d'Azur et la Riviera du Ponant*, Thèse de doctorat de Géographie, Université de Nice Sophia Antipolis, 458p.
- Roncayolo M.**, 1990, *La ville et ses territoires*, Paris, Gallimard, Folio-essais, N°139, 280p.
- Roncayolo M.**, 1996, *Les grammaires d'une ville : essai sur la genèse des structures urbaines de Marseille*, Paris, Ecole des Hautes études en sciences sociales, Civilisation et société, 567p.
- Roncayolo M.**, 2002, *Lectures de la ville, formes et temps*, Marseille, Parenthèses, EupAliinos, 386p.
- Roulier F.**, 1999, « Pour une géographie des milieux sonores », in *Cybergeog : European Journal of Geography*, 10p., <http://cybergeog.revues.org/index5034.html>

Scherrer F., Vanier M., 2010, *Villes et territoires réversibles*, Colloque organisé au Centre Culturel International de Cerisy-La-Salle, 20-26 septembre 2010.

Science et vie, 2003, « Une théorie explique l'intelligence de la nature », n°1034, 10p.

Sciences et avenir, 2006, « Dongtan, ville écologique », n°178, 4p.

Sénécal G., et *Alii.*, 2005, «Forme urbaine, qualité de vie, environnements naturels et construits. Éléments de réflexion et test de mesure pour la région métropolitaine de Montréal », in *Cahiers de Géographie du Québec*, Vol. 49, n° 136, pp.19-43.

Servigne S., M. Ah Kang, 2000, *SIG pour l'environnement sonore urbain*, in Revue internationale de Géomatique, vol 10, n°3-4, pp. 2-38

Sevenet M., 2004, *La ville dans sa double dimension verticale et horizontale : analyse morphologique le cas de la ville de Nice*, Mémoire de Maîtrise de Géographie, Université de Nice Sophia Antipolis, 97p.

Sevenet M., 2005, *Les transformations attendues sur le bâti urbain dans les villes méditerranéennes : réflexion, méthodologie, géomatique et modélisation*, Mémoire Master 2^{ème} année Recherche « Structures et Dynamiques Spatiales », UMR ESPACE 6012, Université de Nice Sophia Antipolis, 80p.

Shiode N., 2001, "3D urban models: Recent developments in the digital modeling of urban environments in three-dimensions", in *GeoJournal*, n°52, pp.263-269

Silva V. et *Alii.*, 2008, "3D LIDAR Data Application for Urban Morphogenesis: Multi-agent Vector Based Geosimulation" in *O. Gervasi et Alii. (Eds.): ICCSA 2008, Part I, LNCS 5072*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 179–193.

Sintes P., 2002, « Immigration, réseaux et espace métropolitain : le cas athénien », in *Cahiers de la Méditerranée*, vol. 64, 12p. <http://cdlm.revues.org/index82.html> (15-03-2013)

Siret D., Ramos F, Musy M, 2003, « Un SIG 3D pour le diagnostic environnemental des façades urbaines », SIG, La conférence francophone d'ESRI, http://www.esrifrance.fr/actu/sig2003/Communication/cerma/cerma_esri.htm (15-03-2013)

SNDF, 2003, *Indicateurs nationaux du développement durable : lesquels retenir ?*, Paris, Ministère de l'Écologie, 215p.

Sougareva N., Holec N., 2002, *L'histoire des villes durables européennes*. <http://base.d-p-h.info/fr/fiches/dph/fiche-dph-8293.html> (15-03-2013)

Stambouli J., 2007, « Les territoires du tramway moderne : de la ligne à la ville durable », *Développement durable et territoire*, Dossier 4 : La ville et l'enjeu du Développement Durable, <http://developpementdurable.revues.org/index3579.html> (15-03-2013)

Stern N., 2006, *Le " STERN REVIEW " : l'économie du changement climatique*, 34p. http://www.hm-treasury.gov.uk/d/stern_longsummary_french.pdf (15-03-2013)

- Tannier C.**, Pumain, D, 2005, "Fractals in urban geography: a theoretical outline and an empirical example", in *Cybergeo : European Journal of Geography*, 25p.
- Tannier C.**, 2009, « Formes de villes optimales, formes de villes durables Réflexions à partir de l'étude de la ville fractale », in *Espaces et Sociétés*, Vol. 3, n°138, pp.153-171
- Tannier C.** et *Alii*, 2011, "A Fractal Approach to Identifying Urban Boundaries", in *Geographical Analysis*, n°43, pp.211-227
- Taillandier F.**, Deriche R., « Reconstruction automatique de bâtiments à partir d'images aériennes : une approche probabiliste générique » in *RFIA (Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle)*, Toulouse, France, 10p.
- Tarcha-kurdi F.**, Landes T., Grussenmeyer P., 2007, « Extraction automatique et modélisation tridimensionnelle de bâtiments à partir de données LIDAR » in *Atelier du Programme National de Télédétection Spatiale sur la Très Haute Résolution Spatiale en Télédétection Urbaine*, Ecole Central de Nantes, Poster
- Thériault M.**, Des Rosiers F., 2008a, *Information géographique et dynamiques urbaines, tome 1*, Paris, Hermès – Lavoisier, Information Géographique et Aménagement du Territoire - Traité IGAT, 296p.
- Thériault M.**, Des Rosiers F., 2008b, *Information géographique et dynamiques urbaines, tome 2*, Paris, Hermès – Lavoisier, Information Géographique et Aménagement du Territoire - Traité IGAT, 262p.
- Thévenin T.**, 2001, « L'analyse désagrégée : un luxe ou une nécessité ? », in *Ve rencontre de Théo Quant.*, Besançon, 7p., <http://thema.univ-fcomte.fr/theoq/pdf/2001/thevenin.pdf>.
- Thévenin T.**, 2002, *Quand l'information géographique se met au service des transports publics urbains. Une approche spatio-temporelle appliquée à l'agglomération bisontine*, Thèse de doctorat de Géographie, Université de Franche-Comté, 260p.
- Theys J.**, 2002, « L'approche territoriale du développement durable, condition d'une prise en compte de sa dimension sociale », in *Développement durable et territoires ; Dossier 1 : Approches territoriales du Développement*.
<http://developpementdurable.revues.org/index1475.html>
- Thierry P.**, 2007, « L'approche des risques en milieu urbain. Revue de l'apport de la très haute résolution spatiale » in *Actes de l'Atelier du Programme National de Télédétection Spatiale sur la Très Haute Résolution Spatiale en Télédétection Urbaine*, Nantes, Thème 6 : Applications en hydrologie et prévision des risques, [Communication Online]
- Thom R.**, 1972, *Stabilité structurelle et morphogénèse*, Paris, Dunod, 351 p.
- Thom R.**, 1999, *Paraboles et catastrophes*, Paris, Flammarion, Champs, 189p.

Thomas G., 1999, *Environnements virtuels urbains : modélisation des informations nécessaires à la simulation de piétons*, Thèse de doctorat en Informatique, Université de Rennes 1, 173p.

Thomas I. et *Alii*, 2010, "Comparing the fractality of European urban neighbourhoods: do national contexts matter?" in *Journal of Geographical Systems*, pp 1-20.

Tobler W., 1970, "A computer movie simulating urban growth in the Detroit region", in *Economic Geography*, Vol. 46, pp. 234-240

Uhl J-F., **Plaisant O.**, **Ami O.**, **Delmas V.**, 2006, « La modélisation tridimensionnelle en Morphologie: Méthodes, intérêt et résultats » in *Morphologie*, vol. 90, pp5-20

Ung A., **Ranchin T.**, **Wald L.**, **Weber C.**, **Hirsch J.**, **Perron G.**, **Kleinpeter J.**, 2002, « Cartographie de la pollution de l'air : une nouvelle approche basée sur la télédétection et les bases de données géographiques. Application à la ville de Strasbourg », Journées CASSINI

Veyret Y., (dir), 2005, « Développement durable et géographie », in *Le développement durable : approches plurielles*, Paris, Hatier, Initial, pp11-38

Villalba B., 2009, « L'utopie sociale de la ville durable », in *coRevn, revue critique d'écologie politique*, 1p., <http://ecorev.org/spip.php?article648> (15-03-2013)

Voegtle T., **Steintle E.**, **Tóvári D.**, 2005, "Airborne laserscanning data for determination of suitable areas for photovoltaics" in *ISPRS, Workshop "Laser scanning 2005"*, Enschede, the Netherlands, 6p.

Voiron C., 1992, *Espace, structures et dynamiques régionales : l'arc méditerranéen*, Thèse d'Etat, Université de Nice Sophia Antipolis, 549p.

Voiron C., 1995, *Analyse spatiale et analyse d'image*, Montpellier, Reclus, Espace mode d'emploi, 190p.

Voiron C., 1997, « Formes, discontinuités et partitions de l'espace » in *Espace Géographique*, Tome 26, Vol.1, 1997. pp. 49-59.

Voiron C., 2003, "Image analysis used to measure the spatial complexity of land cover across coastal zone", *Fifth International Symposium on GIS and Computer Cartography for Coastal Zone Management*, 7p.

Voiron C., 2004, « Réflexions sur les mécanismes de perception et sur la signification de la forme » in *Géopoint 2004*, Avignon, pp489-491

Voiron C., 2005, « Pour une approche systémique du développement durable », in *Développement durable et territoires*, Dossier 4 : La ville et l'enjeu du Développement Durable, mis en ligne le 30 mai 2005. <http://developpementdurable.revues.org/index261.html>

- Voiron C.**, 2006a, « L'espace dans la modélisation des interactions nature-société » in Colloque International *Interactions nature-société. Analyses et modèles*, La Baule, 3-6 Mai 2006, 6p.
- Voiron C.**, 2006b, « Modélisation spatio-morphologique de l'urbanisation du bâti sur le littoral Languedocien et géoprospective » in *Structures et dynamiques des espaces urbanisés : nouvelles approches méthodologiques* », Espaces modes d'emploi, UMR ESPACE, Avignon.
- Weber C.**, 2001, « Formes urbaines et répartitions des polluants », in *Vème rencontre de Théo Quant*, 18p.
- Weber J.**, Lefèvre S., Sheeren D., 2005, « Détection des bâtiments dans les images THRS avec la morphologie mathématique », SAGEO, [poster]
- Wiel M.**, 2009, « L'organisation de nos villes peut-elle devenir plus économe en déplacement en automobile », in *Revue Etudes Foncières*, n° 138, mars-avril 2009, pp. 12-17.
- Wolozyn P.**, 2005, « Une caractérisation de l'ambiance acoustique par reconnaissance sonore en situation d'immersion », Colloque européen « Construire avec les sons », 8p.
- Worms F.** (dir), 2007, *Essai sur les données immédiates de la conscience*, Paris, PUF, Quadrige : Grands Textes, 322p.
- Xiaa Z.**, Qing Z., 2004, "Applications of 3D city models based spatial analysis in urban design", ISPRS, Istanbul, 5p.
- Yesou H.**, Andréoli R., Heitz S., Battiston S., Ledrappier F., Allenbach B., Clandillon S., de Boissezon H., 2007, « Caractérisation des enjeux et cartographie des dégâts en milieu urbain à partir de données optiques THRS. Cas des inondations d'Arles (2003, France) et du tremblement de terre de Boumerdes (2003, Algérie) », in *Actes de l'Atelier du Programme National de Télédétection Spatiale sur la Très Haute Résolution Spatiale en Télédétection Urbaine*, Nantes, Thème 6 : Applications en hydrologie et prévision des risques.

Sources Web

- [1] http://www.uhb.fr/sc_sociales/Costel/coursHR.htm
- [2] <http://06.theblog.es/benidorm-1960-2009/>
- [3] <http://brasilarch638.wordpress.com/>
- [4] <http://1jourlactu.com/monde/c'est-quoi-une-«-favela-»/>
- [5] <http://malcontenta.blog.lemonde.fr/2006/05/page/3/>
- [6] http://www.fkaplan.com/cities/UrbanSF_f.html#P1.2
- [7] <http://www.athenaeum.ch/corbu3m1.htm>
- [8] <http://www.geotheque.org/docs/documents.html>
- [9] <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=5190>
- [10] <http://www-sop.inria.fr/ariana/fr/index.php>