

# **La ville verticale : proposition d'une étude exploratoire de la morphologie urbaine tridimensionnelle**

*« Le catalogue des formes est infini :  
aussi longtemps que chaque forme n'aura pas trouvé sa ville,  
de nouvelles villes continueront à naître.  
Là où les formes épuisent leurs variations et se défont,  
commence la fin des villes ».*  
(Italo Calvino, *Les villes invisibles*, 1974)

La plupart des recherches urbaines actuelles qui s'intéressent à la ville dans une perspective intra-urbaine portent soit sur l'organisation socio-spatiale des territoires urbains ou sur les pratiques spatiales qui y sont associées (mobilité, habitat, compositions des espaces, oppositions sociales, identité, etc.), soit sur la production et la gestion des territoires urbains (politique publique, aménagement, etc.). Territoire complexe, la ville y est analysée sous des angles de vues variés.

Malgré la richesse de ces études, l'organisation matérielle de la ville dans toutes ses dimensions n'est pas prise en compte. Peu d'analyses portent ainsi véritablement sur les traits formels de la ville. Certes, des analyses de tissus urbains existent, s'intéressant souvent à la définition et à la compréhension de sous-espaces homogènes, ou à la détermination des structures des édifices. Mais que sait-on réellement des traits concrets de la ville, comme par exemple des effets des hauteurs des bâtiments sur son fonctionnement, du volume perçu par ses habitants ou encore de la juxtaposition complexe des espaces ouverts et construits en son sein ? En dépit de leur grand nombre, les études sur la morphologie urbaine se sont peu penchées sur l'analyse d'une ville dans ses trois dimensions. Cette réalité tridimensionnelle essentielle et concrète pour le citoyen n'est pas encore prise en compte dans la recherche géographique française.

Nous proposons ici une position de recherche concernant l'appréhension du phénomène urbain dans ses trois dimensions : extension horizontale (x, y) et élévation du bâti (h), inscrites sur une topographie donnée (z). La récente disponibilité de données morphologiques urbaines, de type image, permet de compléter la connaissance de la ville, en analysant de façon inédite la géographie des formes construites de la totalité d'une agglomération. Cette recherche sur la verticalité dans la ville se place dans la perspective d'une analyse spatiale, en tant qu'étude des processus qui résultent de l'interaction entre les sociétés et leurs territoires, à travers la prise en compte de méthodes particulières communes à différentes disciplines.

Notre position de recherche entend d'abord élargir les connaissances sur la ville, et souhaite aussi donner des pistes de réflexion à d'autres disciplines. Elle se place dans le transfert de méthodes utilisées par d'autres sciences, afin d'apporter de nouvelles méthodologies d'analyses du phénomène urbain en géographie.

## **1 Comprendre la ville par sa forme**

### **1.1 Un grand nombre d'études sur la forme planaire de la ville**

La place de la forme en géographie ou dans les disciplines proches est essentielle dans le cadre de la compréhension de la construction et de la production de la ville. Certaines études prennent en compte les caractéristiques matérielles de la forme urbaine (traits physiques, composition d'ensembles, propriétés), d'autres sont centrées sur leurs attributs immatériels (perception, symbolique, résultat d'un projet d'acteurs et de stratégies). D'autres recherches - trop rares - s'intéressent à l'interrelation entre ces deux dimensions. Toutes apportent une vision particulière de la forme urbaine, mais avec certaines limites.

#### **1.1.1 Le plan, une représentation « faussée » de la forme urbaine**

Très tôt dans l'histoire, les formes des villes ont fait l'objet de représentations planaires, qui renvoyaient à des conceptions de civilisation (le plan en damier grec antique, le cardo et le decumanus romains, etc.). Elles ont été ensuite tracées par des plans à l'échelle. Ainsi, la forme de Venise, déjà définie dès la fin du XI<sup>ème</sup> siècle, est représentée dans un document datant de 1346 avec une planimétrie précise et non l'une de ces vues symboliques habituelles du Moyen Age [Benevolo, 2000]. Sur ces plans, la morphologie urbaine apparaît d'une part comme une vue restrictive et particulière d'un paysage plus vaste. « Caractéristique d'une certaine conception », [Beaujeu-Garnier, 1980], le plan est une représentation possible parmi d'autres de la réalité urbaine : il a pour but de simplifier la ville. La sélection des éléments est orientée afin de comprendre son organisation spatiale, son évolution dans l'histoire, sa structuration par les hommes et leurs activités. La réalité matérielle concrète n'y est donc que partielle. Certes, l'architecture de la Renaissance a bien cherché à reproduire les objets du monde naturel et à intégrer un objet à trois dimensions sur une surface à deux dimensions, en mettant au point une construction géométrique qui permet de passer de l'une à l'autre ; mais ces différentes méthodes (projections orthogonales, axonométrie, perspective, projections cotées) n'ont été appliquées qu'à des édifices isolés et non à une portion large de la ville. D'autre part, le plan est une représentation dans un espace euclidien. La géométrie euclidienne utilisée privilégie ainsi les formes simples et facilement identifiables telles que le cercle, le carré, l'hexagone ou l'étoile, ainsi que les structures régulières comme les organisations radio-concentrique ou en quadrillage. L'utilisation de ces figures dans les représentations abstraites de la ville suggère implicitement la simplicité, la régularité et la compacité de l'espace urbain. Or l'examen de plusieurs formes réelles de villes montrerait plutôt une certaine irrégularité, et une absence de compacité traduite par l'existence de nombreux

espaces libres de constructions à l'intérieur du périmètre urbanisé. Cette complexité implique un ordre sous-jacent qui n'est pas lié à la géométrie euclidienne mais plutôt à la géométrie fractale. Par conséquent, le plan, souvent choisi pour représenter la morphologie urbaine, ne transcrit pas toujours les caractères essentiels de l'identité urbaine.

Pourtant, il reste l'une des entrées privilégiées pour l'étude de la ville et de l'extension de son emprise au sol. Les descriptions anciennes, aussi précises que possibles, se sont appuyées sur les plans des principaux caractères morphologiques des villes (enceinte, délimitation de quartiers). Et dans les premières études de géographie urbaine, ce sont bien les études de plan qui ont permis aux villes d'être abordées dans leurs cadres matériel et physique [Chabot, 1948]. En retour, le plan a fait l'objet de recherches pour la construction de villes nouvelles dont on voulait maîtriser le fonctionnement et l'évolution, et garantir une certaine qualité de vie.

### **1.1.2 Les formes bâties, la « dimension physique de la ville »**

L'analyse des formes bâties a souvent été abordée par les urbanistes ou les architectes. Il s'agit ici de descriptions générales de bâtiments publics, de quartiers urbains voire de zones exceptionnelles, en somme de parties de la ville, considérées comme les pièces d'un puzzle. Les descriptions générales des formes urbaines précises se penchent ainsi sur le parcellaire, la rue, les cours, les configurations de l'usage et des pratiques des habitants, et ceci dans des cas variés, de l'îlot fermé haussmannien aux groupements unifamiliaux des cités jardins britanniques. Cette « architecture de la ville », défendue comme une architecture de chacune de ses parties [Castex et al. 1977], offre ainsi l'image d'une ville fragmentaire, décomposée, rarement articulée, jamais agrégée. Certes, la dialectique entre la construction des parties de la ville et sa conception globale est approchée par le biais de projets cohérents et plus larges, sous-parties symboliques de la cité. Mais le passage de « l'îlot à la barre » [Castex et al. 1977] permet-il réellement de saisir toute la complexité de l'objet urbain ? On pourrait en douter tant cette architecture urbaine a pu apparaître en rupture avec la globalité de la ville et donc des interactions qui s'y situent. Dans cette pratique, l'appréciation de la morphologie urbaine, cette « dimension physique » de la ville, est réalisée à travers l'étude du tissu urbain, qui permet de comprendre les relations complexes entre sol et bâti, entre voirie et constructions, entre formes et fonctions. Toutes ces études morphologiques sont alors interprétées en tant que conséquence de l'action des sociétés. L'examen des « configurations sensibles spécifiques » de l'espace public urbain [Chelkoff, 2001] s'inscrit dans cette problématique. A travers l'étude « d'ambiances » sonores et visuelles, il s'agit de comprendre les formes urbaines à travers les dispositifs matériels construits (dans leur rapport au milieu physique), leurs dimensions sensibles (perceptions localisées et circonscrites), et leurs modalités d'usage (conduites humaines et sociales). Ici, l'accent est mis sur les relations entre espaces et sociétés, mais analysées à une échelle extrêmement fine, et à travers le simple regard du chercheur, des enregistrements ou des photographies. La question centrale s'étant fixée sur le rôle des facteurs ambiants (son et lumière) dans les traits des espaces publics, la morphologie urbaine n'est pas prise en compte dans ses dimensions fondamentales.

D'autres études, plus géographiques, se situent dans cette même perspective, tout en s'en éloignant par l'échelle choisie et par la prise en compte de phénomènes plus complexes. Les formes urbaines sont alors analysées soit comme résultats de projets architecturaux, en mettant l'accent sur le rôle de l'aménageur et du politique, soit comme aboutissements d'usages et de pratiques des habitants dans lesquels culture, valeurs et histoire ont un poids fondamental [Roncayolo, 1985]. De manière très minutieuse, sont étudiées la création et l'évolution des formes urbaines des grands ensembles ou la reconfiguration de formes spatiales anciennes telles que celles des quartiers centraux. L'originalité de ces recherches réside dans le fait que les formes et les paysages urbains sont conçus dans leurs dimensions matérielle et sociale, en tant qu'organisations spatiale et historique [Roncayolo, 2002]. L'angle de la production des espaces, celui de la fonction des lieux ou celui encore des conditions d'usages sont ainsi privilégiés. Continuités et discontinuités spatiales et chronologiques des formes urbaines y sont mises en avant d'abord parce que la vision de la ville se veut plus globale, et ensuite parce les interactions entre espaces, sociétés et temps apparaissent essentielles. Malgré tout, ces études ont certaines limites, liées essentiellement à la démarche. Le choix méthodologique d'utiliser le simple regard pour rapprocher tout ce qui compose la réalité urbaine conduit à produire une collection de cas particuliers, certes complexes mais non mis en perspective, et surtout à prendre en compte une morphologie subjective et non objective.

### **1.1.3 Formes et fonctions des espaces urbains**

D'autres développements abordent indirectement la forme urbaine. Dans une perspective structuraliste, l'Ecole de sociologie et de géographie de Chicago a ainsi mis au point des modèles de la ville fondés sur l'observation des agglomérations nord-américaines et sur l'utilisation de concepts et de méthodes empruntés aux sciences naturelles [Grafmeyer, 1990]. Leur objet est de traiter du fonctionnement de la ville et des fonctions dans la ville ; indirectement, la morphologie urbaine apparaît dans le sens où elle résulte de fonctions particulières. Dans le but de dégager des logiques d'organisation de l'espace urbain, ces schémas abstraits tiennent compte des statuts socio-économique, familial et ethnique des populations. Les modèles de Burgess, Hoyt, Harris et Ullman offrent ainsi une représentation simplifiée de la réalité humaine des villes [Cosinschi, Racine, 1984]. Les quartiers se distinguent par l'appartenance sociale des habitants et par la compétition entre groupes sociaux qui s'en suit, et en conséquence par un facteur géographique, la distance au centre. Ces approches de la morphologie urbaine portent donc plus sur les ségrégations dans la ville, et sur les rapports sociaux entre les habitants, que sur la forme urbaine comme objet d'étude synthétique en soi.

Datés, localisés, spécifiques à une société, ces modèles ont tout de même inspiré de nombreuses études sur la forme globale d'une ville. Certains s'en sont servis pour opposer à l'échelle régionale les centres et les périphéries. D'autres ont poussé plus loin la réflexion, en insérant les fonctions économiques de la ville dans la modélisation [Lacour, 1996] : à

la morphologie urbaine standard d'une ville monocentrique et polyfonctionnelle, sont opposées de nouvelles configurations d'ensemble (polynucléaire, avec une centralité par spécialisation, etc.). Ces approches modélisatrices restent cependant trop abstraites et générales, et surtout non validées par une application sur des cas concrets.

Enfin, les travaux de Gilles Ritchot [Ritchot, 1975] et de Gaëtan Desmarais [Desmarais, 1995] s'individualisent par une analyse structurale s'appuyant sur les travaux des mathématiciens René Thom et Jean Petitot. Cette géographie théorique admet que ce sont les formes et non pas seulement les forces qui expliquent la diversité de l'implantation humaine, des appropriations politiques, des occupations et activités économiques.

Finalement, la forme planaire de la ville a le plus souvent été étudiée dans une démarche essentiellement descriptive et idiographique. Les échelles d'analyses sont extrêmement fines et les rues, les bâtiments, les portions d'espaces exceptionnels sont rarement recadrés dans la globalité de la ville. Plus encore, la compréhension de la morphologie urbaine n'est pas totalement aboutie, soit parce que les formes ne sont pas intégrées dans un contexte spatial (environnement, juxtaposition, coexistence, etc.) mais simplement analysées une à une, soit parce que la forme est entendue comme un cadre d'analyse du fonctionnement de la ville et non pas comme un véritable objet d'étude global en soi.

## **1.2 Peu d'études dédiées sur la verticalité de la ville**

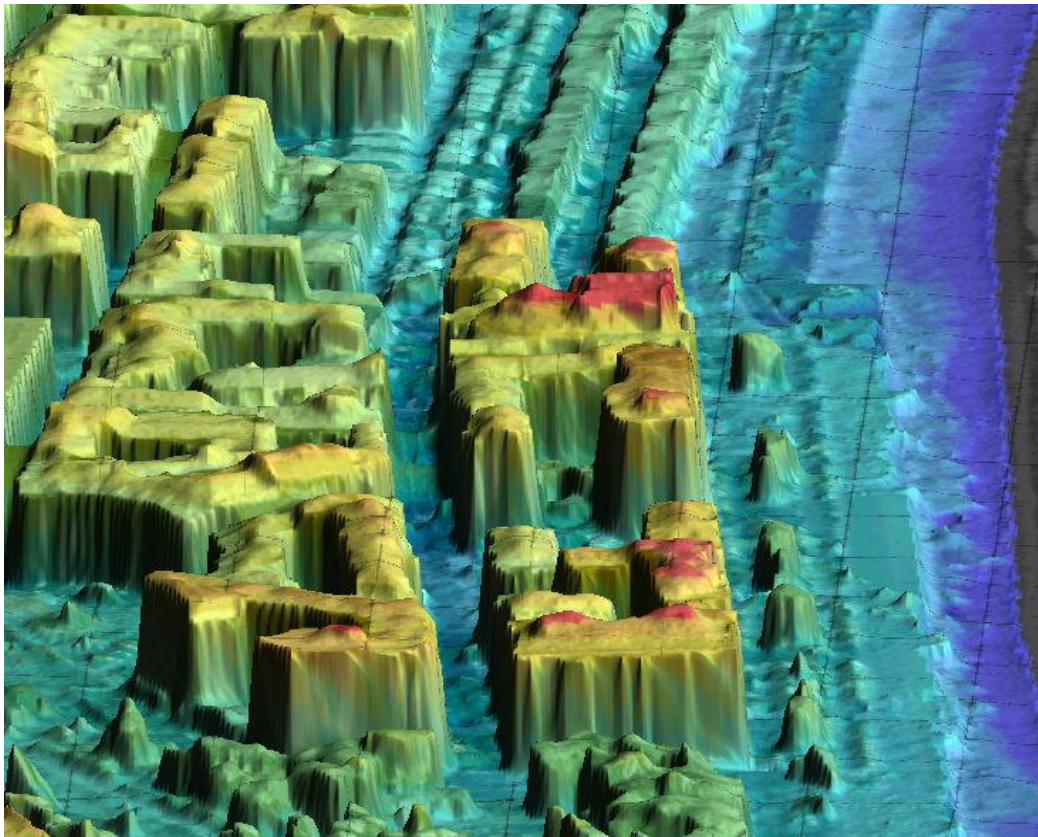
Intimement liée au plan, l'extension verticale de la ville a fait l'objet de travaux, mais elle n'a pas suscité les mêmes attentions. Au cours du XXème siècle, le manque d'espace a conduit de nombreux architectes et urbanistes à minimiser l'emprise au sol de la ville, au nom d'une rationalité sociale, économique, hygiénique et écologique [Sallez, 1996]. Au cours des années 20, Le Corbusier présente ainsi la transformation du centre de Paris, en ville verticale, maximisant l'usage de toutes les dimensions urbaines [Le Corbusier, 1925]. Il crée une ville en hauteur où les habitats sont disposés en l'air et dans la lumière, alors que le sol est consacré aux infrastructures et aux parcs. Toutefois, les études portant sur cette verticalité urbaine n'ont jamais été exhaustives ou, quand elles ont pu l'être, ont rarement eu pour objet de comprendre la ville dans son entier. Comme nous allons le voir, les premiers efforts de recherche systématiques sur la 3ème dimension urbaine sont essentiellement le fait de l'industrie et ont donc pour fins des objectifs d'ingénierie. Ces efforts ont ainsi conduit à la production de données spatialisées sur la verticalité urbaine.

### **1.2.1 La « canopée » urbaine**

Un premier jeu de données qui tend à s'imposer consiste en la représentation de l'ensemble de la ville par les hauteurs de son sol et de son « sur-sol ». A partir de la deuxième moitié des années 1990, le fort développement des télécommunications par voie hertzienne a conduit les opérateurs et installateurs de réseaux à rechercher voire développer ces bases de données urbaines. Les impératifs des communications sans fil obligent en effet de connaître la morphologie bâtie de la ville dans sa troisième dimension afin d'y déployer le réseau. Il s'agit d'optimiser la localisation des antennes et de couvrir ainsi toutes les zones construites en tenant compte des obstacles formés par la topographie et le bâti.

Une application de télécommunication sans fil à haut débit appelée Boucle Local Radio (WLL : Wireless Local Loop, en anglais) a conduit à la création de Modèles Numériques d'Élévation de type « canopée » urbaine. Représentant la ville et sa verticalité à des précisions pouvant atteindre 1 m voire mieux, ces données sont des fichiers raster comparables à un MNT dans lequel chaque construction et chaque immeuble apparaissent avec leur altitude (sol + élévation de la construction). Produits à partir d'acquisitions aériennes analogiques, numériques ou laser, ces fichiers peuvent être générés sur la totalité d'une agglomération, mais ils présentent des faiblesses particulièrement dans la restitution des altitudes au sol à l'intérieur de l'espace construit. Les conditions d'acquisition, la morphologie urbaine et les algorithmes de traitement, tantôt individuellement, tantôt de concert, conduisent en effet à la production de « bruits » qui font que ces modèles numériques ne sont performants que dans les parties les plus élevées, les plus hautes. Ils restituent donc bien la « canopée » urbaine, préoccupation majeure des opérateurs et installateurs de Boucle Locale Radio. Ces derniers cherchent en effet à s'assurer de la connexion possible entre leurs émetteurs et les toits des immeubles « clients » susceptibles d'accueillir une antenne de réception. Les données de la « canopée urbaine » leur sont donc essentielles pour simuler cette liaison dans des logiciels dédiés.

Exploitant le même type de données morphologiques urbaines, les applications d'intervisibilité (line of sight, en anglais) sont des travaux qui cherchent à vérifier que deux points A et B « se voient mutuellement » (liaisons « point à point ») ou que plusieurs points sont visibles à partir d'un point déterminé (liaisons « points – multipoints »). Ils sont réalisés dans le domaine de la sécurité civile et militaire, pour assurer la protection de sites sensibles, mais aussi dans celui de l'architecture et de la protection du patrimoine, dans une démarche de simulation de l'impact visuel d'une construction nouvelle.



« Vue 3D » réalisée à partir d'une « canopée » urbaine  
 Modèle Numérique de Surface sur le centre historique de Nice  
 Résolution 1 m, précision X,Y : 1 m, précision Z : 1 m  
 (Source : ISTAR)

Si les Modèles Numériques d'Élévation de type « canopée » peuvent couvrir la ville dans son entier, quand ils existent, ils ne permettent guère d'envisager une étude véritable de la morphologie urbaine. Ils n'ont d'ailleurs, à notre connaissance, jamais été utilisés à cet effet. Ils présentent sans doute beaucoup d'inconvénients pour ce genre d'analyse puisque la complexité du bâti, la juxtaposition de zones construites et de vides, la variation des hauteurs aux niveaux inférieurs, les « fonds » des rues, en particulier dans les quartiers très denses (quartiers historiques d'époque médiévale, par exemple), sont mal restitués. Malgré ces limitations et comme nous avons pu le voir, les MNE « canopée » sont très souvent utilisés dans divers domaines.

### 1.2.2 Les quartiers « 3D »

Poursuivant des objectifs de connaissance de phénomènes se produisant en milieu urbain et nécessitant de l'information plus détaillée sur la verticalité de la ville, d'autres travaux se sont appuyés sur des modèles numériques plus précis mais aussi plus réduits en surface. Là encore, l'objectif de connaissance ne porte pas sur la ville en tant que telle mais sur d'autres objets.

Les questions de qualité de vie dans la ville ont par exemple fait apparaître des études sur la diffusion des polluants émis par la circulation automobile [Maignant, 2002 ; Ung et al, 2002 ; Weber, 2001]. La dynamique de l'air en milieu intra-urbain imposant la prise en compte du bâti pour analyser, reproduire et simuler la propagation des aérosols, ces travaux ont utilisé voire conduit à la création de Modèles Numériques d'Élévation assez précis, mais sur des surfaces relativement restreintes. Il en est ainsi du travail réalisé par G. Maignant sur des quartiers inférieurs à 1 km<sup>2</sup> sur Paris et Nice. L'auteur s'appuie sur une représentation vectorielle de l'élévation du bâti d'une précision d'environ 1 m. Les constructions sont relativement bien restituées par des formes régulières, qui n'occulent pas les espaces inférieurs comme dans les cas précédents. Les rues, les cours intérieures, les petites places sont fidèlement restituées relativement aux bâtiments qui les encadrent. En revanche, le logiciel utilisé pour simuler la diffusion des polluants n'autorise pas la prise en compte de vastes portions de villes, d'où la limitation à 1 km<sup>2</sup>. Par ailleurs et surtout, il ne permet pas de gérer la topographie, si bien que le Modèle Numérique d'Élévation peut présenter un véritable biais dès lors que la ville considérée n'est pas construite sur une surface plane ou quasi plane. La morphologie urbaine entendue comme élévation du bâti sur la topographie locale n'est donc pas correctement transcrite.

Dans un registre voisin, des travaux traitant de la nuisance sonore en milieu urbain ont conduit aux mêmes conclusions quant à la donnée nécessaire en entrée des systèmes d'information et de simulation : « it is necessary to take contextual urban architecture into account that is to say land built forms » [Servigne et al, 1999]. La propagation du signal sonore,

dont les modalités sont proches de celles de la propagation des ondes exploitées par les télécommunications, requiert également une information sur le bâti urbain, sa forme et sa hauteur. Mais les besoins sont d'un niveau supérieur : « Building heights and shapes, façade materials, yards, gardens and so on, have a great influence on sound diffusion ». L'information morphologique est complétée par la qualité des matériaux de construction des bâtiments et la végétation intra-urbaine. Si d'un point de vue conceptuel le modèle de données semble bien défini, l'existence des bases de données urbaines envisagées fait malheureusement toujours défaut.

Dans le domaine de la prévention et de la gestion des risques urbains, des applications tentent d'intégrer la verticalité urbaine dans des Systèmes d'Information Géographique. Le cas des inondations peut être cité, de même que celui des séismes [Yalciner, 2002]. Par exemple, un système pilote mis en place en Turquie, dans la banlieue Est d'Istanbul, s'appuie sur les données d'élévation du bâti afin de prendre en compte le risque d'effondrement possible de structures pouvant se révéler mortelles et causer la congestion des voies de circulation. Toutefois, la précision et l'exhaustivité des données demeurent un problème concret.

Poursuivant un objectif plus large, le Service SIG du comté de Richland en Caroline du Sud (Etats-Unis) s'est lancé à partir de 2000 dans un projet de construction d'une base de données urbaine en « vraie » 3D sur le centre de la ville de Columbia [Fitzgerald, 2002]. Atteignant une précision planimétrique (x,y) et altimétrique (z) remarquable, le modèle numérique combine des données d'acquisition laser (technologie LIDAR), des données photographiques aériennes numériques et les photographies terrestres des façades. Il nécessite malheureusement un traitement relativement long et pour l'heure l'expérience s'est limitée à la superficie de 30 blocks du centre de Columbia. On touche là une question récurrente et cruciale concernant l'information disponible sur la morphologie urbaine, à savoir son coût élevé. A ce titre, le projet de Columbia est exemplaire d'un investissement original et audacieux.



Reproduction en « vraie 3D » d'un quartier de Columbia

Ces quelques exemples nous indiquent qu'il existe nombres d'applications ayant recours à une modélisation de l'élévation verticale des villes. Ces modèles ne sont toutefois pas exhaustifs, les villes ne sont jamais traitées dans leur totalité et l'on doit davantage parler de quartiers « 3D » que de villes « 3D ». Les difficultés d'accès, de production et de coût de ces données sont bien concrètes et expliquent pour une bonne part cette situation. En outre, il ressort bien de ces différents cas, que ce n'est pas la ville, à proprement parler, qui fait l'objet de la recherche conduisant à la production des modèles évoqués. La connaissance de la forme (horizontale et verticale) de la ville n'est pas l'objectif. Or il y a là un champ d'investigations à investir, porteur possible de multiples avancées dans différentes sciences sociales.

### 1.3 Pour une étude de la verticalité de la ville

La morphologie urbaine a profondément changé au cours du temps. Depuis leur apparition au Moyen-Orient au début de l'Histoire, les villes ont connu des phases d'expansion, d'étalement, et d'autres de rétraction. Tout en reflétant les caractères des civilisations et des époques qui les ont vues naître, les villes ont ainsi accumulé les étapes de leur histoire dans leurs formes. D'anciens remparts sont devenus boulevards circulaires, des faubourgs industriels sont devenus friches, des quartiers de tanneurs ont mués en pittoresques sites touristiques. Aujourd'hui, les villes d'Europe occidentale sont desserrées, écartelées entre résidence et circulation. Paradoxalement, elles sont à la recherche de vides et de concentrations : tout se passe comme si la forme urbaine offrait l'image d'un archipel complexe. Dans ce contexte, la morphologie urbaine pose question. Sa complexité est-elle ordonnée ? Peut-elle être mesurée ? Quelle influence peut-elle avoir sur les organisations humaines ? Nous proposons ici deux pistes de recherche pour élaborer une étude de la verticalité dans la ville.



### 1.3.1 A la recherche d'une géographie de la verticalité urbaine

La démarche d'analyse spatiale que nous avons choisie nous entraîne vers une série d'interrogations spécifiques, dans lesquelles nous postulons que la ville est un ensemble complexe, une organisation territorialisée produisant de l'ordre et des régularités. L'hypothèse principale de ce travail est qu'il existe une organisation spatiale verticale de la ville. Cette organisation, qui résulte de logiques ordonnées, devait être décelée à partir de l'analyse de la répartition des composantes bâties et de leurs altitudes et hauteurs respectives. Dans le cadre de cette étude systématique d'une collection de formes dans l'espace urbain, leur mesure, leur analyse et leur classement devraient fonder la mise au point de règles de répartition spatiale des élévations du bâti dans la ville. Dans cette perspective, notre idée est de mettre en évidence des structures d'organisation d'ordre supérieur. On recherchera par exemple des paliers, des juxtapositions ou emboîtements de formes. L'affirmation que les zones les plus hautes sont toujours en périphérie urbaine sera à démontrer, tout comme celle énonçant que la distribution spatiale des volumes bâtis en fonction de leur hauteur n'est pas aléatoire. Nous tenterons aussi de dégager des niveaux d'organisation de cette verticalité suivant les différentes strates de l'élévation du bâti. A différents niveaux d'élévation et à différentes échelles, la troisième dimension sera interrogée pour déterminer les ruptures, les synapses ou les homogénéités de la morphologie urbaine.

Nous souhaitons donc fournir des éléments d'explication de l'agencement des formes bâties et de leurs hauteurs. Les strates du bâti seront ainsi analysées en rapport avec les centralités et les fonctions urbaines, les dynamiques démographiques intra-urbaine et les politiques de la ville à différentes échelles, mais aussi tout simplement avec la topographie. Les « vides et les pleins » qui composent la ville seront eux aussi interrogés dans une démarche explicative, qui tient compte des liaisons entre l'espace et la société, mais aussi des interactions dans l'espace urbain. Les formes urbaines seront donc replacées dans des environnements multiples.

A terme, il s'agirait d'établir les bases d'une nouvelle typologie intra-urbaine fondée sur des compositions ou des agencements de formes bâties. On souhaite ainsi, pour une échelle donnée, proposer un référentiel morphologique urbain. Celui-ci devrait servir à différentes fins d'analyse et de comparaison des villes entre elles, en géographie comme dans d'autres sciences sociales pour lesquelles la ville est le lieu d'expression des phénomènes étudiés. Ainsi sera mise à jour une grammaire spatiale de la verticalité urbaine, sur la ville dans son entier.

### 1.3.2 Verticalité et interdisciplinarité

La ville est par essence un objet complexe dont chaque point de vue disciplinaire permet de comprendre certains éléments, mais selon une perspective nécessairement incomplète, voire réductrice. L'importance de l'éclairage spatial des phénomènes pour d'autres disciplines (sociologues de la ville, économistes spatiaux, architectes, ingénieurs, ethnologues, praticiens de l'aménagement, etc.) apparaît encore plus si l'on s'intéresse à la dimension verticale de la ville et à sa morphologie. Ainsi, voulant définir les formes urbaines, [Levy, (1988)], constate seulement « le caractère polysémique de la notion... et l'aspect nécessairement pluridisciplinaire de son étude ». Notre position de recherche affirme donc la nécessité d'une collaboration interdisciplinaire. Nous souhaitons ainsi recueillir les conceptions d'autres sciences sociales sur la nature du référentiel morphologique urbain que nous mettrons en place, dans le cadre d'une démarche interactive entre disciplines.

Ces coopérations s'envisagent globalement dans une perspective de confrontation de notre approche de la ville vue du ciel avec la grille de lecture de la ville vue du sol par d'autres sciences sociales. Pour les spécialistes des sciences cognitives, par exemple, les formes architecturales n'organisent pas seulement les espaces : elles construisent aussi des environnements spécifiques, qui sont perçus différemment et qui interviennent dans les décisions et les actions sur l'espace. On imagine facilement l'apport de la clarification de la verticalité urbaine pour ces psychologues cogniticiens s'intéressant au comportement des individus dans l'espace. De même, les sociologues ou les anthropologues ont aussi réalisé de nombreuses études reliant les processus de sociabilité et de socialisation à l'environnement dans lesquels ils se réalisent. La polémique demeure sur le fait que la forme concrète de la ville agit et traduit les caractéristiques sociales [Grafmeyer, 1984]. Notre approche permettra-t-elle de déterminer si la forme d'une ville encourage une appartenance et une identité plus forte des groupes sociaux, si certaines formes urbaines favorisent les tensions sociales alors que d'autres permettent d'assurer des fonctionnements sociaux plus conviviaux ? On pourrait aussi élargir l'apport de notre travail aux économistes spatiaux. La relation entre l'efficacité économique des villes et leur taille est déjà établie depuis longtemps. Mais qu'en est-il du rôle de la densité ou de la forme ? Quelles formes urbaines sont susceptibles de produire de la croissance économique ?

Toutes ces questions pourraient être multipliées et développées. Quelques unes auront suffi à démontrer la pertinence de notre proposition de recherche. Elles en indiquent aussi l'enjeu à travers ses implications pluridisciplinaires.

## 2 Technique récente et développement méthodologique : Proposition d'étude

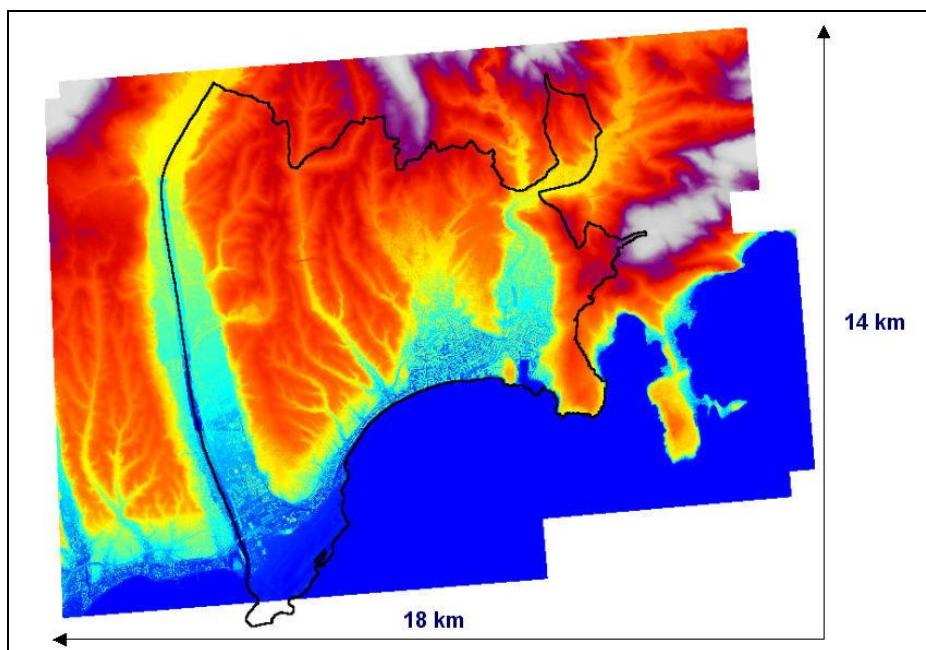
L'objectif principal de notre groupe de recherche est de mener une étude morphologique globale de la ville. Nous souhaitons analyser la forme planaire et verticale d'une entité urbaine dans son entier et à différentes échelles. Si une telle entreprise peut paraître audacieuse, elle n'en demeure pas moins envisageable. L'évolution des capacités informatiques (stockage, puissance et rapidité de calcul) et l'existence de jeux de données complets sur certaines villes devraient rendre réalisable une telle étude.

## 2.1 Les données de la morphologie urbaine

La collaboration avec ISTAR<sup>1</sup>, une société de cartographie numérique productrice de bases de données à haute résolution, constitue une des bases essentielle de notre projet. La mise à disposition de données sur la totalité du territoire communal de la ville de Nice nous permet de projeter l'étude sur une ville de grande taille (72 km<sup>2</sup>),

### 2.1.1 Données de « canopée » associées aux données cadastrales

La mise à disposition d'ISTAR concerne la « canopée urbaine » ou Modèle Numérique de Surface (MNS) sur la totalité de la commune de Nice. Fourni au format ASCII grid, ce fichier est donc au format raster avec une résolution de 1 m, une précision planimétrique de 1 m et une précision altimétrique de 1 m également. Produit par le traitement photogrammétrique de données numériques acquises par caméra aéroportée, ce MNS possède les caractéristiques techniques et les inconvénients (difficultés notamment au niveau des vacuités) évoqués précédemment. Il n'est donc pas tout à fait optimisé pour appréhender la morphologie urbaine dans sa complexité. Il est toutefois fourni avec l'orthoimage vraie de la ville, à une résolution de 25 cm en noir et blanc. Nous disposons donc d'un corpus de données exploitable et cohérent sur une grande superficie.



Le jeu de données : la canopée urbaine sur la totalité du territoire communal niçois

Disposant par ailleurs de l'exhaustivité du bâti sur le territoire de la commune de Nice, nous envisageons de l'utiliser pour extraire du MNS les données d'élévation de chaque construction (« h »). Au final, il s'agit d'aboutir à un modèle de type ville « 3d » donnant l'altitude du sol (topographie, soit « z ») et du sur-sol construit (soit « z+h »). Les données d'élévation de la végétation ne nous importent pas à ce stade.

### 2.1.2 Une ville dans son entier et dans sa diversité

Présentant un tissu urbain différencié (ville médiévale, ville moderne, quartiers de collectifs contemporains, habitat pavillonnaire, zones commerciales et industrielles), développé sur une topographie contrastée (larges vallées alluviales, collines, vallons étroits dits « obscurs », littoral), la ville de Nice constitue une zone d'étude contrastée. La commune, tout en étant le centre d'une vaste agglomération, est suffisamment étendue pour présenter une grande variété de formes urbaines. La verticalité et la densité du bâti offrent maintes configurations, depuis la vieille ville tapie au pied de la colline du château jusqu'aux confins périurbains du Nord et du Nord-Ouest où, autour d'anciens noyaux villageois, villas et petites résidences cohabitent avec des parcelles de vignes, des cultures maraîchères, des oliveraies et autres bosquets. A défaut d'étudier toute une agglomération, nous avons donc la possibilité d'appréhender une ville dans son entier, depuis le centre jusqu'aux marges de l'urbanisation.

### 2.1.3 Les niveaux d'analyse

L'étude géographique de la verticalité du bâti dans la ville impose de s'intéresser à la question à diverses échelles. La ville dans sa totalité sera l'échelle d'analyse principale mais nous envisageons au moins deux autres niveaux : une maille administrative et une maille géométrique régulière, toutes deux étant inférieures à la maille communale. Concernant la première c'est le quartier qui est pressenti ; il en existe 41 à Nice. Le quartier présente l'avantage d'être

<sup>1</sup> ISTAR – 2600, Route des Crêtes – BP 282 - 06955 SOPHIA ANTIPOLIS Cedex - [www.istar.com](http://www.istar.com)

une unité de compte de la statistique officielle. Les mesures de la complexité morphologique urbaine, sur lesquelles nous reviendrons ci-après, pourront ainsi être confrontées aux données socio-démographiques et économiques de l'INSEE, permettant ainsi d'explorer des pistes d'explication de cette verticalité. Pour la seconde, nous envisageons des quadrats de différentes tailles. Ils sont envisagés pour rendre comparables les unités spatiales sur lesquelles seront établies les mesures. Les quartiers niçois sont en effet très hétérogènes en surface et en forme.

## **2.2 L'analyse d'image et les nouvelles théories morphologiques pour l'étude des formes urbaines**

Sur le plan méthodologique, notre projet entend recourir aux méthodes de l'analyse d'image. Cet ensemble de méthodes peut être divisées en 4 domaines : le traitement du signal, élaboré sur des opérateurs qui transforment l'image, des méthodes statistiques, des méthodes syntaxiques qui découpent l'image en fragments élémentaires et la morphologie mathématique qui scrute l'image à l'aide d'objets élémentaires.

### **2.2.1 Rappel général**

Les études sur les formes urbaines sont à travers l'analyse d'image fortement liées à l'évolution des ressources computationnelles. Elles cherchent à mesurer les formes dans le but de les comparer, à décomposer les éléments et à mettre en évidence les structures de l'image pour déceler des organisations. Le plus souvent, ce n'est pas la forme urbaine qui est analysée mais c'est l'objet urbain. Il n'y a pas d'explication de la forme.

D'une manière similaire, si l'aspect diachronique fait l'objet d'investigations il n'a pas été réellement traité. Il en découle une absence d'étude sur la morphogenèse entendue comme la vie d'une forme (naissance, croissance, stabilité, déclin). De plus, et même si certaines de ces méthodes sont fondées sur des théories comme celle des ensembles en ce qui concerne la morphologie mathématique, aucune ne visent à expliquer la forme. Leur ambition n'est donc pas liée à la compréhension de la morphogenèse.

Le récent retour de la science vers la forme a permis le développement de nouvelles théories. Délaissant la quête de l'élémentarité (même si elle prend en compte les interrelations entre composants) au profit d'une conception plus globale, la science porte un intérêt nouveau à la forme. Plusieurs théories qui veulent non seulement décrire mais expliquer la morphologie ont été élaborées de façon indépendante par des théoriciens souvent physiciens ou mathématiciens. Elles « cherchent à décrire, et si possible à expliquer, l'apparition, le maintien et la disparition des formes, à comprendre leur genèse et à rendre compte de leur stabilité, et ce dans une multitude de domaines. » [Boutot<sup>2</sup>, 1994]. Ceci correspond à la définition de la morphogenèse au sens de René Thom.

Ces théories présentent donc des modèles mathématiques que les géographes utilisent de plus en plus fréquemment. Elles ne s'opposent pas mais leur diversité est le reflet de la variété des formes qui nous entourent. Nous présentons celles qui sont les plus abouties et qui ont été utilisées par des géographes.

### **2.2.2 Les théories de la forme utilisées par les géographes**

La synergetique, issue des travaux d'Hermann Haken [Haken, 1983], postule qu'il y a une auto-organisation dans un système et qu'elle provient des inter-relations à l'échelle microscopique des différents composants de ce système. Elle s'intéresse ainsi aux processus qui génèrent des structures. Lena Sanders l'utilise afin de comprendre l'organisation spatiale de la répartition des villes [Sanders, 1992].

La théorie des structures dissipatives d'Ilya Prigogine propose une explication de l'auto-organisation de phénomènes. Une structure stable dans le temps et l'espace se crée à partir d'un système loin de l'équilibre (soumis à des contraintes et des flux aléatoires). Par successions et amplifications, l'ordre apparaît à partir du désordre. La stabilité du système s'installe à partir du non-équilibre. Initialement utilisé en thermodynamique, ce cadre théorique sert de référence à la modélisation de nombreux phénomènes (biologiques, sociaux ...). En géographie, il est appliqué pour l'étude de phénomènes urbains comme la dynamique des systèmes de villes [Allen et al., 1982 ; Pumain et al. 1989].

La théorie des catastrophes de René Thom [Thom, 1983] est plus générale que les deux précédentes. Elle est essentiellement mathématique (et n'introduit donc pas de physique) et analyse les discontinuités qui selon elle permettent à la forme d'exister. Thom recherche des changements qualitatifs (catastrophes) et les classe dans une formalisation comprenant sept possibilités (pli, fronce, queue d'aronde, papillon et plusieurs ombilics). En géographie urbaine, cette théorie a été utilisée dans les travaux d'A.G. Wilson [Wilson, 1981].

Enfin, la théorie du chaos (que le lecteur peut aborder avec l'ouvrage de [Gleick, 1987]), soutient qu'une variation infime d'une condition initiale entraîne un changement important dans la vie d'un processus. C'est ce qu'on appelle la dépendance sensible aux conditions initiales et que l'on peut représenter sous forme de trajectoires. Débutant « à peu près » du même point, elles divergent rapidement de manières exponentielles, ce qui les rend imprévisibles. Le chaos remet ainsi en question l'étendue de la doctrine déterministe. Cette théorie envisage donc des formes issues de processus chaotiques comme les mouvements d'une feuille emportée par une rivière. Par la forme de ces trajectoires, elle entretient des liens étroits avec une autre théorie morphologique : les fractales.

---

<sup>2</sup> Nous recommandons vivement la lecture de l'ouvrage de Nicolas Boutot qui présente très clairement les principales théories morphologiques.



Ces nouveaux langages apportent ainsi les moyens d'analyser les formes différemment. Parmi ceux-ci la théorie des fractales par son caractère transversal est bien adaptée aux formes urbaines. Elle est d'ailleurs une géométrie et fait l'objet du paragraphe suivant.

### 2.3 La géométrie fractale pour analyser la ville en 3D

Devant la complexité de certaines formes issues d'équations mathématiques pourtant simples, les mathématiciens du début du XX<sup>ème</sup> siècle les ont qualifiées de monstres mathématiques. Ce désarroi compréhensible était lié à l'impossibilité physique d'en tracer plus de quelques itérations. C'est le mathématicien Benoît Mandelbrot, [Mandelbrot, 1975] qui a forgé en 1975 un néologisme pour nommer ces formes : les fractales. Il a élaboré une théorie sur ces formes fragmentées. L'idée est une révolution qui disqualifie l'universalité (la globalité) de la géométrie euclidienne. En effet, cette dernière devient une vision simplifiée du monde qui nous entoure, une exception et non pas la règle. Les objets naturels ne sont pas aussi élémentaires que des lignes, des surfaces planes ou des sphères parfaites. À l'échelle de l'homme les objets ont des formes très compliquées qui peuvent revêtir un ensemble de qualificatifs tels que rugueuses, fractionnées, déchirées ...

Les formes urbaines telles que nous les comprenons appartiennent à cette famille, comme le montre l'image suivante. En effet, les contours sont sinueux, déchiquetés, irréguliers. . .



Bâti de la ville de Nice (1987)

En géographie, trois auteurs ont été précurseurs dans l'application de cette nouvelle géométrie aux formes urbaines. Michael Batty et Paul Longley ont créé la première modélisation d'une croissance urbaine fondée sur la géométrie fractale [Batty et al 1994]. Pierre Frankhauser a démontré le caractère fractal des formes urbaines et a fourni les bases de la mesure de la ville par la fractalité [Frankhauser, 1994]. Plusieurs travaux ont ensuite poursuivi et amélioré ces premières investigations [Bailly, 1999 ; Genre-grandpierre, 2000]

#### 2.3.1 Introduction à la géométrie fractale

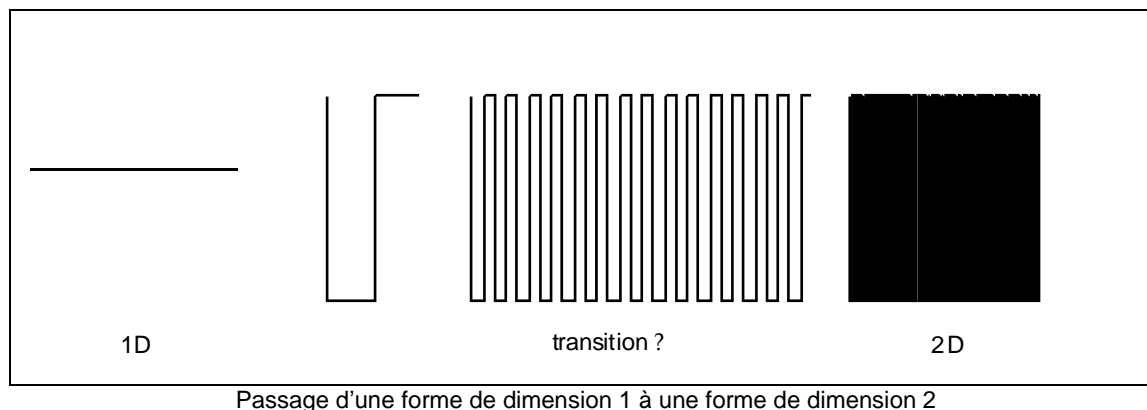
Un objet fractal est défini par trois caractéristiques. La première, essentiellement qualitative, concerne son aspect fragmenté, sinueux. L'observation du monde qui nous entoure confirme l'universalité de ce type de forme.

La deuxième caractéristique est plus difficile à appréhender. Elle concerne la notion d'homothétie interne, c'est-à-dire la conservation de la même structure à différentes échelles. Seules les fractales issues d'équations mathématiques ou de certaines constructions géométriques récursives possèdent cette caractéristique. Pour les objets naturels, on ne trouve pas d'homothétie interne stricte et l'on emploie plutôt le terme d'homothétie « généralisée » ou « statistique » [Tricot, 1999] c'est-à-dire que l'on admet de légères déformations de structures<sup>3</sup>. C'est cette adaptation de la définition mathématique stricte de la fractalité qui a permis son utilisation pour les objets naturels. Une forme naturelle sera donc

<sup>3</sup> On trouve ici un problème soulevé entre autres par Tricot : « . . . la similitude interne *statistique*, ou *généralisée*, dont l'expression reste qualitative (toute partie de la courbe reste semblable à la courbe toute entière, sans préciser ce que semblable veut dire) ».

considérée comme une fractale par extension de la notion d'homothétie interne. Même si l'on doit étendre la définition du terme fractal ou même considérer la ville morphologique uniquement comme un phénomène scalant, il reste que la géométrie euclidienne est moins adaptée que la géométrie fractale pour ce type d'objet.

Enfin la troisième caractéristique est plus mathématique. Elle concerne la dimension de l'objet. Une fractale a une dimension<sup>4</sup> non entière, notée  $D$ , ce qui n'est pas évident à imaginer tant le monopole de la géométrie euclidienne est enraciné dans nos esprits. Une première approche est qu'elle situe l'objet entre deux dimensions euclidiennes. C'est en quelque sorte comme si un ensemble de points était plus qu'un point mais moins qu'une ligne. Ou qu'un ensemble de ligne était plus qu'une ligne mais moins qu'une surface.



Cette caractéristique est utilisée en géographie depuis plusieurs années pour, par exemple, mesurer des réseaux ou des morphologies urbaines.

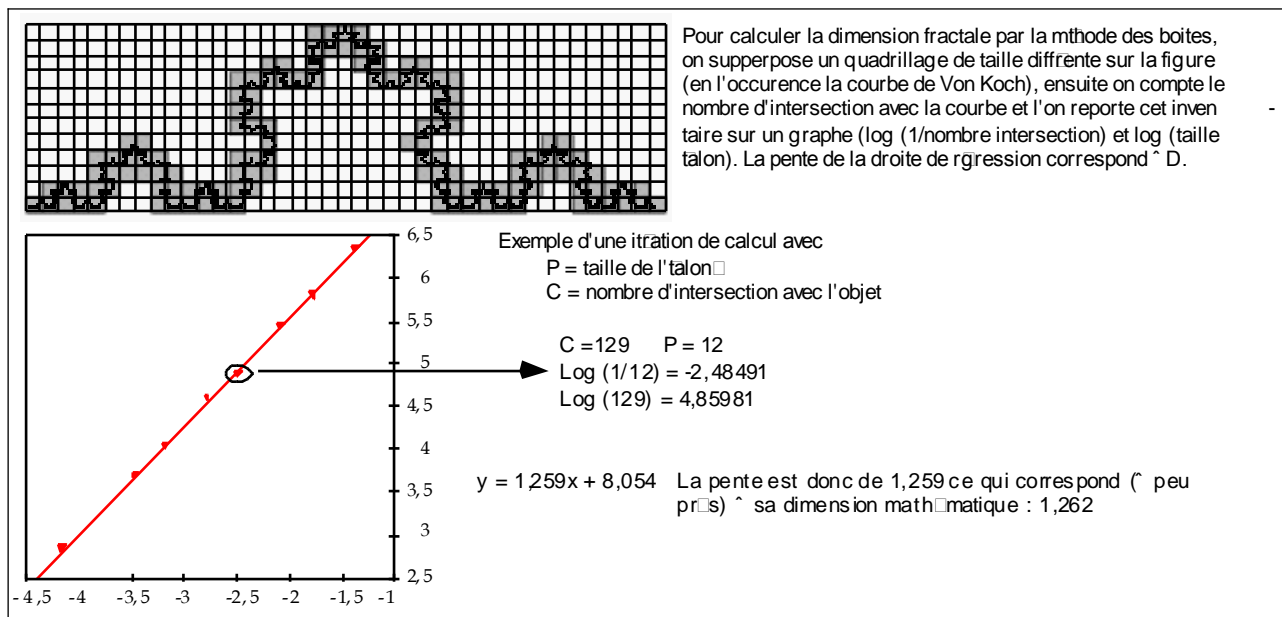
### 2.3.2 Les dimensions fractales comme indices d'organisation spatiale

La géométrie euclidienne envisage un ensemble de formes « simples » dont la dimension indique le nombre de coordonnées nécessaires pour déterminer la position d'un point. Par exemple deux coordonnées sont nécessaires pour définir la position d'un point sur un plan. Ainsi la dimension d'un plan est deux. La dimension s'interprète mathématiquement : Si nous notons  $N$  le nombre d'étalon recouvrant une figure originale et  $S$  le facteur d'échelle, la dimension est égale à  $\log(N) / \log(S)$ . L'utilisation de cette méthode pour toutes figures euclidiennes aboutit à un résultat toujours entier positif. Mais lorsque l'on applique ce principe de recouvrement d'une figure par un étalon à une forme fractale, le résultat n'est plus un entier. Il indique que l'objet est une forme intermédiaire entre deux formes euclidiennes.

La géométrie fractale est ainsi appelée géométrie à dimensions non entières. Le pluriel indique qu'il n'existe pas une dimension fractale mais un ensemble de dimensions qui caractérisent divers aspects de la nature fractale de l'objet étudié. Nous allons détailler une des dimensions fractales les plus connues, la dimension de similitude avec la méthode des boîtes<sup>5</sup>. Elle consiste à quadriller l'objet, puis à comptabiliser les carrés ( $C$ ) intersectant l'objet et à répéter cette opération en faisant varier la taille ( $P$ ) du quadrillage. Les résultats sont reportés sur un graphique avec en abscisse le logarithme de  $1/C$  et en ordonnées le  $\log$  de  $P$ . La pente de la droite de régression donne la dimension. Cette technique, lorsqu'elle est appliquée à un objet euclidien, donne sa dimension entière, ce qui la valide.

<sup>4</sup> En fait il y a plusieurs dimensions fractales dont nous reparlerons plus loin dans l'exposé.

<sup>5</sup> Une autre dimension, la dimension de masse est aussi très souvent utilisée.



### Méthode des boîtes pour le calcul de D

Nous pensons calculer les dimensions fractales sur des coupes de la ville en 3D. Si nous intersectons un plan avec la ville en 3D à une altitude donnée, notée A, nous obtenons une image binaire contenant les bâtiments dont l'altitude est supérieure ou égale à A. Il est ainsi possible de décomposer la ville 3D en un ensemble de couches d'altitudes différentes et de mesurer les formes obtenues. Les résultats devraient apporter des indications sur la répartition de l'altitude du bâti dans la ville. De plus ce type d'analyse peut-être effectué à l'échelle des quartiers permettant la comparaison intra-urbaine.

### Méthode d'extraction des couches d'altitude du bâti

Reste le problème délicat de l'interprétation de ces dimensions. La dimension fractale, en général, formalise l'idée intuitive d'une occupation spatiale de l'objet, mais cela ne suffit pas à l'explication. Des définitions concernant la complexité de l'objet ont été avancées mais elles demeurent dans le flou quant à une explication plus géographique. Il est donc dans nos ambitions de clarifier l'interprétation des dimensions fractales dans les analyses urbaines.

#### 2.3.3 Pour une multifractalité pressentie

Lors de la création du graphe log log, il se peut que le nuage de point par lequel la droite de régression va passer ne soit pas très homogène. Des tendances peuvent apparaître. C'est ce qui définit une homothétie interne « généralisée », par opposition à une homothétie interne stricte caractéristique de fractales mathématiques. Ce nuage inhomogène apparaît dans la plupart des objets naturels. Lorsque ce phénomène se produit, on parle alors de multifractalité. La multifractalité n'est donc pas la fusion de plusieurs structures fractales (comme les différents niveaux de gris pourraient montrer) mais le mélange de plusieurs structures fractales. À notre connaissance, peu ou pas d'études en géographie ont investi le domaine de la multifractalité. Le statut de position de recherche de cet article nous permet de ne pas présenter d'hypothèses à proprement parler sur la nature multifractale de la ville mais plutôt de discuter d'un ensemble de questionnements. Par exemple, quels outils utiliser pour aborder la multifractalité ? L'expérience nous conduit à

envisager la décomposition d'image en ondelettes. Cette technique permet la décomposition d'un signal complexe (une image par exemple) en un ensemble de signaux primaires. Ces signaux pourraient-ils souligner des organisations ? L'attitude vis-à-vis d'une image à niveaux de gris est assez nouvelle pour les géographes qui utilisent la géométrie fractale. Il y a là un domaine innovant dans lequel nous souhaitons aussi investir.

## Bibliographie indicative

- BENEVOLO L, 2000, Histoire de la ville, Editions Parenthèses, Marseille
- BEAUJEU-GARNIER, 1980. Géographie urbaine, A. Collin.
- CHABOT G., 1948, Les villes, Armand Colin, Paris.
- CASTEX J, DEPAULE JC, PANERAI P, 1977, Formes urbaines : de l'îlot à la barre », Paris, Dunod
- CHELKOFF G., 2001, « Formes, formants, et formalités : catégories d'analyse de l'environnement urbain », in L'espace urbain en méthodes, sous la direction de M. Grosjean et JP Thibaud, Editions Parenthèses, Collection Eupalinos, pp. 101-124
- RONCAYOLO M (dir.), 1995, Histoire de la France urbaine, Tome V, Paris, Seuil
- RONCAYOLO M , 2002, Lectures de villes, formes et temps, Collection eupalinos, Edition Parenthèses
- GRAFMEYER Y. (dir)1990, L'école de Chicago, Paris, Aubier
- COSINSHI M., RACINE JB. 1984, « géographie et écologie urbaines » in Les concepts de la géographie humaine, Bailly (dir)
- LACOUR C., 1996, « Forme et formalisations urbaines », in Penser la ville, Théories et modèles, sous la direction de PH Derycke, JM Huriot, et D. Pumain, Edition Anthropos, collection Villes.
- RICHTOT G., 1975, Essais de géomorphologie structurale, Québec, Presses de l'Université Laval.
- DESMARAIS G., 1995, La morphogenèse de Paris, des origines à la Révolution, L'Harmattan, Paris, Montréal
- SALLEZ A., 1996, « L'imaginaire des projets urbains », in Penser la ville, Théories et modèles, sous la direction de PH Derycke, JM Huriot, et D. Pumain, Edition Anthropos, collection Villes.
- LE CORBUSIER, 1925, Urbanisme, Paris, Ed. Grès et Cie.
- MAIGNANT, Gilles. 2002. Pollution et développement durable des villes françaises. Etude de cas : Nice, Marseille, Lyon et Paris. Thèse de l'Université de Nice Sophia-Antipolis, 2 vol. et 1 atlas : 460 p + 157 p.
- 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 2002. 14 p.
- WEBER Christiane. 2001. *Formes urbaines et répartition des polluants*. Besançon : Ve Rencontre Théo Quant, 14 p.
- SERVIGNE Sylvie, LAURINI Robert, KANG Myung-Ah, LI Ki Joune. 1999. *First specifications of an information system for urban soundscape*, 5p.
- YALCINER Ozge. 2002. *Urban Information Systems for Earthquake-Resistant Cities*. ArcUser, (<http://www.esri.com/news/arcuser/0702/earthquake.html>)
- FITZGERALD Brian. 2002. Feasibility of Modeling Urban Environment in 3D. (<http://gis.esri.com/library/userconf/proc02/pap0422/p0422.htm>)
- LEVY A., 1988, « Forme urbaine », in Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement, Merlin P, Choay F, Paris, PUF, 306-309
- GRAFMEYER Y, 1984, Sociologie urbaine, Nathan, Paris
- HAKEN Hermann. 1983. Synergetics, an introduction: Non-equilibrium phase transitions and self-organization in physics, chemistry and biology. Springer,.
- SANDERS Lena. 1992. Système de villes et synergie. Anthropos.
- ALLEN Peter., SCHIEVE W.C. 1982. Self-Organisation and Dissipative Structures. Applications in the Physical and Social Sciences.
- PUMAIN Denise., SANDERS, Lena., SAINT-JULIEN, Thérèse. 1989. Villes et auto-organisation. Paris. Economica.
- THOM René. 1983. Paraboles et catastrophes. Interéditions.
- WILSON AG. 1981. Catastrophe Theory and Bifurcation: Application to Urban and Regional System. Croom Helm.
- GLEICK James. 1987. la théorie du chaos. Albin michel.
- MANDELBROT Benoit. 1975. Les objets fractals. Flammarion
- BATTY, Michael. LONGLEY Paul. 1994. Fractal cities. Academic Press.
- FRANKHAUSER Pierre. 1994. La fractalité des structures urbaines. Anthropos.
- BAILLY Eric 1999. Modèle de simulation fractal et croissance urbaine : étude de cas : Nice, Gênes, Marseille. Thèse de l'Université de Nice Sophia-Antipolis.
- GENRE-GRANDPIERRE Cyril. 2000. Forme et fonctionnement des réseaux de transport : approche fractale et réflexions sur l'aménagement des villes. Thèse de l'Université de Franche-Comté.
- TRICOT Claude 1999. Courbes et dimension fractale. Springer.