

Saisies et Représentations de l'espace urbain

Anne Ruas, Julien Perret, Mickael Brasebin
Laboratoire COGIT – Institut Géographique National

La connaissance de l'espace urbain est un enjeu important pour les défis du XXI^e siècle comme par exemple la maîtrise de l'extension urbaine ou le réchauffement climatique. Dès lors, la ville devient un sujet d'étude crucial pour de nombreux acteurs comme les urbanistes, géographes, architectes ou climatologue. Afin de pouvoir mieux étudier la ville, celle-ci doit être modélisée conformément à la manière dont elle est étudiée. Que ce soit pour mesurer les flux de circulation entre villes ou pour évaluer l'ensoleillement de ses bâtiments, il existe de nombreuses manières pour représenter l'espace urbain. Dans un premier temps, l'article met en avant les différentes manières d'abord la représentation de l'espace urbain. Ensuite, il traite des nouvelles possibilités d'acquisition de base de données 3D et de constitution de base de données spatio-temporelle, qui offrent de nouvelles dimensions pour pouvoir explorer, comprendre et analyser la ville.

De l'espace à la représentation

L'espace géographique est d'une grande richesse et complexité. Pour nommer cet espace, le décrire, l'analyser, on le découpe virtuellement en entités selon une classification prédéfinie. Cet exercice n'appartient pas qu'aux seuls géographes, puisque les enfants dès leur plus jeune âge s'exercent à regrouper, classer et nommer. Cet exercice est également indispensable pour la fabrication de cartes ou de base de données géographiques.

En regardant l'espace géographique le cartographe se pose deux questions :

1. Qu'est ce que je représente de l'espace réel (quelle information) ?
2. Comment je représente l'information que je sélectionne ?

Traditionnellement ce sont les « spécifications » qui décrivent l'écart entre le monde que l'on voit (ou que l'on appréhende) et sa représentation, qu'elle soit numérique ou sous forme papier. On parle souvent de Terrain Nominal pour décrire « *La modélisation du monde réel au travers du filtre des spécifications* ».

À l'heure de l'existence de multiples données numériques décrivant souvent différemment l'espace géographique on a besoin d'*intégrer* des données, c'est-à-dire les mettre ensemble, afin que le résultat fournisse une représentation cohérente et enrichie de l'espace. C'est par exemple un des enjeux décrit dans la directive INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in the European Community) qui vise à proposer des données multithèmes et multirésolutions sur l'espace européen. Cette intégration de données n'est en réalité pas simple. En effet on décrit le monde réel de façon imparfaite (avec imprécision et incomplétude) et on décrit ce que l'on a saisi également de façon imparfaite (avec imprécision, incomplétude et parfois incertitude). Dit autrement les données géographiques sont imparfaites. Les métadonnées, qui sont des informations décrivant ces données, le sont aussi. Ainsi, lorsqu'on dispose de données géographiques, on ne peut pas savoir parfaitement comment ces données décrivent le monde réel.

Les causes de ces imperfections sont bien connues : les phénomènes géographiques peuvent être par nature difficiles à décrire, à percevoir, à saisir. Lors de la saisie, un ensemble d'imperfections dues à des erreurs d'interprétations, des imprécisions de mesure, d'oublis se glissent dans le processus. De plus le monde étant en continuelle évolution, une base de données ou une carte ne décrivent qu'un « instantané » de ce monde ou plutôt un ensemble d'instantanés. Toutes les informations présentes sur une carte ou dans une base de données ne sont pas saisies au même instant, la cohérence temporelle n'est pas garantie entre tous les éléments d'une base de données.

Les instituts de cartographie mettent au point des spécifications qui décrivent le contenu idéal de leurs cartes et bases de données puis des processus et protocoles de saisie les plus précis possible afin de produire de l'information de la meilleure qualité possible en fonction des objectifs fixés.

On utilise des représentations du monde, plus ou moins détaillées et précises. Parmi les objets que l'on représente, la ville est incontestablement un sujet d'intérêt majeur puisqu'elle est le lieu privilégié de vie, d'interactions et d'échanges que ce soit avec les campagnes alentours ou les autres villes. Il y a ainsi de multiples représentations de la ville, à différents niveaux de détail qui répondent à des problématiques différentes.

Au plus simple, la ville est représentée par un point ou une petite surface, duquel émerge des réseaux qui traduisent des flux entre cette ville et son environnement (d'autres villes ou sa campagne). On parlera de bourg ou village lorsqu'une ville n'échange qu'avec sa campagne (essentiellement pour se nourrir) et de ville lorsqu'il y a échange avec d'autres villes. Les réseaux d'échanges sont généralement les réseaux de communication tels que les routes, chemins, rivières, mais on peut cartographier des flux d'information tels que les échanges Internet. Ce type de représentation (figure 1) est le plus simple et le plus répandu. La ville est située, son importance se perçoit par la taille du rond ou du polygone et par le nombre d'arcs qui y convergent. On trouve ce type de représentation sur les cartes au 1 : 1M, 1 : 250 000 et même 1 : 100 000 comme l'illustre la figure 2. Plus l'échelle est grande (1 : 100 000 par rapport au 1 : 250 000) plus l'intérieur de la ville est décrite par les rues principales.

Figure 1 : Représentations de la ville

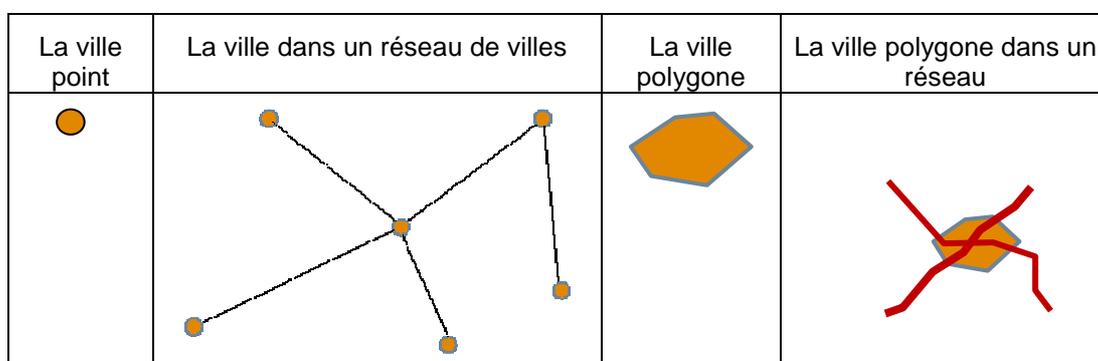


Figure 2 : la ville sur des cartes petites échelles



Les représentations du niveau de détail plus fin intègrent les rues et les bâtiments sous la forme de petits polygones. À ces échelles, la description de la forme des bâtiments importe peu, on décrit plutôt l'agencement des bâtiments les uns par rapport aux autres (les patterns). Au 1 : 50 000 on ne peut pas représenter tous les bâtiments, on privilégie la répartition du groupe de bâtiments ou son emprise. Au 1 : 25 000, la représentation est presque exhaustive, on représente tous les bâtiments sauf les plus petits de type cabanes. Alors qu'au 1 : 50 000 le réseau reste prépondérant, au 1 : 25 000 on perçoit bien mieux les îlots et les types d'habitats. Ces échelles (figure 3) permettent de décrire une emprise assez grande (une ville et sa banlieue, plusieurs villages dans une vallée, etc.), la ville est donc en contact avec son proche extérieur. Lorsqu'on regarde en détail ces cartes, on perçoit un ensemble d'îlots à l'intérieur ou en périphérie de la ville.

Le niveau de détail le plus fin correspond au plan de ville. À ce niveau de détail, on est à l'intérieur de la ville, on perçoit l'intérieur de chaque îlot (plan au 1 : 5 000 figure 4) ou chaque bâtiment (plan au 1 : 500). À ces échelles on peut représenter les adresses (nom des rues et numéro des bâtiments), la forme des bâtiments, leur fonction.

Figure 3 : la ville sur des cartes moyennes échelles

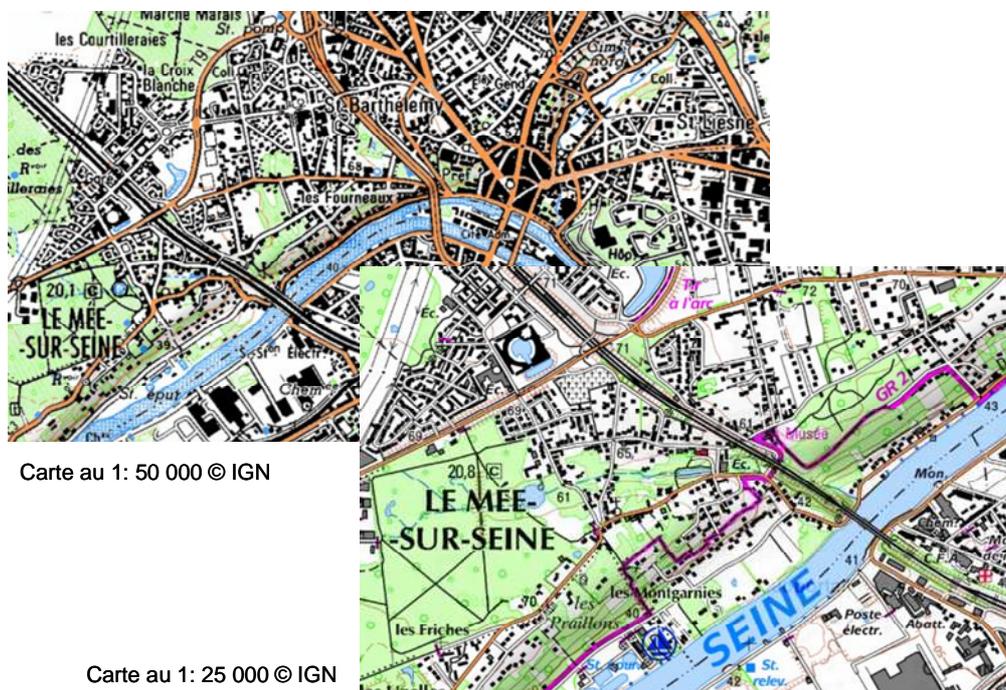


Figure 4 : le plan de ville



Toutes ces représentations répondent à des besoins différents allant par exemple de l'aire d'influence d'une ville (1 :1M ; 1 :250 000) à la planification urbaine et l'aménagement de quartiers (1 :5 000). On notera que si la notion de niveaux de détail est nécessaire, la définition précise de ces niveaux est difficile car contextuelle à l'analyse, « ce n'est pas le même phénomène et la même portion de la réalité que l'on envisage aux différents niveaux d'analyse » [10]. Le fait de réaliser des cartes a priori, à différentes échelles, permet de couvrir un ensemble de besoins standards.

La carte est une représentation codifiée qui propose une représentation simplifiée du territoire. À l'heure du numérique, ces représentations 2D restent indispensables à notre compréhension de l'espace. Cependant, elles ne sont pas suffisantes pour régler toutes les problématiques liées au territoire, deux approches complémentaires permettent une meilleure connaissance de celui-ci. Le premier est la constitution de bases de données urbaines en 3D que nous décrivons au chapitre suivant. Ces représentations nécessitent tout d'abord des processus de saisie spécifiques mais surtout la conception de logiciels ad hoc capables de gérer et de visualiser d'importants volumes de

données et de les analyser. Les données 3D urbaines sont présentes sur les géoportails, qui sont de plus en plus enrichies de données thématiques.

Le second courant est lié à l'analyse de l'évolution de la ville, et notamment sa morphologie (figure 5). Pour cela il faut construire des bases de données historiques, mettre en relation les entités identiques et analyser l'évolution du territoire sur une période donnée. La section 3 présentera une mise en œuvre sur une période assez courte, de 1950 à 2010 en zone péri-urbaine : le projet GeOpenSim.

Figure 5 : Evolution du territoire et de sa représentation



La Ville en 3D

De plus en plus de représentations urbaines en 3D sont disponibles notamment sur les géoportails. De nombreux projets de recherche ont récemment été financés par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) et les pôles de compétitivités afin d'améliorer la constitution de bases de données urbaines 3D, enrichies de multiples informations. On notera entre autres le projet Terra Numerica (<http://terranumerica.com/>) et les projets financés par l'ANR CityVIP (www.lasmea.univ-bpclermont.fr/CityVip/) et iTowns (www.itowns.fr). A l'international il existe de nombreux travaux de construction de données 3D par exemple à Berkeley [8].

Lorsque l'on cherche à constituer un modèle urbain en 3D, cela signifie que l'on veut créer une représentation des entités qui composent la ville par des objets en 2D5 (avec un z qui décrit une surface et non un volume) ou 3D (entités directement modélisées en 3D). Les entités au sol telles que les routes peuvent être représentées en 2D5, c'est-à-dire par une suite de coordonnées (x,y,z) sur l'axe de la route. Les bâtiments eux sont représentés par des volumes ou, le plus souvent, un ensemble de faces planes connexes.

La section suivante présente de façon très simplifiée les différents modes de saisie des données 3D, avant de décrire les modélisations et outils nécessaires à la manipulation de données urbaines 3D.

Les méthodes de saisie pour construire une ville en 3D

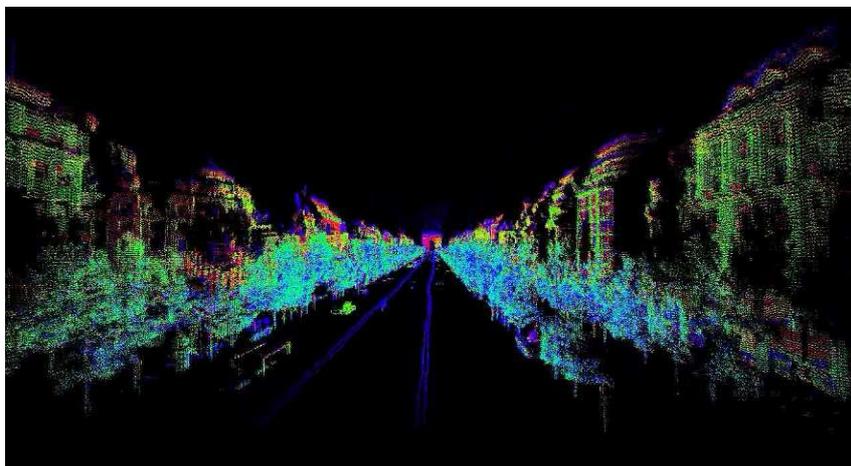
La saisie de coordonnées d'entités se fait par mesures d'angles et/ou de distances. On calcule toujours les coordonnées de points que l'on ne connaît pas à partir de points que l'on connaît dans un système de coordonnées défini. Soit on 'vise' une entité dont on veut saisir la géométrie à partir de points de vue dont on connaît la géométrie (c'est par exemple la technique du LIDAR ou de la photogrammétrie), soit on se positionne à l'endroit inconnu et on « vise » des points connus (c'est par exemple la technique des relevés GNSS (Global Navigation Satellite System)).

Un relevé par GNSS calcule la position du capteur par réception de signaux émis par différents satellites. La position de chaque satellite est connue à chaque instant, la position du capteur GPS est calculée par le capteur. Les relevés GNSS sont pratiques pour saisir les coordonnées d'entités sur lesquelles on peut se déplacer telles que les routes.

Le LIDAR est un distance-mètre laser qui mesure des distances à une entité visée. Le lidar émet des ondes et enregistre le retour de ces ondes pour calculer des distances à une cadence très élevée. Il peut être porté par un avion par exemple pour construire un modèle numérique d'élévation (au dessus des entités) ou de terrain (au sol). Le lidar peut également être porté par un véhicule terrestre pour

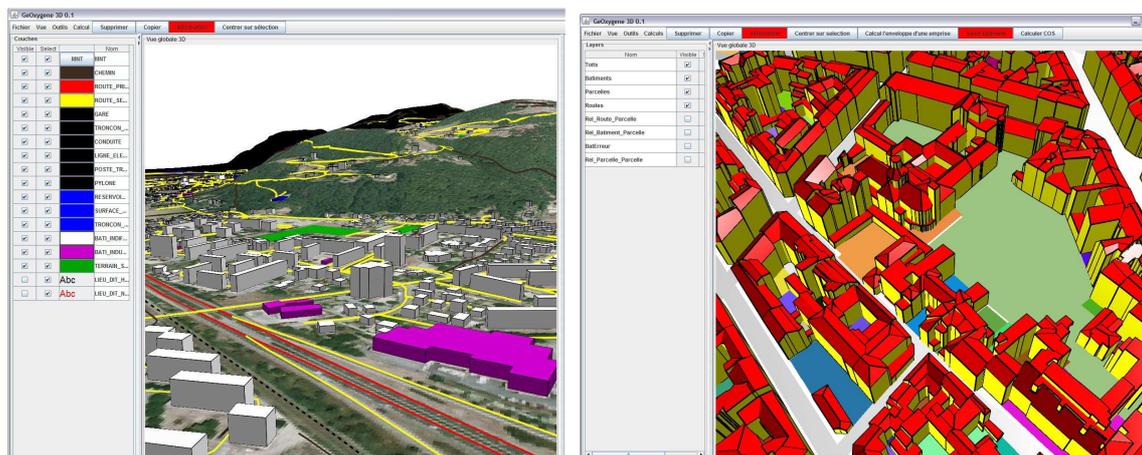
générer un nuage de points donnant le contour des entités visées. Cette technique est utilisée en topographie mais aussi en archéologie ou pour la saisie du contour d'ouvrages d'art. Le résultat d'une saisie est un nuage de points géo-référencés en trois dimensions, mais non structurés. Si en regardant ces points on peut reconnaître des objets (figure 6), la géométrie des objets n'est pas reconstituée sous la forme de plans ou de volumes et nécessite ainsi un traitement informatique. Des recherches actuelles visent à optimiser l'information issue du Lidar en zone rurales et urbaines (voir par exemple [13]).

Figure 6 : Nuage de points des Champs-Élysées acquis par Lidar terrestre © IGN



Pour créer des modèles urbains 3D, on peut faire des relevés directs à l'aide de tachéomètres qui permettent le calcul d'angles et de distance, cependant ce procédé est très long à réaliser. On a souvent recours à la saisie par relevés photogrammétriques qui permet de reconstituer le volume des entités en les photographiant selon différents angles de vue pour reconstituer leur volume. La géométrie des objets de la couche BDTopo du RGE de l'IGN est par exemple saisie par relevés photogrammétriques à partir de photographies aériennes (figure 7).

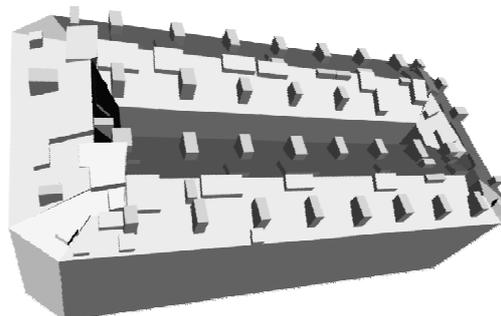
Figure 7 : Objets du RGE (gauche) et de Bati 3D (droite) de l'IGN saisis par photogrammétrie © IGN



Pour faire des relevés photogrammétriques il faut des images prises selon des angles de vue différents et des points d'appuis qui sont des points que l'on reconnaît dans les images et dont on connaît leurs coordonnées dans un système de référence. Le relevé photogrammétrique en lui-même consiste premièrement à reconstituer le modèle géométrique de la prise de vue grâce aux données du véhicule (satellite, avion, voiture), de l'angle de vue et des points d'appuis. Dans un deuxième temps le contour de chaque objet visible est saisi soit par un opérateur humain soit de façon automatique. La qualité de la géométrie dépend de la distance entre le capteur et l'objet à saisir, du nombre d'images et de la qualité et du nombre de points d'appui. Si pour la couche BDTopo du RGE de l'IGN on a utilisé deux angles de vues, qui permettent d'obtenir des bâtiments sous la forme de boîte à chaussures, on peut obtenir des formes bien plus précises lorsqu'on utilise davantage d'angles de vue

comme c'est le cas pour les modèles urbains récents (figure 8). Evidemment ce processus est beaucoup plus onéreux.

Figure 8 : Modèle 3D obtenu à partir de 6 à 8 images aériennes, © IGN



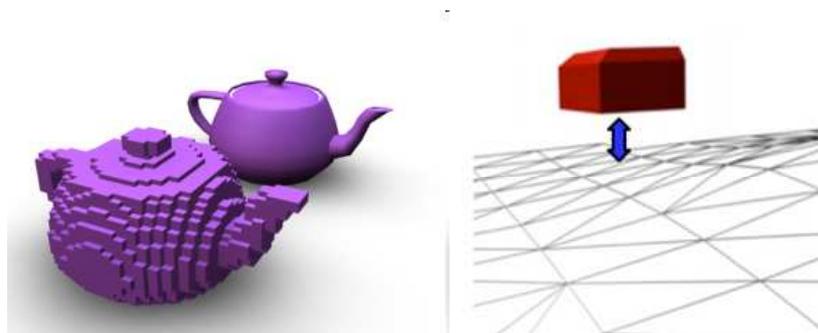
Une fois que l'on dispose d'un modèle 3D, il est possible d'y plaquer des images qui permettent un rendu réaliste de la scène. Des recherches sont en cours pour améliorer les recalages d'images autant au niveau géométriques (assurer les verticalités et horizontalités des lignes que l'on voit dans les images) qu'au niveau radiométrique pour éviter la perception des raccords d'images. Les recherches en cours visent à détecter le plus d'objets possibles dans les images dont par exemple les arbres et leur nature et le mobilier urbain (bancs, abris-bus, etc.).

Une dernière méthode permettant la saisie pour construire une ville 3D est la saisie manuelle. De nombreux logiciels (3DsMax, Maya, Blender etc.), utilisés notamment dans les films d'animations, permettent à un infographiste de reconstruire des villes en 3D avec un sens du détail particulièrement élevé et une grande liberté de représentation. Si les résultats peuvent être particulièrement impressionnants pour le public, ces modélisations posent le problème de l'exactitude géométrique et du parti pris par le concepteur de la scène.

Modélisations et outils pour gérer les représentations numériques 3D

Après la phase d'acquisition de la géométrie des objets, il faut les rendre cohérents les uns avec les autres et les représenter. Deux questions se posent généralement : comment modéliser les relations de connexité entre les faces décrivant les objets, soit à l'intérieur des objets, soit entre objets puis comment représenter la géométrie (figure 9).

Figure 9 : Quel modèle géométrique choisir ?, Comment assurer la cohérence géométrique entre un bâtiment et un terrain ? [20]



De nombreuses classifications des modèles géométriques et topologiques existent. Des synthèses sont disponibles dont de nombreux ouvrages ou thèses de doctorats dont celle de Poupeau[20], dans laquelle il présente plusieurs classifications dont celle de Requicha [23]. Il distingue trois catégories :

- les modèles d'énumération spatiale (*spatial enumeration*) qui décomposent l'objet à l'aide de primitives volumiques identiques (cube, tétraèdre, hexagone, etc.) ;
- les modèles constructifs (*Constructive Solid Geometry*) qui proviennent d'opérations géométriques (union, intersection, différence etc.) sur des solides paramétrés (ex. : sphère, parallélépipède) ;
- et les modèles fondés sur une description de la frontière (*Boundary Representation*) de l'objet.

Des modèles décrivant à la fois la géométrie et la topologie intra objets ont été proposés dont le modèle FDS (Formal Data Structure) de Molenaar[14].

En réalité il n'y a pour l'instant pas de modèle idéal, chaque modèle étant adapté à différentes tâches : optimisation du stockage ou de la visualisation ou de l'analyse spatiale, etc. Les solutions actuelles, dans le domaine de la géomatique, tendent à créer un modèle pivot de stockage en se basant sur le modèle ISO 19 107 qui décrit les composantes géométriques et topologiques sous la forme d'objets. L'utilisation d'un format standard est aujourd'hui un atout considérable puisque cela permet un échange de données et d'applications. Autour du format pivot, différentes fonctionnalités sont développées, pour chaque fonctionnalité on peut-être amené à convertir la géométrie et la topologie des objets dans un autre format ad hoc pour simplifier les opérations [4]. Parmi les formats standards, on notera CityGML (www.citygml.org) comme format d'échange standard centré sur la thématique de la ville. Adopté par l'OGC et particulièrement adapté à la description de données urbaines, CityGML porte la description de la géométrie des objets et leur géo-référencement. Il porte les textures associées aux murs ou toits et il est multi-résolution puisqu'il possède 4 niveaux standard le LOD0 (sans z), le LOD1 de type boîte à chaussure, le LOD2 et LOD3 permettant de décrire les toits, portes, fenêtres, etc. composants les bâtiments. CityGML peut décrire tout type d'objets, des bâtiments bien sur mais aussi des routes, des parcs, etc.

La 3ième dimension apporte des informations primordiales pour analyser certains phénomènes urbains. Comme il est nécessaire, selon le thème étudié et l'approche d'analyse retenue, de choisir une modélisation adaptée, de nombreuses plateformes 3D ont vu le jour, chacune dédiée à un thème particulier comme par exemple :

- la consommation énergétique des bâtiments [3],
- l'énergie solaire reçue par un bâtiment [4],
- l'accessibilité visuelle [22],
- le sous-sol [20],
- le cadastre 3D (<http://www.juritecture.net/3d.html>),
- la visualisation d'enveloppes urbaines réglementaire [5]
- ...

La multiplication de plateformes n'aide pas à la prise de décision car il peut être nécessaire de croiser ou de synthétiser le résultat de différentes analyses. Ainsi, certaines plateformes se sont spécialisées dans l'intégration d'outils traitant de thématiques différentes. C'est le cas de celle développés dans le cadre du projet TerraMagna (www.terramagna.org), intégrant des données environnementales (pollution aérienne, sonore et données de trafic) et celle dans le cadre du partenariat Ville Numérique, qui vise à faire collaborer différents acteurs de la ville pour mettre leurs outils en commun au sein d'une plateforme.

Représentation du temps : Analyse de l'espace urbain et son évolution

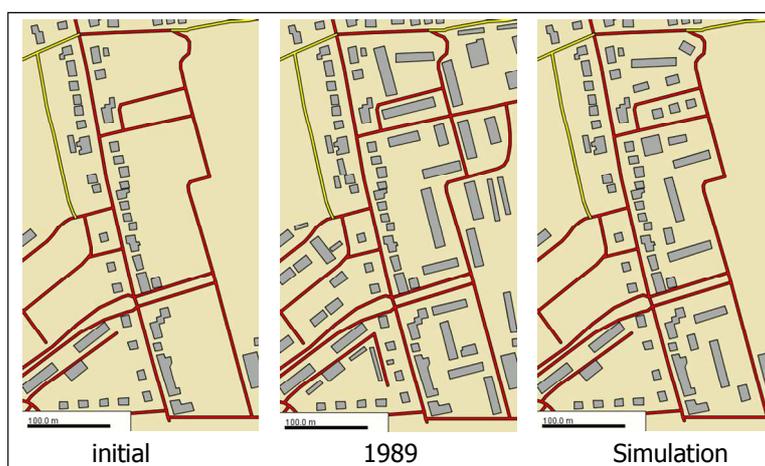
La spécification, l'acquisition et la maintenance des données urbaines sont des processus complexes qui mobilisent de nombreuses ressources aussi bien matérielles qu'humaines. Une fois la constitution initiale d'une base de données effectuée, c'est la maintenance de celle-ci qui détermine l'actualité des données de la base de données, c'est-à-dire leur temps de validité. Jusqu'à la mise en place de bases de données pour la gestion des données géographiques, nos représentations étaient en effet limitées principalement à des séries de clichés (snapshots) figés dans le temps. C'est le cas, notamment, des cartes topographiques. Le projet GeOpenSim a ainsi proposé l'utilisation de cartes topographiques anciennes et de photographies anciennes pour la constitution de bases de données spatio-temporelles [17].

L'amélioration des instruments et outils informatiques permet désormais de réduire le coût de maintenance et de proposer la mise en place de processus de mise à jour dits « en continu », le plus souvent en collaboration avec des partenaires locaux, en particulier les collectivités locales. Il s'agit ainsi, dans une certaine mesure, de rapprocher le temps de mise à jour (souvent appelé temps de transaction) du temps de validité des données. Les bases de données permettant de gérer ces deux temps (temps de validité et temps de transaction) sont appelées base de données bi-temporelles. Leur intérêt est notamment de permettre de stocker l'historique des modifications de la base de données et ainsi de pouvoir récupérer les erreurs (selon le même principe que la correction des erreurs d'enregistrement et de traitement comptables).

Néanmoins, les données géographiques contiennent à la fois des informations sémantiques, spatiales et temporelles. Peuquet[18] propose ainsi la triade quoi/où/quand (what/where/when) pour la gestion de données spatio-temporelles. L'intérêt d'une telle modélisation est de décomposer les objets étudiés pour pouvoir aborder les phénomènes selon différents angles, permettant ainsi une analyse plus riche des phénomènes étudiés. Cette triade, est reprise dans le modèle OH-FET[24] conçu pour l'étude de la ville sur la longue durée. Dans ce modèle, l'objet historique (OH) est défini comme le produit cartésien des trois ensembles Fonction, Espace et Temps. Un objet historique est ainsi défini à l'aide de la granularité spatio-temporelle[11]. De tels modèles, multi-représentation, permettent par ailleurs de représenter des relations complexes entre les objets modélisés, notamment de hiérarchies[12].

Goodchild[9] suggère que les sciences de l'information géographique se sont focalisées principalement sur la forme (ce à quoi le monde ressemble, notamment du point de vue cartographique) plutôt que sur les processus sous-jacents (comment). Pour Peuquet[19], cela implique que les outils développés permettent une visualisation et une analyse complexe de larges quantités de données, mais que les leçons à tirer de tels outils dépendent entièrement de l'expertise, de l'expérience et de la mémoire des experts manipulant ces outils. Peuquet propose ainsi d'étendre la triade « quoi/où/quand » pour y inclure « comment » (ensemble de règles décrivant les processus) et, à terme, « pourquoi ». Ce sont aujourd'hui les outils issus de la théorie des systèmes complexes [2][15] et des Systèmes Multi-Agents [7] qui sont les plus prometteurs pour la modélisation des processus. En effet, les systèmes urbains sont constitués d'un grand nombre d'entités en interaction. Ces entités appartiennent de plus à différentes échelles et dimensions (géographiques, sociales, économiques, etc.). Les approches basées agent fournissent des moyens flexibles et riches pour décrire le comportement des entités et ainsi modéliser nos connaissances sur les processus[25]. Ces processus peuvent alors être simulés afin de mieux comprendre les évolutions passées ou d'analyser des scénarios alternatifs selon la logique du « que se passerait-il si ... ? » [1][16][21].

Figure 10: Simulation de la densification d'un îlot urbain © GeOpenSim 2011



Le coût d'acquisition de données historiques freine l'analyse des dynamiques spatiales mais des projets tels que GeOpenSim (geopensim.ign.fr) commencent à proposer des modèles permettant la constitution des bases de données historiques, la représentation de différents scénarios d'évolution, la simulation de l'évolution de la ville selon ces scénarios et la comparaison d'états. Ces outils d'exploration – et non de prédiction- sont très certainement prometteurs pour notre compréhension des dynamiques et des facteurs les influençant.

Bibliographie

- [1] Batty, M.
[Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals](#)
 MIT Press, 2007
- [2] Bertalanffy, L.
[General System Theory](#)
 Penguin Books, 1972
- [3] Bouyer, J.
[Modélisation et simulation des microclimats urbains Etude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments](#)
 Thèse de doctorat Université de Nantes et Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2009
- [4] Brasebin, M.
[GeOxygene: An Open 3D Framework for the Development of Geographic Applications](#)
 12th International Conference on Geographic Information Science, 2009
- [5] Brasebin, M., Perret, J., Haëck, C.
[Un système d'information géographique 3D pour l'exploration des règles d'urbanisme](#)
 Conférence SAGEO 2010 (Spatial Analysis and GEOmatics), 2010
- [6] Carneiro, C., Morello, E., Desthieux, G., Golay, F.
[Urban environment quality indicators: application to solar radiation and morphological analysis on built area.](#)
 3ieme conférence internationale de visualization, image et simulation (WSEAS), 2010
- [7] Ferber, J.
[Les Systèmes multi-agents : Vers une intelligence collective](#)
 InterEditions, 1995
- [8] Frueh, C., Zalhor, A.
[Constructing 3D City Models by Merging Ground-Based and Airborne Views](#)
 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003
- [9] Goodchild, M.
[Giscience, geography, form, and process](#)
 Annals of the Association of American Geographers, 2004
- [10] Lacoste, Y.
[Les objets géographiques, Cartes et figures de la terre](#)
 Centre Georges Pompidou de Paris, 1980
- [11] Langlois, P.
[Complexité et systèmes spatiaux : Modélisations Géographiques](#)
 Traité IGAT, 2005
- [12] Lorho, T.
[SIGUR : Un SIG pour la pratique de l'archéologie en milieu urbain](#)
 Archéologia e Calcolatori, 2008
- [13] Mallet, C.
[Analyse de données lidar à Retour d'Onde Complète pour la classification en milieu urbain](#)
 Thèse de doctorat IGN et Télécom Paris, 2010

- [14] Molenaar, M.
A formal data structure for 3D vector maps
EGIS'90, 1990
- [15] Morin, E.
Introduction à la pensée complexe
Edition du Seuil, 2005
- [16] Perret, J., Curie, F., Gaffuri, J., Ruas, A.
Un système multi-agents pour la simulation des dynamiques urbaines
18èmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA'10), 2010
- [17] Perret, J., Boffet Mas, A., Ruas, A.
Understanding Urban Dynamics : the use of vector topographic databases and the creation of spatio-temporal databases
24th International Cartography Conference (ICC 2009), 2009
- [18] Peuquet, D.J.
It's about time: A conceptual framework for the representation of temporal dynamics in geographic information systems
Annals of the Association of American Geographers, 1994
- [19] Peuquet, D. J.
The Multi-Representation of Space-Time Information
International Conference on Virtual Geographic Environments, 2008
- [20] Poupeau, B.
Modélisation 3D du sol et du sous-sol pour les risques
Thèse de doctorat IGN et Université Paris-Est, 2007
- [21] Sanders, L., Favaro, J.-M., Mathian, H., Pumain, D., Glisse, B.
Intelligence artificielle et agents collectifs : le modèle EUROSIM
Cybergeo, 2007
- [22] Ramos, F.
Modélisation et Validation d'un Système d'Information Géographique 3D opérationnel
Thèse de doctorat IGN et Université Paris-Est, 2007
- [23] Requicha, A. A. G.
Representations for Rigid Solids: Theory, Methods and Systems
Computing Surveys, 1980
- [24] Rodier, X., Saligny, L.
Modélisation des objets historiques selon la fonction, l'espace et le temps pour l'étude des dynamiques urbaines dans la longue durée
Cybergeo, 2010
- [25] Thériault, M., Des Rosiers, F.
Information géographique et dynamiques urbaines 1 : analyse et simulation de la mobilité des personnes
Traité IGAT, 2008