

Un modèle urbain numérique... et puis ? Vers une *étude d'utilité*

Cláudio CARNEIRO, Suisse

François GOLAY, Suisse

Mots clés : modélisation urbaine, indicateurs urbains, systèmes laser aéroportés (LIDAR), systèmes d'information géographique (SIG)

SOMMAIRE

Les outils de modélisation et de visualisation 3D sont aujourd'hui encore dominés par ce que la technologie peut offrir: l'importance donnée à la représentation des objets est prépondérante. D'un autre côté, très peu d'attention est donnée à la meilleure façon d'articuler ces interfaces graphiques avec des données plus abstraites, visant leur application dans des phases de planification et d'analyse spatiale. Ces environnements 3D présentent généralement un ensemble d'objets à travers lesquels l'utilisateur peut se « promener », mais il ne peut que très rarement accéder à des informations pertinentes, efficacement agrégées pour le problème qu'il doit résoudre.

On réalise donc que pour combler ces lacunes, les informations attendues du modèle urbain 3D doivent être précisées, tout comme les fonctions nécessaires à leur agrégation et leur prise en compte dans les processus décisionnels. C'est aussi souvent sous forme d'indicateurs géoréférencés que ces informations peuvent être efficacement présentées aux décideurs concernés.

L'utilité et l'utilisabilité de ces données pour l'étude du développement urbain restent cependant discutables. Plusieurs questions peuvent se poser : quelles activités spécifiques peuvent profiter de la troisième dimension ? Quels sont les besoins en informations 3D ? En effet, les besoins (par exemple, par rapport à la nature des données, au niveau de détail ou à l'échelle à utiliser) en matière d'indicateurs de développement et durabilité urbains et la méthodologie pour les construire restent largement ouverts et seront l'objet d'études et réflexions approfondies.

La méthode de recherche présentée est liée à la définition de ces indicateurs, qui sont établis en fonction des données et technologies 3D disponibles et d'une évaluation des besoins parmi les utilisateurs de ce type de données.

Key-words: urban modelling, urban indicators, aerial laser scanning (LIDAR), geographical information systems (GIS)

ABSTRACT

The visualization of specific 3D urban scenes can be done calling upon different techniques, from those more traditional (for example, photogrammetry) to the most advanced ones (for example, laser scanning that uses different techniques and algorithms of selection and modelling of 3D points clouds).

The use and usability of this kind of data for the study of urban development remain however debatable. Indeed, indicators for urban development and durability are highly necessary and the best methodology to build them is largely open and will be the object of studies and thorough reflections.

The research method is directly related to the definition of these indicators that are established according to the available 3D data and technologies and on the basis of an assessment of the specific needs among the diverse users of this type of data.

1 INTRODUCTION

Selon Roncayolo (1988), la notion de ville implique, entre autres, un aménagement des espaces et des objets urbains dans le cadre d'une organisation collective (morphologique de la ville). En plus, en raison des activités humaines, plusieurs phénomènes fonctionnels (par exemple le bruit routier) peuvent être aussi modélisés et représentés dans un espace tridimensionnel (3D) de la ville: les modèles 3D urbains¹.

Depuis quelques années, avec l'émergence de nouvelles technologies, plusieurs techniques et algorithmes de reconstruction de modèles 3D urbains ont été proposés. Ceux-ci peuvent être plus ou moins détaillés selon les utilisations qui leur sont prévues et en considérant aussi la nature des données, les niveaux de détail de représentation (NDR) à intégrer, les échelles de visualisation, etc. Généralement, la mise en place et la maintenance de ces modèles 3D sont très coûteuses du fait des techniques et processus complexes qui doivent être mis en œuvre et qui ne peuvent à ce jour encore être automatisés si l'on souhaite obtenir des résultats suffisamment précis et fiables (Kaartinen et Hyypä, 2006).

Pour démontrer l'utilité et l'utilisabilité réelles de ces modèles urbains numériques, le travail de recherche présenté ici a pour but principal de développer des processus d'acquisition, d'agrégation et de présentation d'indicateurs de l'évolution urbaine dans une perception tridimensionnelle de la ville et d'en estimer la plus-value pour la compréhension des phénomènes urbains et pour la prise de décision.

En effet, les besoins en matière d'indicateurs de développement et durabilité – par exemple, faut-il ou non passer par la reconstruction tridimensionnelle complète et précise de la ville ? – et la méthodologie pour les construire sont encore largement méconnus. Cet article dresse donc un portrait de l'état de l'art et propose un tour d'horizon des besoins sur la base de cas d'études réels (en milieu urbain) avec des utilisateurs « métier » de la ville de Genève.

2 BASES TECHNOLOGIQUES ET METHODOLOGIQUES

La modélisation 3D des villes est un thème de recherche qui intéresse différents domaines d'application. Dans les dernières années plusieurs paradigmes de modélisation ont été mis en place dans trois axes de recherche principaux :

- Systèmes d'Information Géographique (SIG) 3D (Königer et Bartel, 1998) ;
- Infographie (« Computer graphics », Foley *et al.*, 1995) ;
- Architecture, ingénierie, construction et aménagement du territoire et des espaces urbains (Eastman, 1999).

Tandis que les SIG 3D servent à gérer des modèles 3D de données géoréférencées à différentes échelles de visualisation, les données 3D intégrées dans le domaine de l'architecture et urbanisme fournissent des modèles plus détaillés et précis relatifs à des processus de construction de nouvelles infrastructures (Kolbe et Plümer, 2004). L'infographie a avant tout pour objet la visualisation des modèles 3D urbains. La représentation de la géométrie et topologie des objets 3D a été investiguée (entre autres) par Herring (2001), Ellul et Haklay (2006). La gestion de modèles 3D multi-échelles a plus particulièrement été mise en discussion par Gröger *et al.* (2004).

¹ Par « modèle 3D Urbain », on comprend une description de la ville sous forme d'objets tridimensionnels assortis de caractéristiques sémantiques pertinentes.

3 RECONSTRUCTION DE MODELES 3D URBAINS

3.1 Sources de données

Plusieurs sources de données sont disponibles pour la mise en place de modèles 3D urbains: données vectorielles à 2D, données raster à 2.5D, données attributaires stockées dans des bases de données et contenant des informations altimétriques relatives aux objets à représenter, données acquises par capteurs laser (LIDAR²) aéroportés et terrestres et photos aériennes et terrestres (Figure 1).

À partir des données LIDAR ou des orthophotos (images aériennes rectifiées géométriquement et radiométriquement) on peut générer les modèles numériques de terrain (MNT) et les modèles numériques de surface (MNS). Pour des études de modélisation 3D plus spécifiques, on peut encore générer le modèle numérique de hauteur (MNH), qui correspond à la différence entre le MNS et le MNT.

Dans des cas plus spécifiques, comme pour la modélisation 3D à l'intérieur des bâtiments, on peut aussi avoir des données issues de la CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Celles-ci peuvent être intégrées dans des nouveaux projets de construction avec un grand niveau de détail.



Figure 1 – Quelques exemples de sources de données disponibles dans la ville de Genève. De gauche à droite : points bruts obtenus par LIDAR aéroporté (classés en fonction de la couverture du sol) ; orthophoto ; modèle brut obtenu par LIDAR terrestre (résolution à 25 cm) d'un pont (passerelle de l'île).

3.2 Modèles 3D urbains

Les modèles 3D urbains diffèrent entre eux par rapport à la façon dont ils représentent la réalité. Il faut bien définir les objets qui doivent être visualisés, correctement choisir les niveaux de détail de représentation (NDR), sélectionner les méthodes d'acquisition et établir le degré d'utilité inhérent aux capacités analytiques de ces modèles (Shiode, 2001). Parmi les objets significatifs à visualiser, on peut citer :

- **objets volumiques** : les bâtiments et les ponts ;
- **objets ponctuels** : les arbres et les antennes de téléphonie mobile ;
- **objets surfaciques** : les escaliers ;
- **surfaces** : les routes, trottoirs, chemins piétons et îlots.

De la manière la plus simple, les modèles 3D urbains peuvent être reconstruits à partir des données géographiques d'un SIG. En combinant de différentes couches d'information, comme, par exemple, les modèles numériques de terrain (MNT), les empreintes au sol des bâtiments et les hauteurs des bâtiments, on obtiendra un modèle de blocs de bâtiments.

² Light Detection and Ranging

Cláudio Carneiro et François Golay

Un modèle urbain numérique... et puis ? Vers une *étude d'utilité*

La reconstruction de la géométrie 3D en zones urbaines peut se faire de façon (semi)-automatique à partir de différentes techniques et basée sur :

- des images aériennes (Gruen et Wang, 1998) ;
- des données laser aériens : LIDAR (Rottensteiner et Briese, 2003) ;
- des approches hybrides : par combinaison de données laser et SIG 2D (Schwalbe *et al.*, 2004) et par couplage de données laser et images aériennes (Bretar, 2006) ;

Les façades de bâtiments peuvent être texturées à une basse résolution à partir d'imagerie aérienne ou terrestre, ou alors avec une plus grande résolution (coûts beaucoup plus élevés) en utilisant le LIDAR terrestre.

3.3 Différents niveaux de détail de représentation

Selon Kolbe *et al.* (2005), ils existent cinq niveaux de détail de représentation (NDR) 3D en milieu urbain (Figure 2).

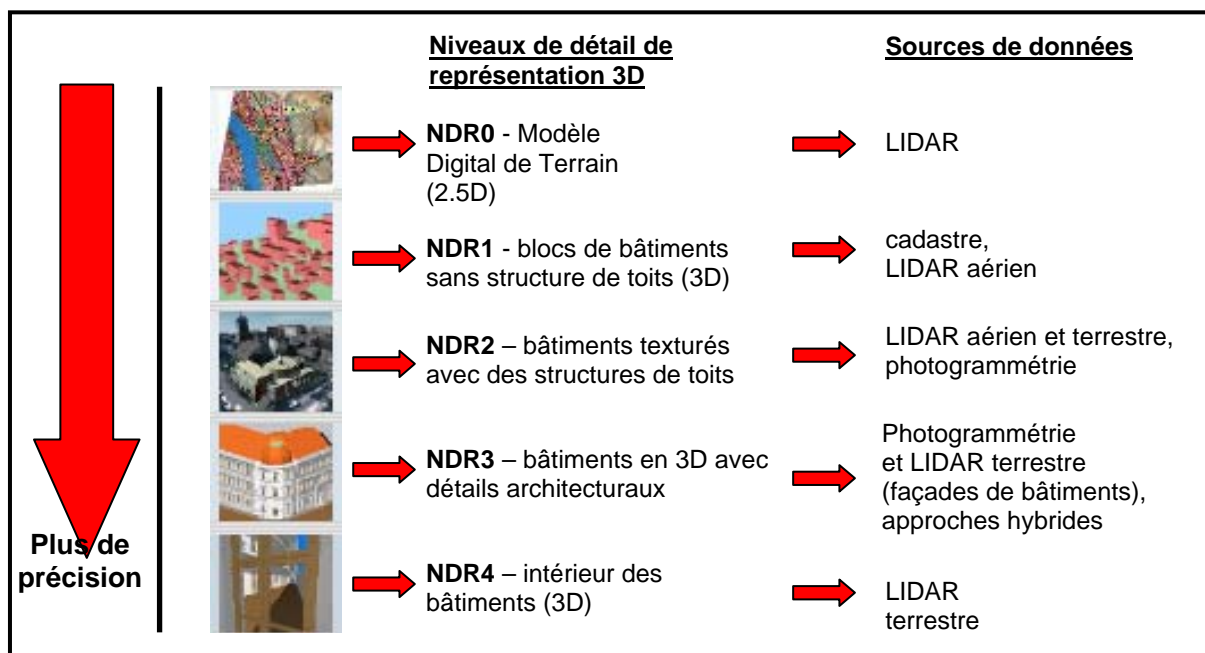


Figure 2 – Différents niveaux de détail de représentation (NDR) 3D en milieu urbain, proposés par Kolbe *et al.* (2005)

Selon ce concept, un même objet peut être représenté simultanément à différents niveaux de détail de représentation, permettant l'analyse et visualisation pour différents objectifs et selon différentes perspectives.

Le NDR0 est essentiellement un modèle digital de terrain (MDT) à 2.5D. Le NDR1 est très générique : modèle 3D de blocs de bâtiments sans aucune structures de toits ou textures de façades. Le NDR2 intègre la représentation des structures de toits et textures. Les arbres peuvent y être aussi intégrés. Le NDR3 dénote les modèles architecturaux avec tous les détails des toits (superstructures), façades, et balcons en particulier. Dans le NDR3 on peut encore rajouter des informations détaillées relatives à la végétation et des objets urbains, comme par exemple, les voitures. Le NDR4 complète le NDR3 en rajoutant les structures intérieures, comme par exemple, les chambres, escaliers, etc.

3.4 Utilité et utilisabilité des représentations visuelles 3D

Les modèles 3D des villes peuvent se révéler utiles pour la visualisation de scènes urbaines plus ou moins détaillées, incluant les infrastructures construites (bâtiments, routes, etc.) et l'environnement naturel (notamment les arbres), ou alors pour les études d'implantation de nouveaux projets urbanistiques avec leur impact environnemental et visuel.

Selon Nielsen (1993), l'acceptabilité d'un système exploratoire de représentation visuelle est strictement liée à son *utilité* (pertinence de l'information à visualiser) et à son *utilisabilité* (qualité de l'interprétation visuelle cognitive des modèles 3D urbains proposés). Pour les différents utilisateurs, il faut donc clairement séparer les objets considérés comme pertinents (objets à visualiser) de ceux qui ne le sont pas. Ce critère de filtrage est très important pour éviter, par exemple, de rendre les scènes urbaines trop denses et confuses, chargées de détails superflus pour l'objectif de modélisation à atteindre.

Cette combinaison entre « utilité » et « utilisabilité » détermine ainsi le niveau d'acceptabilité pour les différents utilisateurs (notamment pour les architectes et urbanistes) des modèles urbains proposés (Reichenbacher et Swienty, 2007). Réciproquement, l'attention portée par les concepteurs de modèles aux critères d'utilité et d'utilisabilité doit permettre d'aboutir à un outil de communication visuelle beaucoup plus efficace que, par exemple, les plans 2D traditionnels couramment utilisés aujourd'hui.

4 INDICATEURS DE DEVELOPEMENT ET DURABILITE

Un indicateur constitue une interprétation empirique et indirecte de la réalité (Von Stokar *et al.*, 2001). Il est le résultat d'une sélection pertinente ou d'une agrégation de données. Cette réduction de l'information favorise une meilleure compréhension des phénomènes complexes et son utilisation par différents groupes de personnes ayant des préoccupations diverses. Selon Gallopín (1997), un indicateur est une variable qui représente un attribut, c'est à dire une caractéristique, une propriété, une qualité d'un phénomène³ associé à un objet.

Dans le cadre de ce travail de recherche, les indicateurs proposés doivent être pertinents du point de vue d'une finalité d'évaluation et doivent clairement indiquer une tendance du point de vue de cette dernière : *que veut-on évaluer avec la mise en place de ces indicateurs de développement et durabilité en utilisant des données 3D qui peuvent passer ou ne pas passer par une représentation visuelle 3D plus ou moins détaillée ?* Pour indiquer une tendance par rapport à la finalité, chaque indicateur doit être mesuré selon deux échelles différentes : ordinale (hiérarchie d'états qualitatifs) ou cardinale (information quantitative).

Les indicateurs proposés doivent aussi permettre au moins l'un des trois types de comparaison suivants (Joerin *et al.*, 2005):

- **évaluation du phénomène considéré par rapport à un objectif normé ou tendanciel** : par exemple, comparaison entre la hauteur d'un bâtiment (calculé à partir des modèles numériques de surface (MNS)) et l'hauteur maximale admise dans la loi.
- **comparaison de différents lieux spatiaux** : un indicateur de performance énergétique global d'une ville établi à partir des modèles numériques de hauteur (MNH) a par exemple peu de signification s'il est considéré en tant que tel. Il peut en revanche acquérir une grande pertinence s'il permet de comparer la performance de cette ville à d'autres.

³ Selon Prélaz-Droux (1995) : « Élément, fait ou événement du monde réel »

Cláudio Carneiro et François Golay

Un modèle urbain numérique... et puis ? Vers une *étude d'utilité*

- **comparaison de différentes périodes temporelles** : par exemple, évaluation des immissions de bruit routier sur une façade de bâtiment à différentes heures de la journée ou époques de l'année.

Enfin, l'indicateur doit être suffisamment représentatif du phénomène mesuré, et la mesure doit par conséquent être relativement directe. Il faut noter que cela dépend en particulier de la disponibilité des données, qui limite souvent la pertinence des indicateurs (Desthieux, 2005). Par exemple, pour la modélisation des phénomènes liés à la propagation du bruit en milieu urbain, les données disponibles et les algorithmes de calcul disponibles sont-ils suffisamment précis pour mettre en place des indicateurs d'intensité du bruit à une résolution spatiale détaillée (distribution quantitative de l'intensité du bruit dans les façades des bâtiments) ? Dans le cas contraire, une représentation simplifiée et plus agrégée de cet indicateur peut se révéler plus pertinente : pour chaque façade et à deux mètres en dessus du sol on calcule la valeur moyenne de l'intensité du bruit qui est ultérieurement représentée comme une valeur unique de la façade dans un SIG 2D (Figure 3).

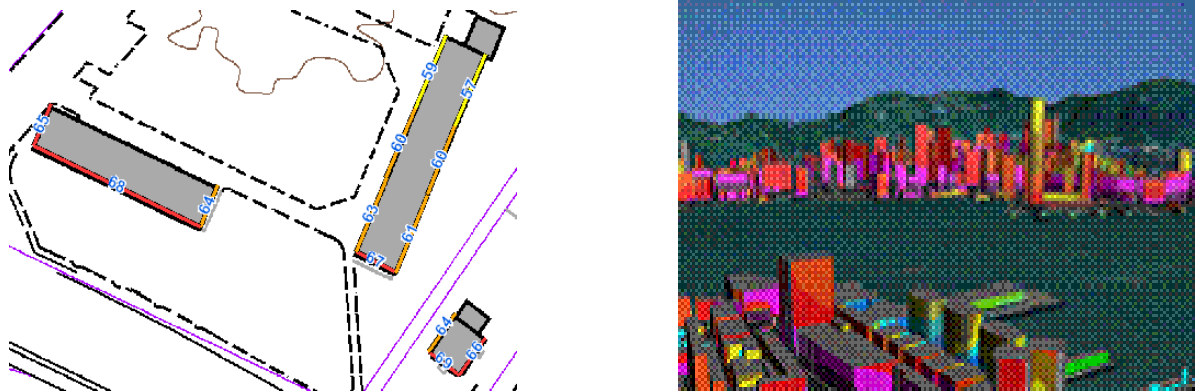


Figure 3 – Illustration des deux approches possibles du calcul et visualisation correspondante d'indicateurs d'immission du bruit en milieu urbain. SIG 2D (à gauche) : pour chaque façade et à deux mètres en dessus du sol, on calcule la valeur moyenne de l'intensité du bruit (source : SITG, Genève) ; modélisation 3D de distribution du bruit (à droite) : distribution quantitative de l'intensité du bruit dans les façades des bâtiments (source : Law, C.W., Lee, C.K. & al. 2006)

5 CAS D'ETUDE : VILLE DE GENEVE

5.1 Présentation

En Octobre 2005, le canton de Genève s'est vu livrer de nouvelles données LIDAR. Cette campagne d'acquisition a permis à l'administration cantonale de disposer de modèles numériques de terrain d'une précision altimétrique de 20 centimètres et d'une précision altimétrique de 15 centimètres sur l'ensemble du canton. Une simple recherche bibliographique sur les différents projets menés dans le domaine de la modélisation 3D, à ce jour, révèle que la richesse des données acquises par cette méthode est rarement exploitée. Une enquête⁴ avait par ailleurs montré le fort intérêt des utilisateurs des produits cadastraux à grande échelle pour l'intégration de la troisième dimension dans les données SIG du canton

⁴ Enquête réalisée dans l'ensemble des cantons suisses sous l'égide de la Conférence des services cantonaux du cadastre (CSCC).

de Genève. Fort de cette information, l'administration cantonale genevoise a lancé un projet pilote pour l'intégration de la troisième dimension dans le cadastre genevois (Vieira de Mello, 2006). Cette étude doit permettre d'évaluer plus précisément le potentiel des données LIDAR pour l'introduction de la 3D dans la mensuration officielle de la ville de Genève. Cette démarche est envisagée par étapes successives, en fonction des besoins des utilisateurs, comme présenté dans les prochaines sections de cet article.

5.2 Mise en place du sondage « Besoins Utilisateurs »

5.2.1 Sondage préliminaire

Un sondage préliminaire concernant les besoins des utilisateurs et la pertinence de l'information tridimensionnelle (étude d'utilité) a été réalisé. Ce sondage et l'analyse des résultats obtenus suivent la méthodologie proposée par Dumas et Redish (1999).

Dans cette première évaluation, quelques questions de caractère très générique relatives à la pertinence de la mise en place d'un modèle urbain 3D ont été posées dans un questionnaire qui a été envoyé par courrier électronique à un large cercle d'utilisateurs potentiels. Les questions posées concernaient les activités conduites par les répondants, l'intérêt et l'utilité d'un modèle urbain 3D pour ces activités, le niveau de détail nécessaire, la nature du rendu visuel souhaité (générique, bicolore ou réel) et le contenu informationnel à représenter.

Ce premier sondage auquel ont répondu plus de 30 acteurs et utilisateurs « métier » des données géographiques genevoises a mis en évidence que plus de 90% d'entre eux considèrent qu'il existe de réels besoins à Genève de modéliser des données en 3D.

5.2.2 Identification et classification des utilisateurs en différents domaines d'intervention

Sur la base des réponses obtenues et pour une meilleure organisation et compréhension des besoins de chacun, les résultats du sondage ont été classés en 6 domaines distincts:

- Architecture, urbanisme et aménagement du territoire ;
- Services routiers, ferroviaires et aériens ;
- Environnement et énergie ;
- Mobilité piétonnière et cycliste ;
- Sécurité et gestion de situations d'urgence ;
- Souterrain : réseaux souterrains, couches géologiques, etc .

Sur la base de cette classification, des entretiens ont été conduits avec des utilisateurs de chacun de ces 6 domaines afin de clarifier et d'approfondir les besoins en la matière.

5.2.3 Entretiens

Ces enquêtes doivent être aussi objectives que possible. Les utilisateurs doivent être interviewés à propos de leur travail spécifique et, dans la mesure du possible, les questions posées doivent être adaptées à ce travail. L'enquêteur doit aussi mettre en évidence les idées et les intentions d'utilisation de la 3D suggérées par les utilisateurs.

Les questions suivantes ont néanmoins servi de point de démarrage à chaque entretien :

- Comment et quand l'utilisation de modèles 3D pourrait-elle être considérée comme une « valeur ajoutée irremplaçable »?

- Comment et quand doit-on construire et mettre à jour les modèles urbains 3D (niveau de détail de représentation (NDR) 3 présenté dans la section 3.3)?
- En fonction des besoins des utilisateurs et des applications « métier », quels sont les niveaux de détail de représentation et de généralisation à retenir pour les modèles urbains 3D ?
- Est-ce qu'hypothétiquement il y aurait d'autres NDR qui pourraient être mieux adaptées et envisageables pour répondre aux besoins évoqués ?
- Doit-on adapter le choix des objets urbains à visualiser ainsi que leur niveau de détail de représentation en fonction des différentes échelles de visualisation à considérer ?
- Quelles techniques devrait-on utiliser pour visualiser différents niveaux de détail (niveaux de transparence ou autres techniques de visualisation) ?
- Est-ce que pour la modélisation de certains phénomènes, une représentation 2D ou 2.5D (NDR0) est suffisante ?
- Est-ce que les indicateurs (qualitatifs et quantitatifs) évalués doivent être visualisés ?
Le cas échéant, quel serait le niveau de représentation souhaité ?

À partir des réponses obtenues dans ces interviews, il a été possible de bien définir plusieurs indicateurs de développement et de durabilité à modéliser (dans plusieurs cas en appliquant des méthodologies et algorithmes mathématiques assez complexes), ainsi qu'une définition cohérente des différentes approches de visualisation visant des utilisations distinctes. Dans ce cadre, il est aussi important de proposer aux utilisateurs des prototypes des modèles considérés et d'en évaluer autant que possible l'utilisabilité.

5.3 Choix des indicateurs de développement et durabilité

Les interviews et l'analyse des besoins mettent l'accent sur la valorisation des informations 3D disponibles. Pour chacun des domaines présentés dans la section 5.2.2 de cet article, les nombreux besoins évalués au cours des interviews ont été regroupés en enjeux⁵. Dans le Tableau 1, on propose pour chaque enjeu proposé :

- un ou plusieurs indicateurs de développement et de durabilité, considérés comme suffisamment représentatifs et pertinents pour les groupes d'utilisateurs en question ;
- Les sources de données à utiliser pour la mise en place de l'indicateur choisi.

5.4 Modélisation 3D

La puissance des ordinateurs actuels permet d'envisager la gestion, l'exploitation et la visualisation interactive de modèles 3D riches et détaillés. Il y a cependant des cas où la géométrie verticale des objets n'est pas utile, et où le résultat final souhaité n'exige même pas par de représentation 3D. Les données LIDAR peuvent alors être utilisées pour calculer des indicateurs de développement et durabilité liés à des enjeux spécifiques, à l'exemple de l'indicateur de consommation énergétique proposé au tableau 1. Cet indicateur peut être calculé à partir d'un modèle dérivé des données LIDAR, comme proposé par Ratti *et al.* (2004).

⁵ Par enjeu, on entend un objectif d'ordre général qui traduit une évolution, une tendance souhaitée pour une problématique donnée (Desthieux, 2005).

Domaine	Enjeux	Indicateurs	Source de données
Architecture, urbanisme et aménagement du territoire	Qualité de l'environnement construit	Cartes de visibilité	LIDAR et cadastre
		Ensoleillement	LIDAR et cadastre
	Qualité du tissu urbain	Morphologiques	LIDAR, photogrammétrie et cadastre
	Respect des normes de construction	Comparaison entre la hauteur des bâtiments et les normes légales	LIDAR et Normes
Services routiers, ferroviaires et aériens	Habitants exposés au bruit	Niveau de bruit lié au trafic routier, aérien et ferroviaire	LIDAR (MNH)
	Habitants exposés à la pollution	Niveau de pollution liée au trafic routier	LIDAR (MNH)
	Plafonds de sécurité pour les avions	Coefficients de risque associés aux obstacles	LIDAR, photogrammétrie et cadastre
		Vérification que l'annexe 14 de l'aviation civile (normes de construction autour des aéroports) est respectée	LIDAR et normes
Environnement et énergie	Effets de la texture urbaine dans la consommation énergétique	Rapport surface/volume du tissu urbain	LIDAR (MNH)
		Zones passives	LIDAR (MNH)
	Effets de la texture urbaine dans la concentration de polluants	Flux d'air et dispersion	LIDAR (MNH)
	Habitants exposés aux sources de rayonnement	Zones des façades de bâtiments exposées à des sources de rayonnement (intensité)	LIDAR et photogrammétrie
	Aptitude des toits à recevoir des panneaux solaires	Intensité du rayonnement capté par les toits (orientation, pente, ...)	LIDAR et photogrammétrie
Mobilité piétonnière et cycliste	Susciter la mobilité douce	Coefficient de qualité de desserte	LIDAR et cadastre
Sécurité et gestion de situations d'urgence	Scénarios d'inondation	Zones à risque	LIDAR et cadastre
	Pose d'hélicoptères dans les bâtiments	Toits plats suffisamment larges pour la pose d'hélicoptères	LIDAR et photogrammétrie

Tableau 1 – Quelques exemples d'indicateurs de développement et de durabilité

Par contre, pour certains objets (comme, par exemple, les ponts), les données LIDAR ne permettent pas de restituer un modèle adéquat, car l'angle d'incidence entre le nadir de l'avion et l'empreinte au sol du LIDAR est très faible. Dans ces cas, il faut utiliser d'autres sources d'information pour modéliser correctement ces objets, comme par exemple le laser terrestre ou la photogrammétrie.

Pour les applications nécessitant la représentation des objets 3D à des niveaux de détail de entre le NDR1 et NDR4 (voir section 3.3), une modélisation sémantiquement cohérente de ces objets doit être réalisée. Ainsi, les objets « bâtiments » doivent être modélisés comme des volumes solides, ce qui facilitera l'identification ultérieure et le calcul de chaque volume bâti. Les modèles numériques de terrain (MNT) et de surface (MNS) construits à partir des données LIDAR peuvent aussi trouver de nombreuses applications. Par exemple, par variation de couleur en fonction de l'altitude, on peut représenter un relief en 2 dimensions; l'espacement entre courbes de niveau générées à partir des MNT permet aussi de représenter, en mode plan, le relief d'une surface (même si la forme du terrain n'est pas représentée de façon régulière).

Pour des besoins plus complexes comme les études de visibilité en milieu urbain, on admet encore trop souvent que la « surface terrain » est lisse (sans obstacles significatifs), et les bâtiments eux-mêmes ne sont pas pris en compte. Osaragi et Otani (2007) montrent cependant que ces objets doivent être pris en considération dans les cartes de visibilité urbaines destinées à des opérations d'analyse spatiale (intervisibilité et exposition solaire notamment). Ce type de modèle peut pourtant facilement être réalisé en assortissant les empreintes cadastrales des bâtiments d'une estimation de la hauteur moyenne établie à l'aide du modèle numérique de hauteur.

5.5 Visualisation 3D

La visualisation 3D présente de nombreux atouts pour la diffusion d'informations. Elle permet en particulier d'explorer, d'analyser, de synthétiser et de présenter efficacement des données géoréférencées dans une interface de visualisation 3D statique ou dynamique. En plus, la visualisation de relations 3D plus ou moins abstraites peut contribuer à une meilleure compréhension du monde réel qui nous entoure.

Dans le domaine de la 3D, les attentes des utilisateurs en matière d'utilité et d'utilisabilité des visualisations proposées n'ont pas encore suscité beaucoup d'attention au sein du monde de la recherche. Il est pourtant indispensable de développer des outils de visualisation qui soient bien conformes aux besoins des utilisateurs, car ce sont ces derniers qui doivent interagir avec les systèmes de visualisation proposés. Une évaluation des besoins des utilisateurs concernant les différentes possibilités de visualisation 3D se révèle donc tout à fait pertinente. A cet effet, on a tout d'abord présenté à ceux-ci les différents niveaux de détail de représentation (NDR, section 3.3 de cet article) considérés actuellement comme une norme dans le domaine de la visualisation 3D (Kolbe *et al.* 2005). Ultérieurement, pendant les diverses interviews menées avec ces utilisateurs et en posant des questions contextuelles (section 5.2.3), il a été possible d'évaluer lequel (ou lesquels) de ces NDR étaient les mieux adaptés pour chacun d'entre eux, ainsi que les différents objets urbains à visualiser pour répondre à leurs besoins.

Cette évaluation nous a conduits à insérer deux NDR supplémentaires entre les NDR1 et NDR2 de Kolbe *et al.* (2005), car les façades de bâtiments peuvent être aussi classifiées et visualisées comme :

- **génériques (NDR1A)**: façades génériques créées à partir de façades de bâtiments déjà existantes. Normalement ces façades génériques sont établies en analysant les types architecturaux les plus communs dans la ville/quartier à texturer (Figure 4);

- **bicolores (NDR1B)**: façades lisses représentées avec une couleur unique. Dans ce cas les structures de toits seront représentées avec une autre couleur, ce qui rendra le modèle 3D des bâtiments plus facile à percevoir (Figure 4);

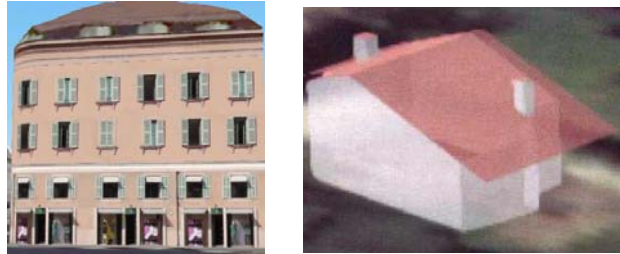


Figure 4 – Représentation des bâtiments par :
 1) - des structures de toits avec des façades de type « texture générique » (NDR1A, à gauche) ;
 2) - des structures de toits avec des façades lisses à « couleur unique » (NDR1B, à droite).

Sur ces bases, le Tableau 2 présente quelques exemples d'exigences en matière de visualisation 3D (pour chacun des utilisateurs/domaines présentés).

Domaine	Objectifs de la visualisation 3D	Echelle de visualisation 3D	Niveau de détail de représentation (NDR) et objets à représenter
Architecture, urbanisme et aménagement du territoire	Impacts des projets de construction de nouveaux bâtiments	Quartier/Ville	NDR3 et NDR4 pour la visualisation du nouveau bâtiment avec l'intégration d'autres objets urbains et de la végétation NDR1B pour les bâtiments à proximité du nouveau bâtiment NDR1 pour tous les autres bâtiments
Services routiers, ferroviaires et aériens	Evaluation du bruit et pollution	Bâtiment/Ville	NDR0 au niveau de la ville NDR1B au niveau du bâtiment (modélisation 3D des indicateurs de bruit/pollution sur les façades des bâtiments)
Environnement et énergie	Evaluation des effets de la texture urbaine et du rayonnement	Bâtiment/Ville	NDR0 au niveau de la ville NDR1B au niveau du bâtiment (modélisation 3D des zones des façades des bâtiments affectées par le rayonnement : indicateur de rayonnement) ; il faudra aussi représenter les antennes
	Aptitude des toits à recevoir des panneaux solaires	Bâtiment/Ville	NDR0 au niveau de la ville NDR1B au niveau du bâtiment
Mobilité piétonnière et véloce	Déplacement piéton-cycliste	Ville	NDR0
Sécurité et gestion de situations d'urgence	Pose d'hélicoptères sur les bâtiments	Bâtiment/Ville	NDR1B

Tableau 2 – Exemples de niveaux de détail de représentation (NDR) 3D inhérents aux besoins de visualisation des utilisateurs de la 3D à Genève

Cláudio Carneiro et François Golay
 Un modèle urbain numérique... et puis ? Vers une *étude d'utilité*

11

Dans les projets de construction de nouveaux bâtiments (au centre, dans la Figure 5), les architectes et urbanistes démontrent une préférence pour la mise en évidence du nouveau bâtiment (**NDR3** et **NDR4**), par rapport à ceux qui étaient déjà existants et pour cette raison on utilise différents niveaux de détail de représentation en fonction de la distance existante entre :

- **NDR1B** : le nouveau bâtiment et les bâtiments déjà construits (à proximité) ;
- **NDR1** : le nouveau bâtiment et les bâtiments déjà construits (éloignés) ;



Figure 5 – Différents niveaux détails de représentation proposés dans le cadre de la construction d'un nouveau bâtiment à Genève (quartier de Collonges-Bellerive, source : SITG)

6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet article a posé le cadre d'une étude qui montre que la diversité des besoins des utilisateurs de modèles urbains nécessite différents niveaux de détail et modes de représentation et de visualisation de la ville. En particulier, des modèles urbains très détaillés, assortis de façades texturées individuellement, ne constituent pas a priori une solution efficace pour certaines tâches de développement et d'observation de la ville. On postule donc que les tâches et les objectifs des planificateurs et gestionnaires urbains doivent être soigneusement identifiés pour permettre un choix judicieux d'indicateurs du développement urbain et pour en déduire des modes de représentation et de visualisation adéquates du tissu urbain.

Cláudio Carneiro et François Golay
Un modèle urbain numérique... et puis ? Vers une *étude d'utilité*

12

Les besoins établis sur la base du cas d'étude de Genève ne prétendent bien sûr ni à l'universalité, ni à la complétude. D'autres villes, différentes par la nature du tissu urbain et par les enjeux de leur développement, feront sans doute émerger d'autres besoins et nécessiteront la définition d'autres indicateurs. En tous les cas, tout projet de modèle urbain devrait faire l'objet d'une analyse des besoins soignée avant que des processus coûteux d'acquisition et de modélisation ne soient engagés !

La recherche qui sous-tend le présent article va se poursuivre par l'élaboration d'un prototype de modèle urbain 3D pour la ville de Genève, qui fera l'objet d'une *étude d'utilité et d'utilisabilité* destinée à tester de manière rigoureuse l'adéquation des représentations et visualisations proposées. On attend de ces travaux aussi bien des résultats spécifiques sur les besoins de Genève en matière de modélisation urbaine 3D que des résultats d'intérêt plus général sur la nature des processus de conception et d'évaluation à mettre en œuvre pour l'élaboration de modèles urbains 3D.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bretar F. (2006) "Couplage de données laser aéroportés et photogrammétriques pour l'analyse de scènes tridimensionnelles", Phd Thesis, Ecole Nationale Supérieure de Télécommunications de Paris, France.

Desthieux G. (2005) "Approche systémique et participative du diagnostic urbain. Processus de représentation cognitive du système urbain en vue de l'élaboration d'indicateurs géographiques", Phd Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.

Dumas S., Redish C. (1999) "A Practical Guide to Usability Testing". Intellect Books, Exeter, United Kingdom.

Eastman C. (1999) "Building Product Models: Computer Environments Supporting Design and Construction", CRC Press.

Ellul C., Haklay M. (2006) "Requirements for topology in 3D GIS", Transactions in GIS, Vol. 10(2), pp. 157-175, Blackwell Publishing Ltd.

Foley J, van Dam A., Feiner S., Hughes J. (1995) "Computer Graphics: Principles and Practice". Addison Wesley, 2nd Ed.

Gallopin G.C. (1997) "Indicators and their use: information for decision-making" In: B. Moldan and S. Billharz (eds.). Sustainability indicators: Report of the Project on Indicators of Sustainable Development, SCOPE 58, John Wiley & Sons, Chichester, pp. 13-27.

Gröger G., Kolbe T., Plümer L. (2004) "Mehrskalige, multifunktionale 3D-Stadt- und Regionalmodelle", Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG) 2/2004 (in German).

Gruen A., Wang X. (1998) "CC-Modeler: A topology generator for 3D city models", ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 53, No. 5, October, pp. 286-295.

Cláudio Carneiro et François Golay
Un modèle urbain numérique... et puis ? Vers une *étude d'utilité*

13

Herring J. (2001) "The OpenGIS Abstract Specification, Topic 1: Feature Geometry (ISO 19107 Spatial Schema)", Version 5. OGC Document Number 01-101.

Joerin F., Nembrini A., Billeau S., Desthieux G. (2005) "Indicateurs spatialisés : un instrument de participation en aménagement du territoire", *Revue internationale de géomatique*, Vol. 15(1), pp. 33-61.

Kaartinen H., Hyypä J. (2006) "Evaluation of Building Extraction", EuroSDR Projects, Published by EuroSDR, Official Publication N° 50, pp.11-110, Utrecht, Netherlands.

Keller T., Tergan S.O. (2005) "Visualizing Knowledge and Information: an Introduction", *Knowledge and Information Visualization – Searching for Sinergies*, Eds. Sigmar-Olaf Tergan and Tanja Keller, Springer, Berlin, Germany, pp.1-23.

Kolbe T., Gröger G., (2004) "Unified Representation of 3D City Models", *Geoinformation Science Journal*, Vol.4, No. 1.

Kolbe T., Gröger G., Plümer, L. (2005) "CityGML - Interoperable Access to 3D City Models", In: Oosterom, Zlatanova, Fendel (Eds.): *Proceedings of the Int. Symposium on Geoinformation for Disaster Management*, 21st-23rd March 2005 in Delft, Springer.

Königer A., Bartel S. (1998) "3D-GIS for Urban Purposes", *Geoinformatica*, 2(1), March 1998.

Law C.W., Lee C.K., Tai M.K. (2006) "Visualization of Complex Noise Environment by Virtual Reality Technologies", *Symposium "Science in the Public Service"*, Hong Kong Institution of Science, Hong Kong.

Nielsen J. (1993) "Usability Engineering", Morgan kaufmann-Academic Press, London, United Kingdom.

Osaragi T., Otani I. "Effects of ground surface relief in 3D spatial analysis on residential environment", *Proceedings of the 10th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2007*, 8th-11th May, Aalborg University, Denmark.

Prélaz-Droux R. (1995) "Système d'Information et Gestion du territoire", Meta, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse.

Ratti C., Baker N., Steemers K. "Energy consumption and urban texture", Published by ScienceDirect, *Energy and Buildings*, Volume 37, Issue 7, pp. 762-776.

Reichenbacher T., Swienty O. (2007) "Attention-guiding geovisualization", *Proceedings of the 10th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2007*, 8th-11th May, Aalborg University, Denmark.

Roncayolo M. (1988) "La ville et ses territoires", Ed. Gallimard.

Cláudio Carneiro et François Golay
Un modèle urbain numérique... et puis ? Vers une *étude d'utilité*

14

Rottensteiner F., Briese C. (2003) "Automatic generation of building models from LIDAR data and the integration of aerial images", in ISPRS working group III/3 workshop "3D reconstruction from airborne laser scanner and InSAR data", vol. 34, Dresden, Germany.

Schwalbe E., Maas H.-G., Seidel, F. (2004) "3D building model generation from airborne laser scanner data using 2D GIS data and orthogonal point cloud projections", in Workshop "Laser Scanning 2005", Vol. XXXVI, ISPRS, Enschede, The Netherlands.

Shiode N. (2001) "3D urban models: recent developments in the digital modelling of urban environments in three-dimensions", In: *GeoJournal* 52(3), pp. 263-269.

Vieira de Mello A. (2006) "Projet de levé de la troisième dimension dans la mensuration officielle", Rapport final, Direction Cantonale de la Mensuration Officielle, Octobre 2006, Genève, Suisse.

Von Stockar T., Frick R. *et al.* (2001) "Planification Directrice Cantonale et Développement Durable", Publication interne, Office Fédéral de l'Aménagement du Territoire, Berne, Suisse.

NOTES BIOGRAPHIQUES

Cláudio Carneiro est né à Porto en 1973. Il a obtenu sa licence en génie géographique à la Faculté de Sciences de Lisbonne en 1997 et son Master of Science (MSc) en Systèmes d'Information Géographique (SIG) à l'Instituto Superior Técnico de Lisbonne en 2004. Depuis Juin 2002 il travaille au CERN comme Ingénieur et depuis le début 2006 il fait sa thèse de doctorat dans le domaine de la modélisation tridimensionnelle (3D) urbaine à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), avec des tâches d'encadrement de la recherche et de l'enseignement.

François Golay est professeur de systèmes d'information géographique à l'EPFL et directeur du Laboratoire de SIG (LASIG). Ses intérêts de recherche portent plus particulièrement sur l'aide à la décision relative à l'espace et au territoire, sur les infrastructures de données géographiques et le partage d'informations, sur la promotion et la mesure de la valeur ajoutée et de l'utilisabilité des systèmes géoinformatiques, ainsi que sur l'analyse spatiale exploratoire et la visualisation de l'information géographique.

COORDONNÉES

Cláudio Carneiro, François Golay
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
ENAC INTER LASIG
Bâtiment GC, Station 18
CH-1015 Lausanne
Téléphone: +41216935786
Courriel: Claudio.Carneiro@epfl.ch
Site Web: <http://lasig.epfl.ch>