

Panorama des potentialités SIG en 3 dimensions : vers des modèles virtuels 3D de villes

■ Robert LAURINI - Sylvie SERVIGNE

MOTS-CLÉS

Systèmes d'information géographique, SIG, 3D, villes virtuelles, CityGML, Google Earth, Virtual Earth.

Depuis de nombreuses années, de nombreux travaux tentent de modéliser la ville en trois dimensions. Ces outils sont aujourd'hui arrivés à maturité et sont disponibles sur le marché. Un panorama des modèles et technologies sous-jacentes est présenté dans cet article. Après avoir donné une liste d'applications potentielles, les divers concepts de modélisation de ville en trois dimensions sont définis. La norme CityGML est ensuite esquissée. Cette norme vise à décrire la totalité des bâtiments et du mobilier urbain d'une ville. Nous terminons cet article par la présentation des projets des sociétés Google (Google Earth) et Microsoft (Virtual Earth) qui ont pour objectif de décrire, avec un haut niveau de réalisme, toutes les villes du monde entier afin de pouvoir y naviguer, y localiser des services et effectuer des simulations.

Après les SIG à deux dimensions, arrivent maintenant des outils à trois dimensions, non pas pour gérer un objet urbain comme un bâtiment isolé, mais pour la gestion d'un territoire complet. En parallèle avec l'évolution des nouveaux besoins exprimés par les utilisateurs, cette évolution a été rendue possible par l'arrivée de nouvelles technologies. Dès lors plutôt que des SIG à trois dimensions, on préférera l'appellation de modèle virtuel 3D dont un exemple est donné Figure 1. Parmi ces technologies, la photogrammétrie tient une place importante (Kraus *et al.*, 1998).

Alors qu'il s'agit d'une discipline peu connue en France pour diverses raisons, de nombreux pays étrangers possèdent une très grande tradition de recherche en photogrammétrie. Et ce sont les percées technologiques notamment provenant d'Allemagne, d'Autriche et de Suisse qui ont permis de telles avancées.



Figure 1. Modèle virtuel 3D de la ville d'Heidelberg.

N'oublions pas que l'objectif n'est pas tant de montrer des images 3D saisissantes de réalisme d'un bâtiment isolé, mais plutôt de naviguer en trois dimensions dans les urbanisations.

L'objet de cet article sera de donner des aperçus sur les potentialités et les tendances dans ce domaine à forte croissance, dans lequel de nombreuses sociétés cherchent à se positionner. Après avoir fait le tour des applications susceptibles d'être traitées par ces nouveaux outils, sera donné un rappel rapide sur la modélisation des objets tridimensionnels. Puis sera esquissée la nouvelle norme CityGML dont l'objectif est un format lisible pour stocker et représenter les villes en trois dimensions. Nous finirons cet article par une présentation sommaire des nouveaux projets des sociétés Google et Microsoft.

Les applications potentielles

Pour une municipalité, disposer d'un modèle générique de l'ensemble de sa ville s'avère, outre la navigation tridimensionnelle classique, être un atout indispensable pour des applications potentielles comme :

- la simulation des niveaux de bruit à trois dimensions, c'est-à-dire non seulement à la hauteur des oreilles d'un piéton, mais aussi aux divers étages ; cette modélisation peut être étendue à d'autres pollutions comme celle de l'air ;

- la modélisation des inondations et des risques naturels ; dans ce cas, il s'agit de simuler la hauteur du niveau d'eau partout dans la ville y compris dans les constructions souterraines du type parking, galerie de métro, tunnel, etc.
- la modélisation des autres risques environnementaux comme les tremblements de terre, et la visualisation de leurs conséquences,
- la comparaison des hauteurs réelles des bâtiments avec les hauteurs maximales autorisées par la réglementation ;
- l'impact visuel d'un futur lotissement (Figure 2) ou d'un grand projet d'équipement dans son environnement ;
- la vérification rapide des déclarations d'impôts locaux ;
- l'aide à la définition de la stratégie d'approche pour la sécurité civile ou la lutte contre les incendies dans les villes ;
- etc.

Mais également d'autres acteurs peuvent bénéficier de telles représentations. Sans être exhaustifs, signalons quelques pistes :

- en géomarketing, disposer d'une maquette permettant de tester l'impact visuel d'un panneau publicitaire,
- pour les agents immobiliers, permettre aux acquéreurs potentiels d'avoir une idée claire sur les bâtiments aux alentours du bien qu'ils désirent acheter ou louer,

- pour les touristes, avoir une vue plus précise des monuments et des endroits à visiter,
- pour les opérateurs de téléphonie mobile, trouver les lieux idéaux pour installer les antennes (carte d'intervisibilité),
- pour les installateurs de panneaux solaires, repérer les toitures les plus adaptées,
- pour les pilotes d'hélicoptères, repérer les toitures où il est possible de se poser,
- pour les historiens et les archéologues, visualiser ou mieux modéliser une ville aux siècles/millénaires précédents (Figure 3),
- etc.

Tout ceci est possible grâce aux modèles virtuels de ville dont les données proviennent de plusieurs sources. On mentionnera tout d'abord les lasers aéroportés qui permettent de définir des Modèles Numériques d'Élévation (MNE), c'est-à-dire les distances entre l'avion et les objets terrestres, à la différence de Modèles Numériques de Terrain (MNT) qui modélisent la surface du sol.

Les campagnes de photogrammétrie aérienne permettent de prendre plusieurs vues d'un même lieu. En photogrammétrie verticale, les distorsions géométriques sont éliminées afin d'obtenir une orthophoto ou un orthophotoplan. En revanche en photogrammétrie oblique, on tire profit à la fois de la multiplicité des photos d'un même lieu et des distorsions afin d'obtenir un modèle tridimensionnel. Ainsi, grâce à ces multiples vues, il est possible de repérer les points d'intérêt, de modéliser les bâtiments en trois dimensions et de repérer les textures des toitures et des façades. C'est en quelque sorte comme si on voyait les bâtiments non plus avec deux yeux, mais avec quatre, six, dix yeux.

Modélisation des objets géographiques à trois dimensions

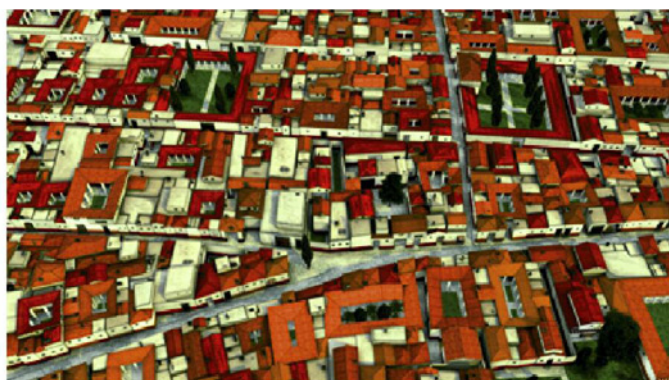
Il existe différentes façons de modéliser des bâtiments, essentiellement basées sur l'objectif à atteindre. En effet, un bâtiment peut être vu comme un objet de construction ou de gestion ; dans ce cas la norme BIM semble la plus intéressante (cf Döllner-Hagedorn 2007). Dans notre cas, il s'agit surtout de la géométrie du bâtiment. Cependant deux grandes



Figure 2. Exemple de banlieue californienne.



Figure 3. Exemple de reconstitution de la ville de Pompéi.





pistes s'offrent à nous : s'agit-il de modéliser les espaces de vie (pièces, escaliers, couloirs, etc.) ou bien alors la problématique se situe-t-elle dans les murs (façades, cloisons, planchers/plafonds, etc.). Ces problématiques sont bien connues et intégrées dans les outils de CAO (conception assistée par ordinateur) en bâtiment et architecture ; rappelons que ces outils sont en effet adaptés à la conception d'un bâtiment unique, voire d'un petit ensemble.

En revanche, dans le type d'applications envisagées dans cet article, il est nécessaire de modéliser l'ensemble des bâtiments et mobiliers d'une ville ; en d'autres termes il s'agit de fournir des outils non plus pour modéliser quelques unités de bâtiments, mais des dizaines de milliers, voire des millions. Face à cet objectif, il devient nécessaire de se contenter de formes simplifiées de l'extérieur.

Une des approches les plus courantes est celle de l'approche par des surfaces planes : on suppose ainsi qu'un bâtiment est composé de faces (ou facettes) planes pour représenter les façades et la toiture ; du point de vue mathématique, on a affaire à un polyèdre. Dans ce type d'approche, il est impossible de modéliser les tours ou les coupoles à moins de les subdiviser en un grand nombre de petites surfaces planes. La Figure 4 donne le modèle conceptuel décrit dans le formalisme entité-association (Laurini-Milleret-Raffort, 1992) dans le formalisme entité-association d'un polyèdre : un polyèdre est au minimum composé de 4 facettes, une facette de trois arêtes, et chaque arête de deux sommets.

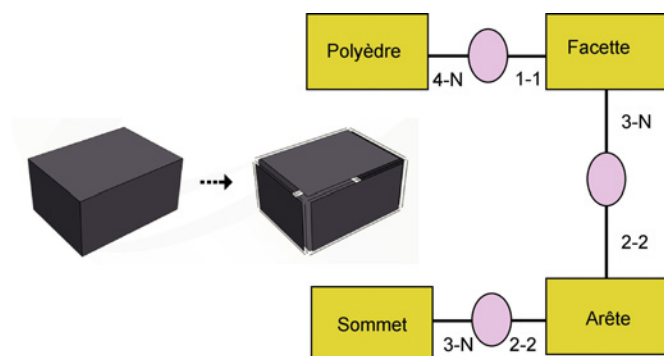


Figure 4. Modèle simplifié (entité-association) de bâtiments sous forme de polyèdres.

Il existe bien sûr d'autres modèles plus sophistiqués incluant des cylindres, des cônes, des sphères, des surfaces gauches, etc.

La grande difficulté pour modéliser un bâtiment au niveau d'une ville est de choisir le niveau de détail visé à savoir la granularité des informations à représenter. Est-il indispensable de connaître tous les détails géométriques au millimètre près des balcons, des fenêtres, des cheminées, des tuiles, ou bien s'agit-il de choisir une résolution plus faible ? Une des pistes communément adoptée est celle des textures. Dans cette hypothèse, un toit sera vu comme un plan sur lequel sera placée une texture de tuiles, une façade sera vue comme un plan avec sa texture propre, c'est-à-dire une modélisation rapide de type image. Dès lors on parlera de modèle virtuel 3D de villes.



Figure 5. Extrait d'un modèle de la ville de Berlin.

La norme CityGML¹

Lancée par un groupe d'Allemands (Geodata Infrastructure North-Rhine Westphalia²), cette initiative réunit plus de 70 entreprises, municipalités et laboratoires de recherche qui coopèrent au développement et à l'exploitation commerciale de modèles 3D interopérables.

Ainsi, la norme CityGML se donne comme objectif de représenter les objets urbains à trois dimensions. Celle-ci définit les classes et les relations des objets trouvés dans les villes de plusieurs points de vue, géométrique, topologique, sémantique et d'apparence. Ces informations vont bien au-delà d'un simple format d'échange graphique car il est possible d'utiliser des systèmes de visualisation afin de permettre des analyses plus sophistiquées de type simulations, fouilles de données, etc.

Le format CityGML est un modèle de données ouvert construit sur le format XML permettant le stockage et l'échange de modèles virtuels urbains 3D : il dérive de la norme GML issue de l'Open Geospatial Consortium (OGC³) and the ISOTC211. Cette représentation se veut un standard ouvert et libre d'utilisation. En juillet 2007, l'OGC a reconnu CityGML comme une excellente proposition.

Les objets que la norme reconnaît sont d'abord les modèles numériques de terrains (MNT) sur lesquels seront posés les autres objets urbains, à savoir les bâtiments, les ponts, les tunnels, les murs de soutènement, les rivières, objets auxquels s'ajoutent les routes, les chemins de fer, les voies navigables, le mobilier urbain, les feux tricolores, les réseaux de transports, les arbres, etc.

Une fois modélisée, la ville doit être visualisée. Ceci est tout à fait possible avec des outils spécialisés comme LandXplorer-CityGML-Tool⁴ et Aristoteles⁵.

(1) <http://www.citygml.org/>

(2) <http://www.gdi-nrw.org/>

(3) <http://www.opengeospatial.org/>

(4) <http://www.3dgeo.de/citygml.aspx>

(5) <http://www.ikg.uni-bonn.de/aristoteles>

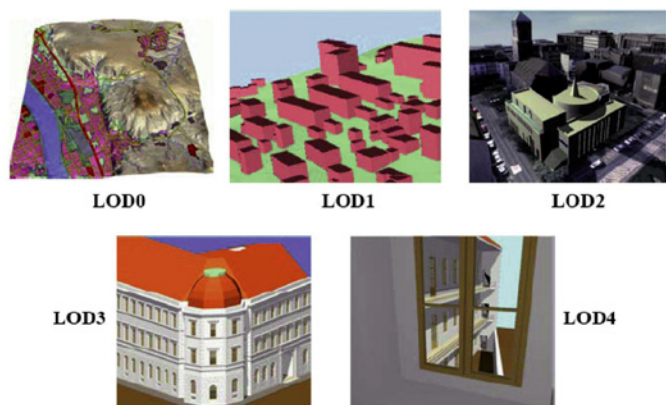


Figure 6. Exemple de niveaux de détails (LoD) proposés par la norme CityGML.

Afin de permettre différents niveaux de modélisation, plusieurs niveaux de détails (LoD = Levels of Details) ont été définis et ceci pour deux raisons totalement différentes. La première dépend de la résolution avec laquelle les données ont été prises et stockées tandis que la seconde permet de dégrader la représentation des objets urbains et des bâtiments les plus éloignés, car cette dégradation permet d'envoyer moins d'informations sur le réseau et ainsi d'obtenir des temps d'affichage plus rapides. Ces niveaux sont les suivants (Figure 6) :

- **LoD 0 (Modèle régional)** : il s'agit d'un modèle numérique de terrain (2,5D) permettant de montrer l'ensemble d'un paysage, et dont les données proviennent essentiellement de laser aéroporté ;
- **LoD 1 (Modèle urbain)** : "modèle bloc" dans lequel les bâtiments sont schématisés sous forme de blocs sans structures de toit, donnant ainsi une idée de la répartition de la hauteur des bâtiments ; les données de base proviennent du

cadastre et de laser aéroporté ; dans ce cas sont intégrées des données provenant de photogrammétrie verticale ;

- **LoD 2 (Modèle urbain)** : le même que précédemment mais avec des textures pour les façades et les toitures (photogrammétrie oblique) ;
- **LoD 3 (Modèle urbain)** : même modèle que précédemment mais avec un niveau plus détaillé du point de vue architectural ;
- **LoD 4 (Modèle intérieur)** : modèle véritablement architectural "parcourable", c'est-à-dire avec un modèle de l'intérieur des bâtiments.

La Figure 7 donne un aperçu de l'usage concomittant de plusieurs niveaux de détails dans la même image.

Google Earth et Virtual Earth

En 2004, la société Google a acheté la société Keyhole afin de lancer le produit Google Earth⁶ qui a été téléchargé 250 millions de fois. Les utilisateurs de Google Earth ont apporté leur contribution (images, modèles 3D, ...) au logiciel⁷. Environ 850 000 utilisateurs ont rajouté plus d'un million de photos. Rappelons que l'objectif de la société Google est d'*organiser les savoirs du monde entier et de les rendre disponibles et accessibles universellement*. Devant cet objectif, la carte du monde de Google est la base sur laquelle seront disposés tous les renseignements. En d'autres termes, cette carte est un chemin d'accès à tout type d'information localisée. Cependant, il n'existe pas encore beaucoup de lieux en trois dimensions accessibles par Google Earth ; en France par

(6) <http://earth.google.com>

(7) <http://motic.blogspot.com/2007/09/economist-vante-les-utilisations.html>

(8) <http://www.vexcel.com/>



Figure 7. Intégration de différents niveaux de détails selon la distance.

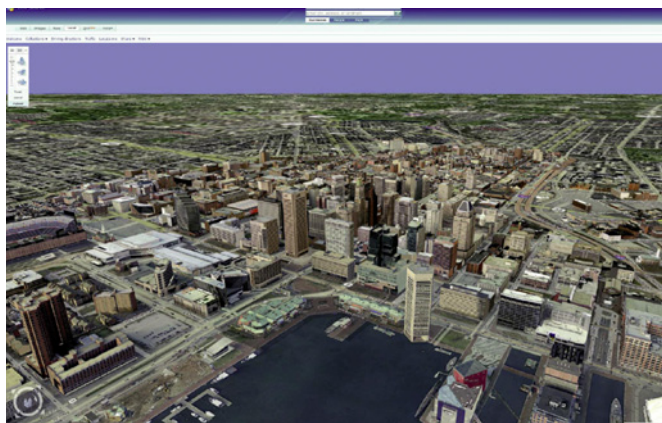


Figure 8. Exemple de modèle de ville virtuel (Baltimore) avec Virtual Earth.

- ▶ exemple certains bâtiments de Nice sont modélisés en 3 dimensions.

Cependant, de son côté la société Microsoft a acheté la société Vexcel⁸ en mai 2006 qui possédait un grand savoir-faire en photogrammétrie tridimensionnelle, notamment grâce à sa caméra UltraCam-X qui peut prendre des images de 216 megapixels au rythme de 3 gigabits par seconde avec des précisions de l'ordre de 4 cm par pixel. C'est ainsi qu'est né le projet Virtual Earth⁹ de Microsoft qui couvre à l'heure actuelle une quinzaine de villes américaines (San Francisco, San José, Seattle, Boston, Philadelphia, Los Angeles, Las Vegas, Detroit, Phoenix, Houston, Baltimore, Atlanta, Denver, Dallas-Fort Worth et New York), alors que plusieurs centaines d'autres sont en cours de saisie. On pourra constater (Figure 8) le caractère saisissant du réalisme ainsi obtenu en animation.

Remarques finales

Après des années d'hésitation, les SIG à trois dimensions prennent vie sous la forme de villes virtuelles à trois dimensions dans lesquelles on peut non seulement naviguer, se déplacer comme un piéton, comme un oiseau, mais aussi procéder à des simulations environnementales, et en d'autres termes, lancer de véritables traitements. L'objet de cet article était de montrer les tendances lourdes de ce type de préoccupations.

Pour diverses raisons, la France avait manqué le tournant de la photogrammétrie, alors que cette technique est à la base des villes virtuelles 3D permettant non seulement d'estimer les hauteurs des bâtiments, mais aussi de repérer les textures des façades et des toitures.

La norme CityGML devrait rencontrer un consensus et vraisemblablement être adoptée comme norme officielle dans les mois à venir.

En ce qui concerne Virtual Earth de Microsoft, il faudra sans doute attendre plusieurs mois pour que diverses villes fran-

(9) <http://www.microsoft.com/virtualearth/>

(10) Le 26^e symposium UDMS a eu lieu les 10-12 octobre 2007 à Stuttgart. Voir <http://www.udms.net/>.

çaises soient ainsi couvertes. Quoiqu'il en soit, beaucoup d'applications urbaines à trois dimensions devraient voir le jour comme celles, nombreuses, qui ont été présentées lors du dernier Symposium européen sur les Systèmes d'information de l'UDMS¹⁰ en octobre 2007. ●

Contacts

Robert LAURINI - Sylvie SERVIGNE

LIRIS, INSA de Lyon

Robert.Laurini@insa-lyon.fr

Sylvie.servigne@insa-lyon.fr

Références

Ferries B. (2007) "Maquettes numériques des bâtiments et des territoires : l'interopérabilité progresse" GeoEvenement 2007, Paris, 3 au 5 avril 2007.

Kraus, K., Waldaeus, P., (1998) "Manuel de photogrammétrie, principes et procédés fondamentaux". Traduction de Grussenmeyer P. et Reis O. Paris : Hermès, 407 pages.

Laurini R., Milleret-Raffort F. (1993) "Les bases de données en géomatique". Paris : Hermès, 340 p.

Müller P. (2006) "Procedural Reconstruction of Archaeological Sites" Eurographics Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST), Hilton Hotel, Nicosia, Chypre, 2 novembre 2006.

<http://www.vision.ee.ethz.ch/~pmueller/wiki/Courses/VAST2006>.

Döllner J., Hagedorn B. (2007) "Integrating urban GIS, CAD and BIM data by service based virtual 3D city models" In Proceedings of the 26th UDMS, October 10-12, 2007, Stuttgart, Germany., "Urban and Regional Data Management", edited by V. Coors, M. Rumor, EM Fendel, S. Zlatanov, Published by Taylor and Francis, ISBN 978-0-415-44059-2, pp. 403-413.

ABSTRACT

Key words : Geographic Information Systems, GIS, 3D, virtual cities, CityGML, Google Earth, Virtual Earth.

From several years, many works try to model cities as three-dimensional objects. Those tools now are mature enough and are made available. An outlook of underlying models and technologies are presented in this paper. After having given a list of potential applications, various concepts of 3D city models are presented. The standard CityGML is then sketched, aiming at modelling the totality of urban buildings and furniture. We conclude this paper by presenting very rapidly projects from companies, Google (Google Earth), and Microsoft (Virtual Earth) whose objectives are describing cities all around the world with a high degree of realism, in order to navigate, organize information, locate services and run simulations.

Méthodologie de montage d'un SIG-3D par des Etudiants

■ François BOUILLÉ

MOTS-CLÉS

JAVA-3D, méthodologie de conception, projet étudiant, réalité virtuelle, SIG-4D, simulation, structuration HBDS

L'objectif de cette brève communication, d'ordre méthodologique, est de présenter la réalisation d'un modèle 3-D destiné à des Etudiants (Bac+5), prenant en compte le temps, d'où le nom de "projet SIG-4D", modèle permettant l'immersion de l'utilisateur, selon les techniques maintenant classiques de réalité virtuelle. Ce projet est avant tout un projet d'enseignement, visant à former des spécialistes en Géomatique et SIG, capables aussi bien de prendre en charge un système informatique complet, notamment dans le domaine des SIG, que d'appliquer leurs compétences à un domaine précis (la gestion d'un réseau par exemple), ou enfin de développer de nouvelles applications de pointe utilisant pleinement la 3D.

Ce projet a été intégré depuis 1998 dans l'enseignement du DESS double compétence IAST¹, cursus devenu, dans le cadre de la réforme LMD, un Master2 intitulé "Informatique Appliquée aux SIG", co-habilité UPMC-ENSG.

Il est important dès à présent de préciser que le développement est limité à une durée de six semaines, en fin d'année, et qu'aucun logiciel SIG n'est utilisé. Seul l'accès à un environnement de développement est fourni, en l'occurrence du JAVA 3D.

Les objectifs du projet SIG4D

Deux objectifs sont à la base de ce projet :

- réaliser un SIG immersif,
- acquérir et maîtriser une méthodologie de développement sur des SIG innovants.

La modélisation au sein du projet "SIG-4D" prend en charge les composants suivants :

- le MNT et l'orthophoto,

- un nombre quelconque de réseaux aériens, de surface, ou souterrains,
- le cadastre et le bâti,
- des photographies de mobiliers,

et adjoint des composants articulés mobiles au sein du modèle, avec la possibilité de synchroniser leurs déplacements (par exemple des trains), d'où l'intervention de la 4^e dimension : le temps.

Une fois composé, le modèle complet, appelé ici "univers" doit pouvoir être manipulé selon six degrés de liberté (translations et rotations). Enfin, le géomaticien doit pouvoir s'immerger au sein du modèle :

- soit pour un parcours au sol : déplacement d'un véhicule piloté en tout-terrain, ou déplacement asservi le long d'un graphe (par exemple le graphe des routes),
- soit pour un vol tactique, par exemple un parcours enchaînant des talwegs, automatique ou piloté.

Pour réaliser ce projet, une méthodologie a été définie, décomposant la conception en plusieurs étapes, chacune reposant sur l'emploi d'outils théoriques expérimentés de longue date. La première étape consiste à structurer, la deuxième à définir une architecture logicielle allant du stockage jusqu'aux IHM³, la troisième à effectuer les développements algorithmiques, la quatrième, très brève, à programmer et tester. Ces étapes sont rigoureusement distinctes. Un retour est possible en cas d'erreur.

L'étape de structuration

Elle fait appel à un modèle, une méthode, un catalogue de structures préexistantes, et bien évidemment à des composants géographiques à organiser.

■ L'outil de modélisation

La modélisation du monde réel pris en compte dans "l'univers" est fondée sur le modèle HBDS³. Celui-ci repose sur six TAD⁴ persistants élémentaires, complétés par diverses extensions :

- des ensembles appelés "classes",

(1) IAST : Informatique Appliquée aux Sciences de la Terre.

(2) IHM : Interface Homme-Machine.

(3) HBDS : Hypergraph-Based Data Structure (Bouillé, 1977)

(4) TAD : Type Abstrait de Donnée, traduction de Abstract Data Type, quoiqu'il s'agisse ici de manipuler des choses fort concrètes...

- portant un nombre quelconque d'"attributs de classe", représentant leurs propriétés,
- présentant entre eux un nombre quelconque de "liens entre classes", porteurs de relations potentielles, que leurs éléments peuvent éventuellement vérifier (mais non obligatoirement),
- contenant un nombre quelconque (parfois très grand) d'éléments appelés "objets",
- ces objets possèdent des "attributs d'objets" correspondant à leurs attributs de classe respectifs,
- présentent éventuellement des "liens entre objets" qui sont les réalisations effectives de leurs liens entre classes.

Un attribut n'est pas "atomique" (au sens du modèle relationnel), mais peut être d'un genre autre qu'un simple scalaire : vecteur, matrice, tenseur, liste, groupe... Le typage offert pour les attributs est assez riche : numérique (entier, flottant, complexe, quaternion, bi-quaternion, octonion, rationnel), booléen ou chaîne de caractères. Un attribut numérique peut être muni d'une unité, permettant de vérifier les équations aux dimensions. On peut lui appliquer diverses conditions et contraintes.

Ces six TAD de base sont complétés par des "hyperclasses", qui sont des regroupements de classes, des "hyperattributs", des "hyperliens", et par d'autres TAD obtenus par auto-extensibilité, tels que les "prototypes", que nous présentons plus loin.

La méthode de modélisation

Ayant inventorié tous les composants pouvant intervenir dans "l'univers", il s'agit de composer celui-ci. Pour tout concept, l'on cherche s'il s'agit d'un ensemble (ce sera donc une classe), d'une propriété (donc un attribut), d'une relation (donc un lien) ou d'un élément (donc un objet).

Pour toute classe, l'on cherche tous les attributs à prendre en compte, tous les liens avec d'autres classes. L'on cherche de même quelles sont les classes qui sont regroupables en plus grands ensembles constituant des hyperclasses. Tout composant de "l'univers" à modéliser est donc représenté par un TAD.

L'utilisation de prototypes

Un prototype est un modèle de structure représentant un type de phénomène que l'on retrouve applicable en diverses occasions. On le définit alors une fois pour toutes, et l'on en utilise une copie spécifique dédiée à chaque application. C'est un peu du "légos" pour géomaticiens...

L'on dispose déjà d'un certain nombre de prototypes réutilisables : graphe, réseau, maillage, isoligne, polyèdre, etc...

Tout réseau repose d'abord sur le concept de graphe, constitué de sommets et d'arcs, auxquels nous adjoignons des domaines représentant les entités surfaciques. Ces classes élémentaires présentent divers liens qui assurent la topologie du phénomène géographique. Un arc peut supporter des points annexes qui modifient son modelé et le divisent en

segments successifs. Les attributs que sont les coordonnées des sommets et celles des points annexes fournissent aisément la métrique du graphe et permettent d'obtenir la longueur d'un arc, le périmètre et la surface d'un domaine.

Un réseau est d'abord un graphe, complété par des réalisations matérielles modélisées comme suit :

- deux hyperclasses de mobiliers associées respectivement aux sommets et aux points annexes,
- une hyperclasse de composants linéaires matérialisant les segments.

Les segments ne sont toutefois pas toujours homogènes ; par exemple, ils peuvent être constitués de tubes de nature différente, et cette hétérogénéité doit être prise en compte en localisant le point de changement ; il en est de même de la localisation de soudures, ou de mobiliers dédiés : protection cathodique, capteurs divers, boîtiers de relais, etc...

Nous prenons donc en compte ces "points supplémentaires" et les "tronçons" (sous-segments qui en découlent) c'est-à-dire deux nouvelles classes. La figure 1 montre les diverses classes d'un réseau, certaines figurant en abrégé : S, A, D, PA, PC (pour "sommet", "arc", "domaine", "point annexe", "point complémentaire"), ainsi que diverses hyperclasses : CL, MPA, MPC, MS (pour "composant linéaire", "moblier de point annexe", "moblier de point complémentaire", "moblier de sommet"). Les diverses hyperclasses de mobilier sont elles-mêmes regroupées au sein d'une hyperclasse commune,

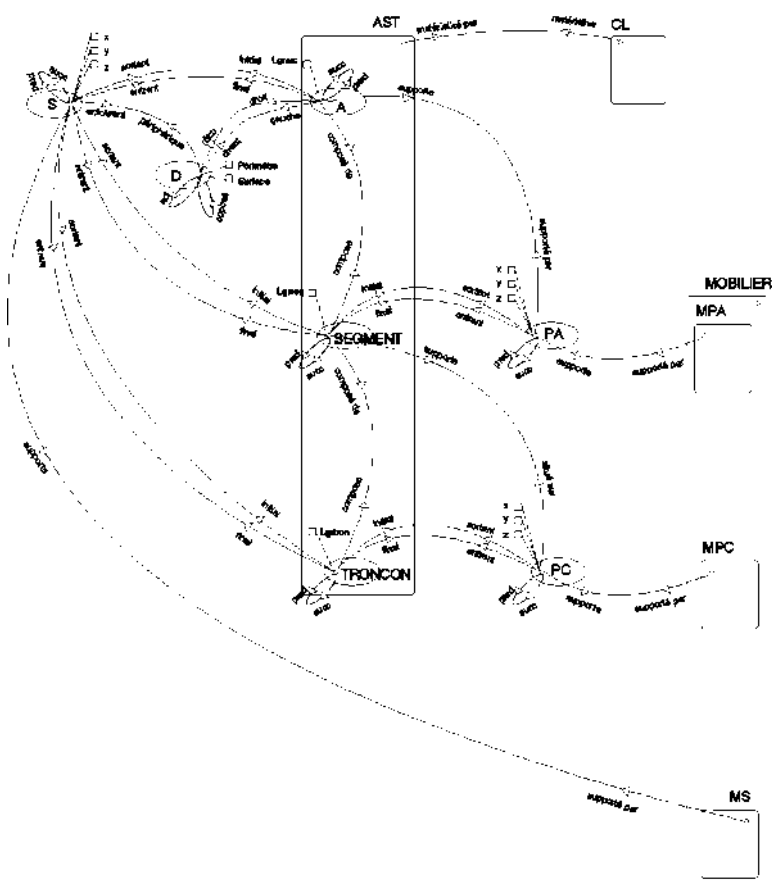


Figure 1. Le prototype réseau.

de même que l'hyperclasse AST regroupe les classes "arc", "segment" et "tronçon".

L'on peut ainsi, avec ce prototype, modéliser n'importe quel réseau, à n'importe quelle échelle.

Afin de contrôler les interactions entre réseaux, dans le cadre de la 3D, il faut tenir compte des superpositions et intersections ; l'on montre aisément que deux réseaux représentent neuf cas de superposition, ce qui conduit à neuf classes, et autant pour les cas d'intersection. Avec plusieurs réseaux, le nombre des classes augmente notablement, mais le fait de ranger les divers cas dans des classes distinctes ne consomme pas plus de place ; à l'inverse, ce rangement raccourcit considérablement le temps d'accès à l'information.

Par ailleurs, il faut pouvoir localiser instantanément tout ce qui peut être présent dans une zone de "l'univers". L'on applique donc un maillage rectangulaire (ou carré) auto-adaptatif, intervenant au sein de chaque dalle. Chaque maille doit être mise en relation avec tous les composants se trouvant au sein de celle-ci (sommets, points annexes, points complémentaires) ou la traversant en tout ou partie (arcs, segments, tronçons) ; l'on relie de même la maille aux nombreux points de superposition et d'intersection. La classe maille et ses caractéristiques sont prévues à l'étape de structuration. Les objets des classes de superpositions, intersections, et les liens avec la classe maille ne seront construits qu'à l'étape algorithmique.

■ Les composants du modèle

Ce sont, entre autres, un MNT, une orthophoto, des réseaux, du bâti, des photos de mobiliers. Le MNT peut être de grande taille. On lui associe un ensemble orthophotographique. Le MNT est divisé en grandes dalles rectangulaires de même taille.

A l'intérieur de chaque dalle, tous les quadrilatères gauches sont systématiquement scindés en deux triangles. L'orthophoto couvrant chaque dalle (ou la combinaison d'orthophotos) est plaquée sur le MNT, et chaque triangle reçoit ainsi une texture.

Divers réseaux sont alors pris en compte :

- des réseaux de surface : par exemple les routes ; ces réseaux sont plaqués directement sur le MNT, en superposition avec le fragment d'orthophoto,
- des réseaux souterrains : ils sont généralement représentés par un enchaînement de cylindres, une couleur spécifique caractérisant le réseau ; les jonctions sont réalisées par des sphères de diamètre légèrement supérieur à celui des cylindres.
- des réseaux aériens : par exemple les lignes à haute tension ; les pylônes sont réalisés en 3D et les lignes sont matérialisées non par des segments, mais bien sûr par des chaînettes. Un réseau peut évidemment changer d'état, et partiellement souterrain, peut devenir de surface ou aérien, ou vice-versa.

Architecture du modèle

Le système est développé selon une architecture multicouche. La couche la plus interne est la base de données, la plus externe étant l'IHM. Les interfaces sont définies en précisant à chaque fois, le nom de la primitive, les spécifications des paramètres, les messages de retour qui permettent de contrôler et de "rendre compte". Au sein de chaque couche, les divers modules sont définis, eux aussi avec leurs noms, leurs paramètres spécifiés et leurs messages. Un graphe des appels de modules est géré au sein de chaque couche. Au total, les modules sont quelques centaines. Les effectifs Etudiants assurant ce projet sont montés certaines années jusqu'à 86 personnes, les équipes étant constituées de trinômes devant s'interfacer. Il convient donc de ne pas aboutir à un développement anarchique. Une grande discipline de travail est imposée. Une équipe de coordination gère les noms des modules, le contrôle des paramètres, et surtout la définition des messages échangés entre les modules.

Une attention particulière est prêtée à bien séparer les modules de calcul des modules d'affichage. Dans la mesure où divers thèmes géographiques viennent se connecter facultativement, il est nécessaire de développer autant d'IHM. Les divers thèmes doivent pouvoir cohabiter. Cette possibilité implique de ne pas récrire des combinaisons d'IHM, mais de connecter toute IHM spécifique à une IHM d'accueil. Sous la couche des IHM, l'on trouve toutes les "moulinettes" géomatiques de calculs divers. La figure 2, extrêmement simplifiée, donne une idée de l'architecture multicouche.

Lorsque l'architecture a été bien spécifiée dans le détail, l'on peut passer à l'étape algorithmique.

L'étape algorithmique

Tous les algorithmes écrits doivent être dûment commentés. Ils doivent s'insérer dans le graphe d'appel précédemment évoqué. Ils représentent quelques centaines de modules.

Nous disposons d'un langage algorithmique ADL⁽⁵⁾, indépendant de tout langage de programmation, de tout système opératoire et de tout matériel. Constitué d'une cinquantaine de symboles mathématiques, et muni de théorèmes d'optimisation, il permet une écriture condensée, rationnelle et très rapide. Ce langage est sans étiquette et permet donc le développement d'un code sans "zone d'ombre". Il contient tous les éléments permettant d'écrire des algorithmes aussi bien pour machines séquentielles, vectorielles, et parallèles. Il existe un excellent éditeur algorithmique, développé par un de nos anciens Etudiants, M. Boutard, et utilisé en libre service par nos actuels Etudiants.

Les algorithmes relèvent de diverses catégories, dont les objectifs résumés sont les suivants :

- prendre en charge les thèmes de base :
 - effectuer le découpage en dalles,

(5) ADL : Algorithm Description Language (Bouillé, 1977).

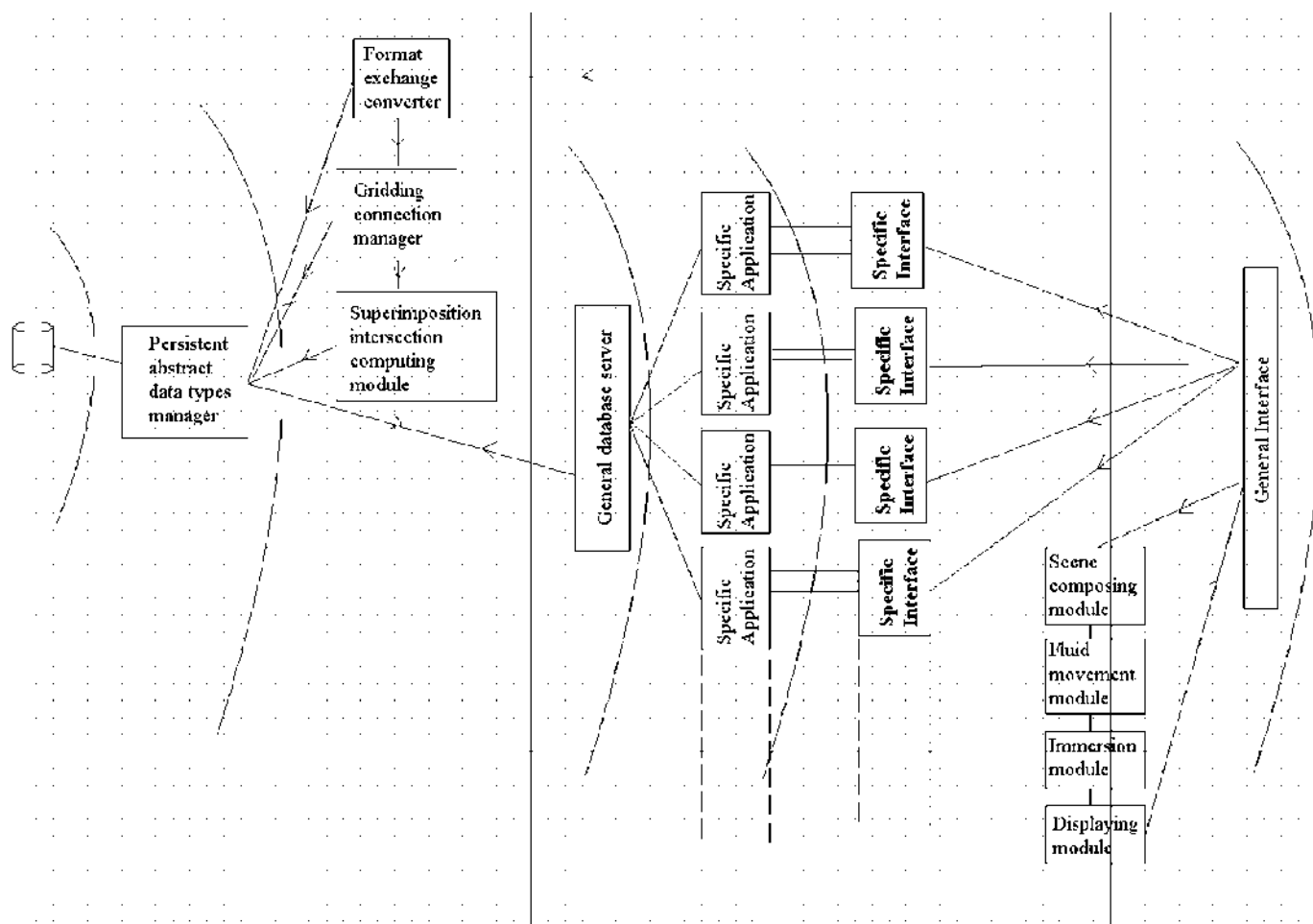


Figure 2. Architecture logicielle sommaire du projet (in Bouillé, Conf. Hong-Kong).



- trianguler le MNT, et plaquer les orthophotos sur les triangles ainsi générés,
- plaquer divers graphes de surface directement sur le MNT,
- composer des graphes souterrains sous le MNT,
- placer des graphes aériens, suspendus par du mobilier stylisé (pylônes), et fabriquer les chaînettes correspondant aux câbles,
- appliquer un maillage auto-adaptatif, au sein de chaque dalle, et relier tous les composants précédents à ce maillage,
- engranger tout ceci dans la base de données,
- gérer les interactions statiques :
 - calculer toutes les intersections et superpositions entre thèmes,
 - les relier au maillage de chaque dalle,
 - enrichir la base de données.
- préparer la gestion de mobiles incorporés dans "l'univers" :
 - écrire les primitives d'un échancier (simulation quasi-parallèle), pour les mobiles,
 - évitement de collision des mobiles,...
 - préparer le graphisme d'un ou plusieurs mobiles dont on assure l'articulation,
 - les associer à un ou des réseaux,
- préparer la gestion d'itinéraires d'immersion :
 - recherche automatique de chemins dans les talwegs,
- formalisation du déplacement d'un véhicule en tout terrain (tenir compte du dévers, etc...),
- et du déplacement asservi sur un graphe, en automatique ou en commandé,
- vers les basses couches, algorithmes de récupération des informations depuis la base de données, selon divers critères,
- en prenant en compte les mailles, les intersections et superpositions, algorithmes de composition de scène, selon une direction et un angle de vision, avec parties visibles, soit en éliminant les parties cachées, soit sans élimination de celles-ci,
- gestion de l'éclairage, de la nébulosité, etc...
- algorithme de déplacement de scène, ou de déplacement dans la scène :
 - en utilisant des matrices homogènes,
 - en passant par des quaternions, ce qui divise par deux le temps de calcul,
- affichage de la scène,
- enchaînement de dalle en dalle lors du déplacement,
- composition de chaque IHM dédiée,
- composition de l'IHM d'accueil,...

Cette liste non exhaustive donne une idée de ce travail, le plus important du projet (quatre semaines environ). A la fin de cette étape, il est encore possible de choisir le langage de programmation, les algorithmes développés étant indépendants de celui-ci.

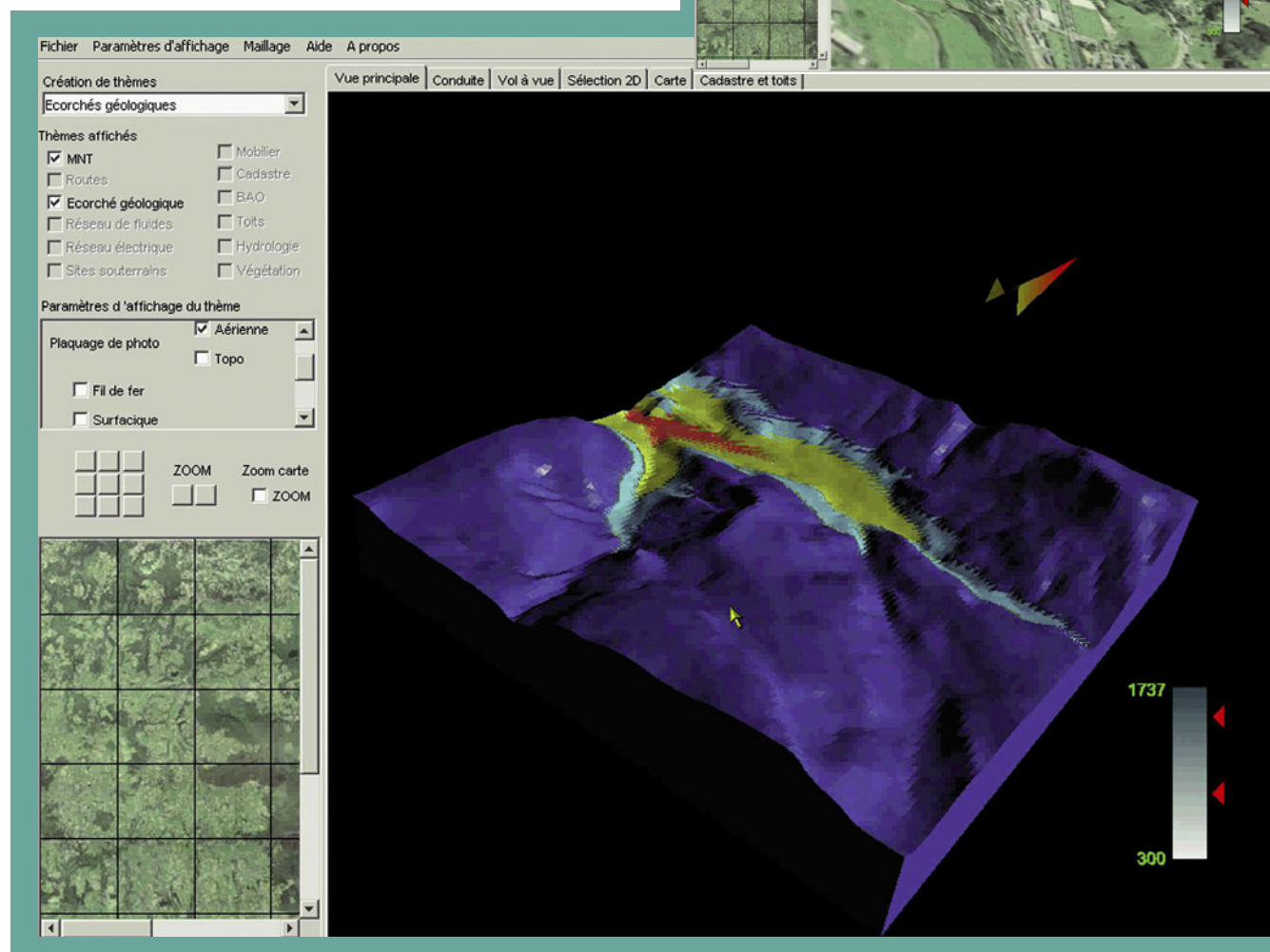
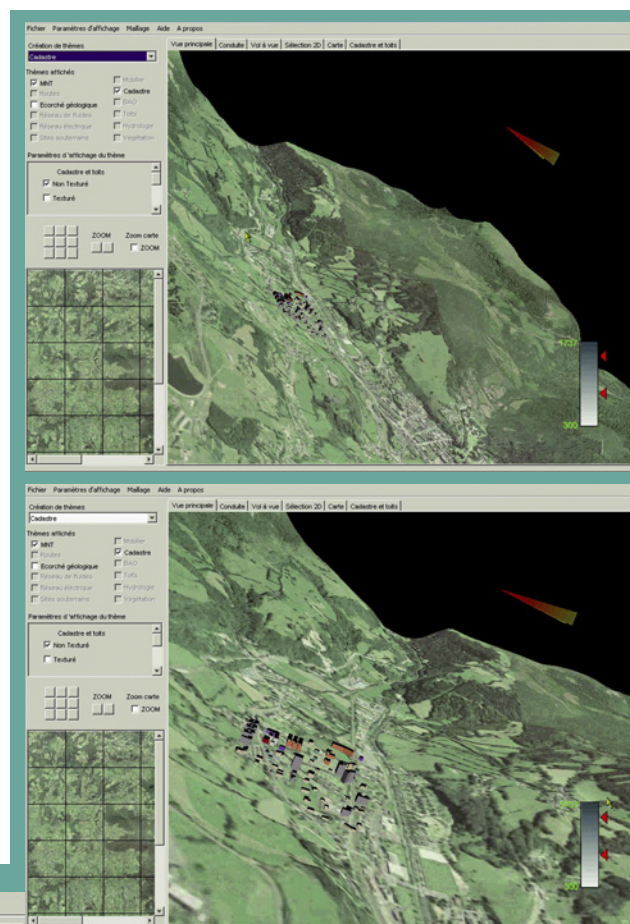
Ces algorithmes doivent pouvoir être enchaînés à l'étape de la programmation sans que l'on découvre alors, beaucoup trop tard, des incompatibilités.

L'étape de programmation

Dans la mesure où tout a été correctement pensé préalablement, cette étape est fort courte. HBDS possède un langage, ADT'81, permettant une manipulation aisée des TAD persistants. Mais le but est de traduire les algorithmes dans un langage couramment utilisé dans le milieu industriel.

L'on pourrait s'en dispenser en utilisant un traducteur automatique d'algorithme, permettant d'obtenir au choix, l'implantation du SIG en C, C++, FORTRAN 95, PASCAL, voire en un excellent langage bien structuré et performant (comme SIMULA), ou tout autre langage, éventuellement peu performant au contraire (mais utilisé alors dans cet entraînement

(6) BNF: Bacchus Naur Form.



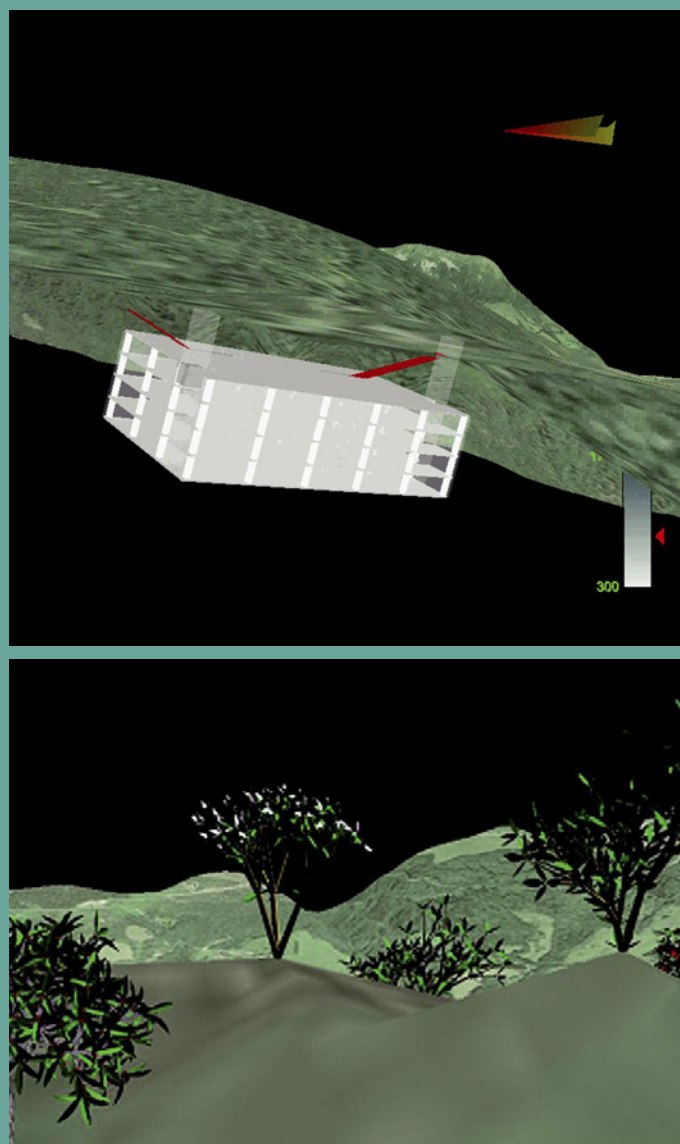
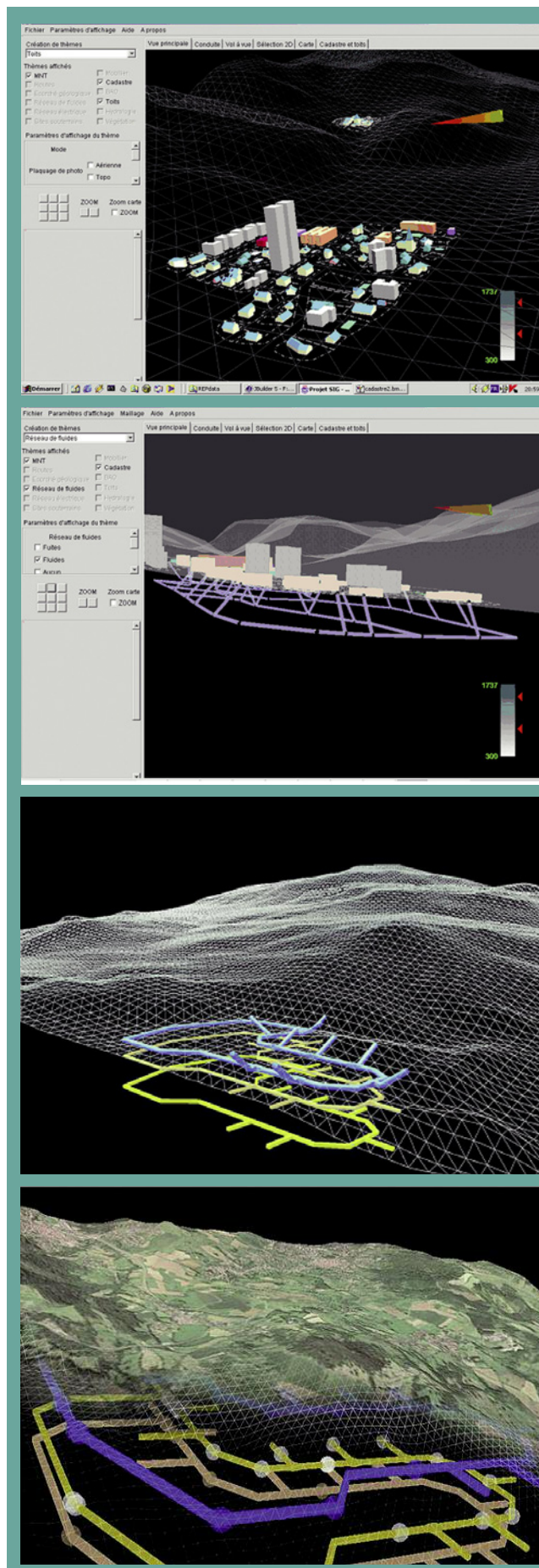


Figure 3. Quelques images des applications : promenade au-dessus du bâti, écorché géologique, bâti et réseau, réseaux souterrains, parkings souterrains, végétation, ... (travaux des Etudiants)

pour préparer les Etudiants à ce langage qui leur est demandé sur le marché du travail...).

C'est en JAVA 3D que le projet est implanté chaque année. Pourquoi ce choix ? Non que ce soit un bon langage ! Il ne repose pas sur une grammaire exprimable par une BNF⁶. Il est lourd ! Il est peu performant, beaucoup trop lent. Qu'importe, le JAVA est demandé, nos Etudiants doivent le connaître, et comme ils ont déjà utilisé Fortran 95 et C++, va pour le JAVA, version 3D évidemment. Il a un avantage non négligeable : il est très utilisé pour les applications sur le réseau.

La traduction des algorithmes en JAVA ne demande que deux ou trois jours d'efforts, et deux jours de test, pour chaque équipe, et ceci peut donc se faire en parallèle. L'interfaçage entre équipes, c'est-à-dire le branchement d'un

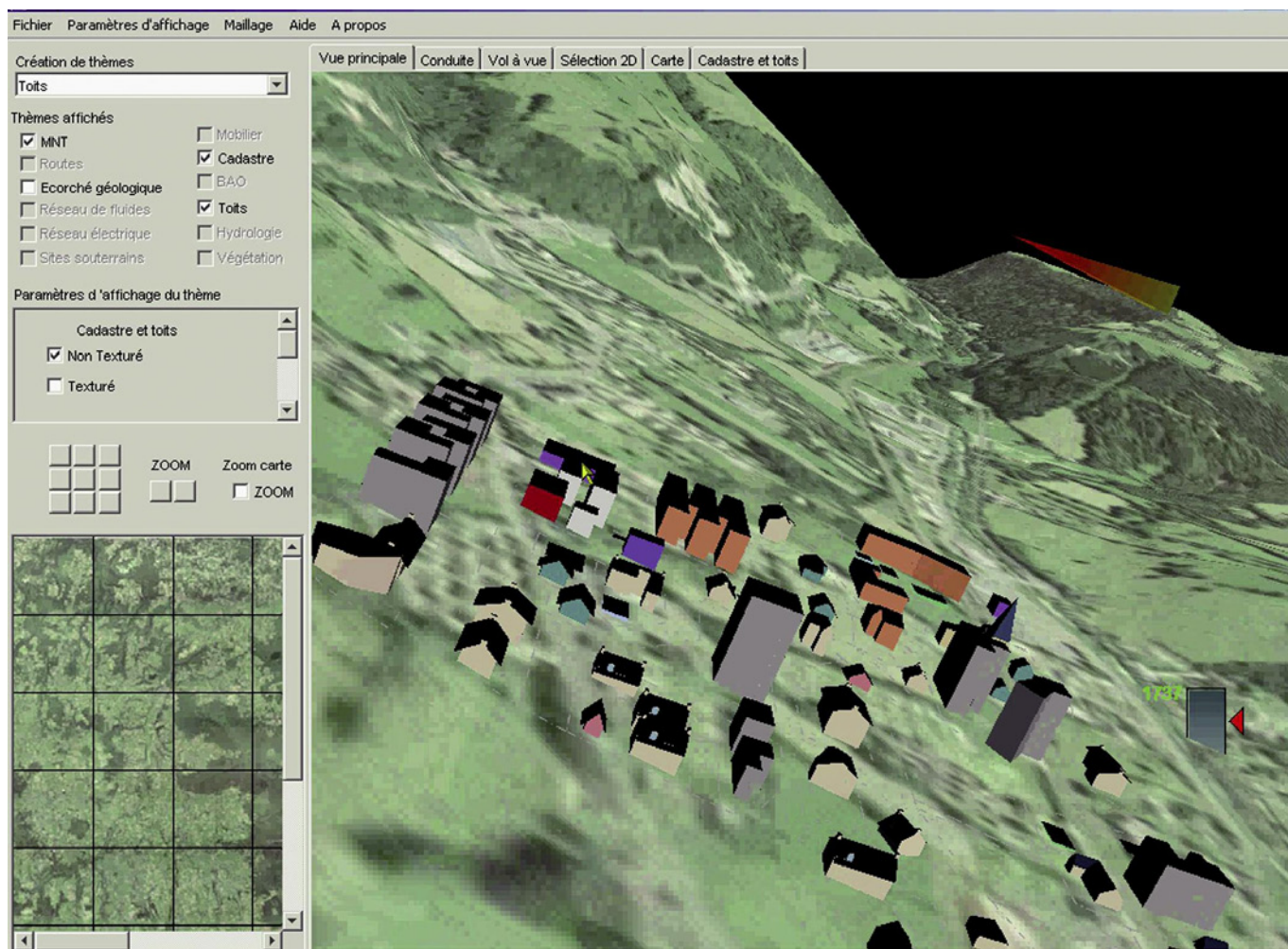


Figure 4. Plongée vers des immeubles pour un rase-motte (travaux des Eudiants).

“branch-group” sur la branche principale, demande deux heures au plus.

On remarquera que le projet pourrait tout aussi bien être retranscrit simultanément vers un tout autre langage, par exemple du C++ associé à OPEN-GL...

Le fonctionnement et les améliorations à apporter

Le “miracle” se produit le dernier jour lorsque l’ensemble fonctionne. L’on peut circuler dans “l’univers”, le plus impressionnant étant le vol tactique, en fond de talweg.

C’est d’ailleurs là que l’on découvre certains imprévus : il y a quelques années, la personne pilotant le vol en rase-motte voulait passer sous les lignes à haute tension, ce qui est logique en vol tactique ; mauvaise manœuvre, nous avons traversé un pylône ; eh bien ! l’avion a continué imperturbablement son vol, car la collision n’avait pas été envisagée dans les algorithmes !!!

Diverses applications ont été greffées : inondation d’une zone, croissance de végétaux dans “l’univers”, propagation d’un incendie (avec contre-feux et changement de direction du

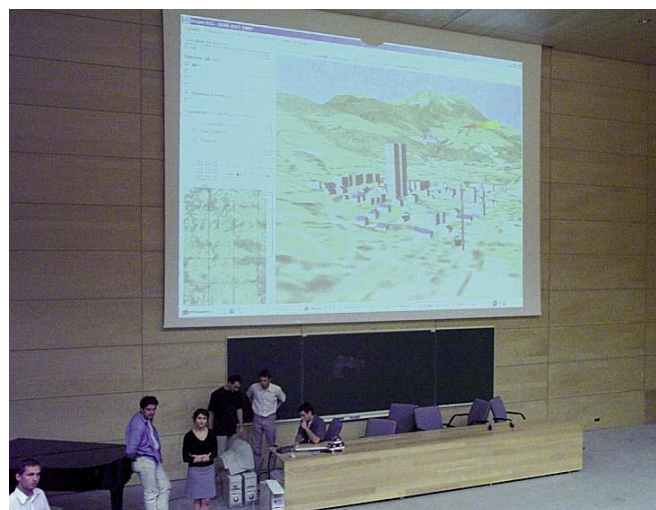


Figure 5. Projection sur grand écran le jour “j” (Photo M. Olivier Bouiri, IGN, avec son aimable autorisation).

vent), fuites de canalisations, construction de parkings souterrains avec ascenseurs en mouvement (figure 3), etc... La figure 4 montre une descente en piqué pour un rase-motte au-dessus d’un groupe de maisons.

Les régions utilisées pour construire concrètement “l’uni- ▶



vers" ont été jusqu'à présent :

- la zone de Chambéry,
- la Chaîne des Puys,

mais évidemment, toute autre région est envisageable.

Le délai de six semaines, accordé pour réaliser ce projet, est un peu court, et il est fréquent que les dernières 72 heures se passent en continu, dans un esprit d'équipe. L'on pourrait faire des choses bien meilleures en accordant in extremis un délai supplémentaire. Ce n'est pas l'objectif !

Il serait aussi possible de réutiliser le produit de l'année antérieure, et d'en assurer de copieuses extensions, faisant progresser le modèle chaque année. Là non plus, ce n'est pas l'objectif !

Le délai court prépare à la vie active, où tout est toujours demandé pour hier, et le stress faisant partie de la vie du Géomaticien, il doit s'acquiescer à l'entraînement... La fierté du produit réalisé est une belle compensation, et la démonstration finale (figure 5) se traduit ensuite par une explosion de joie collective.

Conclusion

Ce projet repose sur des outils de Génie Logiciel développés au LIST depuis fort longtemps et perfectionnés au long des années. Il s'agit d'outils de recherche directement utilisés par des Etudiants en fin d'étude, et non de logiciels commercialisés. L'objectif est essentiellement de les préparer aux SIG de demain, qui sont déjà présents dans divers secteurs. La méthodologie utilisée a pour but de diviser le travail :

- en étapes,
- en équipes,

permettant de gagner ainsi trois choses :

- un temps de développement très court,
- un produit plus modulaire et plus fiable,
- une maîtrise du logiciel permettant d'apprendre à s'interfacer efficacement et d'ajouter aisément de nouvelles extensions sans tout remettre en question.

Dans un contexte dit "orienté-objet", l'on a ainsi monté une architecture comprenant base de données, simulation discrète et continue, visualisation avec immersion, sans aboutir à une "usine à gaz". Il serait intéressant de compléter ceci en intégrant un moteur d'inférence, faisant partie du système SES⁷, permettant de gérer les composants SIG dans un contexte d'intelligence artificielle, ou encore le moteur neuronal fondé sur des TAD développé dès 1993, procurant des facultés d'apprentissage.

La plateforme intégrée est déjà utilisée complètement dans le cadre d'un projet de Génie Logiciel, mais cette dernière tranche n'a pas encore été mise à contribution en totalité dans le projet baptisé "SIG-4D". C'est aisément faisable, mais il faut

draît une semaine de plus. Nous sommes convaincus que les futurs SIG-3D incorporeront tous un ou plusieurs moteurs d'inférence, des processus discrets et continus, un moteur neuronal, et des possibilités accrues d'immersion.

La lacune majeure que nous rencontrons actuellement n'est ni conceptuelle, ni logicielle ; elle est matérielle ; c'est l'impossibilité d'obtenir avec des dispositifs à bas prix des facultés ergonomiques de déplacement libre dans le modèle, comme pourrait le faire une chauve-souris ou une libellule. Il reste à attendre un équipement complet (et léger) de réalité virtuelle pour le prix d'une paire de lunettes... ●

NB : Les images de cette communication ne sont pas de l'auteur mais sont extraites des travaux de ses Etudiants lors de la démonstration finale du projet "SIG-4D" (figure 5). Merci à eux pour le travail réalisé et l'investissement fourni.

Contact

Pr. François BOUILLÉ

LIST – Laboratoire d'Informatique des Sciences de la Terre,
Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) et ENSG
Francois.Bouille@ensg.eu

Bibliographie

F. Bouillé *Architecture of a collaborative 4-D GIS for student training*, Int. Adv. Workshop on Virtual Environments and Geocollaboration, Hong-Kong, Dec. 2003, 9 p., bib. cum.

F. Bouillé in prep.

Tome 1 : HBDS, le modèle et la méthode, 320 p.

Tome 2 : La formulation simple et rationnelle des algorithmes avec ADL, 250 p.

Tome 3 : Le langage ADT'81 et la manipulation des TAD persistants, 380 p.

ABSTRACT

Key words : design methodology, HBDS structuring, JAVA-3D, simulation, student training, virtual reality, 4D-GIS

The paper presents the specific methodology and tools for design and implementation of a stereoscopic animated 4D-GIS (3D + time), allowing process simulation and providing an immersive environment ; the goal is a six-week training session for students working in cooperating teams, and using an object-oriented platform and virtual reality technics.

(7) SES= Système Expert Structuré, ou Structured Expert System, développé en 1984 autour du noyau d'HBDS.

Vers la création d'un méta-modèle générique de l'information spatiale 3D urbaine

■ Roland BILLEN - François LAPLANCHE - Siyka ZLATANOVA - Ludvig EMGARD

MOTS-CLÉS

IDS 3D, CityGML, ontologie spatiale, modèle 3D urbain, SIG 3D, bâtiment

Si l'utilité de développer de véritables infrastructures de données spatiales 3D urbaines n'est plus à démontrer, leur réalisation concrète se heurte à des problèmes

de standardisation. Ces problèmes sont souvent liés à une mauvaise appréhension de l'étape conceptuelle initiale à tous développements de systèmes d'information. Dans cet article, nous présentons les prémices d'une approche ontologique inspirée par nos connaissances en acquisition de données spatiales. Le point de départ de cette ontologie est de considérer que l'univers est composé d'espace libre et d'espace occupé et que seule l'interface les liant est mesurable. Sur cette base, un méta-modèle générique de l'information spatiale 3D urbaine est présenté et confronté au standard CityGML au travers de la modélisation de l'objet bâtiment. En première analyse, l'ontologie proposée est relativement compatible avec le format d'échange CityGML mis à part des modifications relatives aux niveaux de détails de l'objet bâtiment.

Le développement de villes virtuelles, la modélisation 3D de l'espace urbain, sont devenus des thèmes de recherche et de développement de plus en plus courants. Ainsi, bon nombre d'applications spécifiques telles que des simulations sonores, visuelles ou de diffusion de pollution, tournent sur des modèles 3D. L'urbanisme, l'aménagement urbain, le tourisme virtuel sont aussi de grands consommateurs de modèles 3D, le plus souvent à des fins de communication (promotion, logique participative). Vu les développements dans le domaine de la visualisation 3D (animation, navigation, réalité virtuelle, réalité augmentée, etc.), les demandes et les exigences de tout un chacun augmentent obligeant ainsi le

monde de l'information géographique à emboîter le pas. La diversité des modes d'acquisition de données (lasergrammétrie, photogrammétrie, etc.) et leur automatisation grandissante, rendent de plus en plus disponibles les données 3D nécessaires au fonctionnement des systèmes d'information géographique 3D (SIG 3D). D'un point de vue réalisation, on est cependant loin de véritables infrastructures de données 3D, juste des applications isolées sur des fragments urbains. Ceci est dû essentiellement à une certaine inertie du mode de pensée spatial 2D et au manque de standardisation. Le premier facteur est culturel et tend à s'estomper avec les années, les utilisateurs commencent doucement à formuler leurs besoins en information 3D. Le deuxième facteur, la standardisation de l'information et des processus, a déjà limité par le passé le développement des SIG 2D. La mise en place de groupements tel l'OpenGeospatial Consortium (OGC) pour pallier la lenteur de la normalisation "de jure" tend à combler ce vide. La standardisation de l'information géographique 3D est en cours. Le CityGML (Kolbe and Gröger 2003 ; Ewald and Coors 2005 ; Kolbe, Gröger *et al.* 2005 ; Gröger, Kolbe *et al.* 2007) est en passe de devenir le premier format d'échange standard de modèles 3D urbains. Le monde de l'information géographique comble ainsi son retard en la matière sur les standards informatiques 3D ainsi que sur ceux mis en place dans le monde de l'AEC (Architecture, Engineering and Construction). L'intégration de ces standards dans le but de développer des modèles intégrés efficaces est un défi que ces différentes disciplines doivent relever, et qui passera vraisemblablement par une intégration au sein des systèmes de gestion de base de données (SGBD) (Zlatanova and Prosperi 2005). De tels systèmes intégrés sont en train de voir le jour (Döllner, Baumann *et al.* 2006). Cependant, bien des problèmes restent à régler au-delà des aspects techniques (acquisition, stockage, traitement, visualisation, etc.). Le premier d'entre eux à nos yeux est certainement le développement de modèles génériques de l'information 3D urbaine. En effet, les modèles proposés sont souvent le fruit de développements empiriques sans véritable réflexion profonde sur la nature tridimensionnelle de l'espace urbain. Or, un modèle générique est nécessaire afin de développer des infrastructures de données 3D de référence à l'échelle urbaine qui permettraient la mise en commun de l'information et l'adjonction de modèles sémantiques.

N.D.L.R : en informatique, l'ontologie qualifie les systèmes de représentation des connaissances.

▶ Dans cet article, nous présentons certaines réflexions qui caractérisent actuellement notre démarche vers le développement d'un système intégré de gestion de l'information spatial 3D de référence au niveau urbain. Il s'agit de bases conceptuelles, voire philosophiques, qui nous paraissent essentielles au développement harmonieux d'un tel système. Nous nous inscrivons de ce fait dans un courant actuel de la science de l'information géographique qui tend à revenir à la définition de concepts fondamentaux, autrement dit à l'établissement d'ontologies spatiales. Dans la suite de l'article, nous discutons les différents types d'objets urbains à considérer. Ensuite, nous présentons brièvement le concept de méta-modélisation. Par la suite, nous présentons notre approche de la perception de l'espace, définissant ainsi un début d'ontologie. Cette ontologie est confrontée au CityGML dans le cas de la modélisation de l'objet "bâtiment". Finalement nous concluons et présentons les futures directions de recherche.

Quels types d'objets pour modéliser l'espace urbain ?

Traditionnellement, trois groupes d'objets ressortent comme étant les plus utiles et les plus demandés par les utilisateurs : les bâtiments, la végétation et les réseaux de communication. Cette vision est particulièrement réductrice. Il existe une foule d'objets à modéliser si l'on souhaite obtenir de véritables villes virtuelles. Par exemple, les données opérationnelles pour la planification urbaine vont bien au-delà des objets réels identifiés plus haut. L'administration du cadastre maintient des frontières juridiques, les statuts légaux des propriétés, etc. Suivant une classification proposée par Zlatanova (Zlatanova 2000; Billen and Zlatanova 2003) des objets tels que les personnes, les compagnies, les taxes, etc. sont à inclure dans le cadre des objets repris dans un SIG. Quatre groupes de base permettant de distinguer les objets réels sont introduits : les objets juridiques (individus, institutions, compagnies, etc.), les objets physiques (bâtiments, rues, infrastructure, etc.), les objets fictifs (limites administratives), les objets abstraits (taxes, revenus, etc.). Les caractéristiques géométriques des objets réels sont les critères exclusifs de groupement. Il y a des objets avec :

- des caractéristiques géométriques non complètes (ex : seulement un positionnement) ;
- des caractéristiques géométriques complètes et une existence dans le monde réel ;
- des caractéristiques géométriques complètes et une existence fictive ;
- sans caractéristique géométrique.

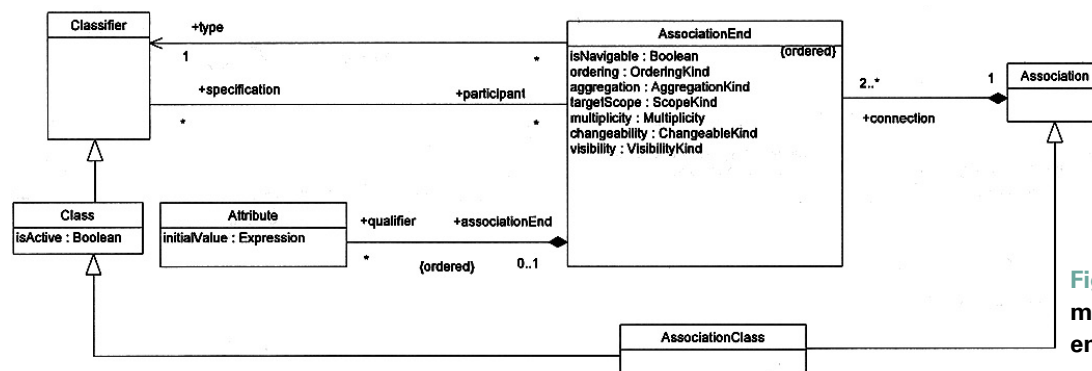


Figure 2. Extrait du méta-modèle UML : les liens entre classes et associations (OMG 2005).

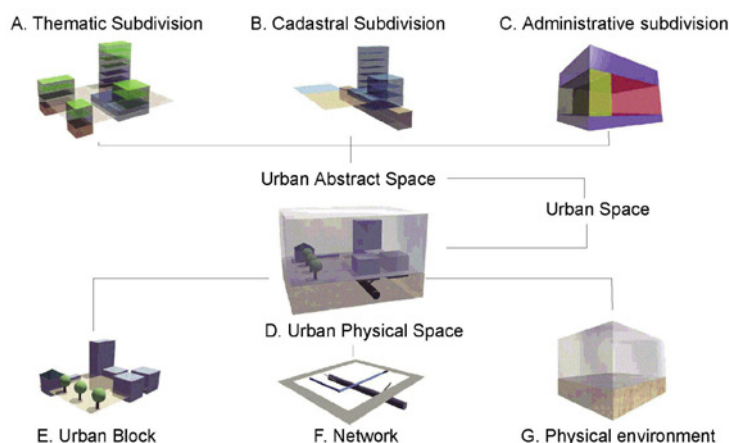


Figure 1. Exemples d'objets physiques et fictifs composant l'espace urbain (Billen 2000).

Le besoin en objet 3D fictifs n'apparaît pas habituellement aussi clairement que pour les objets physiques. Alors qu'il paraît normal d'évoluer d'une représentation 2D d'un bâtiment à une représentation 3D (vu que c'est la réalité), ce n'est pas aussi évident dans le cas d'objets fictifs (unités administratives, etc.). Pourtant, la prise en compte de tels objets est certainement une des clés du développement des SIG 3D urbains. Ils influencent évidemment les applications et les traitements que l'on peut espérer réaliser dans de tels systèmes. La figure 1 représente une vision de la multiplicité des types d'objets constituant la base de référence d'une ville virtuelle, reprenant des objets physiques et fictifs.

Dans notre première phase de développement, nous n'allons envisager que le cas des objets physiques. Ils représentent la grande majorité des objets actuellement considérés en modélisation 3D et ils peuvent également servir de points d'ancrage à d'autres types d'objets. Il nous paraissait cependant important de montrer la diversité d'objets que nous pensons devoir être pris en compte à l'avenir.

La méta-modélisation

Avant d'envisager son utilité, précisons quelque peu la notion de méta-modèle. Le préfixe "méta" vient du grec. Dans le terme "méta-modèle", il désigne un niveau d'abstraction supérieur et exprime la réflexion, l'auto-référence. Un méta-modèle consiste donc en la définition formelle des éléments, des règles, des contraintes... qui régissent la création d'un modèle. Le modèle, comme le méta-modèle, sont réalisés en utilisant un

formalisme. Le formalisme utilisé pour réaliser un modèle est décrit dans le méta-modèle. Néanmoins, ce même formalisme peut être utilisé pour construire le méta-modèle comme c'est par exemple le cas pour le formalisme UML (OMG 2005) (figure 2). Dans cette situation, le langage ou formalisme utilisé permet de se décrire lui-même. Cela peut sembler perturbant de prime abord, mais, pourtant, dans toute langue, les phrases utilisées pour décrire et expliquer une règle de grammaire sont construites en respectant, elles-mêmes, des règles de grammaire. C'est ce qui permet de rendre l'explication compréhensible. Il n'y a donc pas réellement de limites à l'utilisation du formalisme pour s'auto-décrire.

De sa définition découle directement l'utilité du méta-modèle, il s'agit du cadre strict qui va dicter l'utilisation d'un formalisme et, donc, lever toutes ambiguïtés quant à l'usage de ses concepts. Il va, dès lors, permettre de comprendre et d'expliquer parfaitement les modèles réalisés à partir du formalisme. La définition d'un méta-modèle robuste est un préalable à l'utilisation d'un formalisme pour la description de l'information 3D urbaine. La méta-modélisation possède un autre attrait. Puisque le méta-modèle constitue lui-même un modèle réalisé à partir d'un formalisme, ce (méta-)modèle peut être enrichi en respectant les concepts du formalisme, concepts qui sont d'ailleurs décrits au sein du méta-modèle. Cette caractéristique permet de ne pas devoir redéfinir des concepts de base tels les classes, les associations... et de les emprunter à un formalisme reconnu et éprouvé tel UML. En surchargeant le méta-modèle UML, ou tout du moins un extrait de celui-ci, avec les concepts nécessaires à la description de l'information 3D urbaine, nous obtiendrons le méta-modèle générique désiré. Une telle technique a d'ailleurs été utilisée et validée de nombreuses fois notamment dans le cadre d'informations spatiales 2D (Laplanche 2006).

L'ontologie de base du méta-modèle générique

Un modèle (un méta-modèle dans le cas présent) est toujours basé sur une perception / représentation particulière du monde réel. Ceci correspond à l'étape conceptuelle du développement d'un système d'information géographique. Cette étape a pour but de fournir des modèles conceptuels de données, des catalogues de données, bref un ensemble de documents formalisés qui représentent dans un langage clair les concepts et les objets représentant la perception qu'a le concepteur du monde réel. Lors de cette étape de conceptualisation, on fait appel explicitement ou implicitement à des ontologies. L'ontologie en tant que discipline philosophique a été redécouverte pour les besoins de l'Intelligence Artificielle. La construction rigoureuse de modèles du monde réel implique que ce dont on parle soit fixé exactement et que les interactions soient spécifiées. En Intelligence Artificielle et en informatique, le terme ontologie réfère à un vocabulaire ou un système de classification qui décrit les concepts opérant dans un domaine particulier à travers des définitions suffisamment détaillées pour saisir la sémantique du domaine. La définition de l'ontologie du domaine (géo-)spatial est un des grands thèmes de la

recherche en géomatique (Frank 1997 ; Smith and Mark 1998 ; Fonseca, Egenhofer *et al.* 2000 ; Vangenot 2004). La raison essentielle est d'arriver à des définitions universelles échangeables (facilitant l'interopérabilité). La recherche concerne la définition des objets, des processus et des relations, à différents niveaux d'échelle et de granulométrie, qui constituent le domaine (géo-)spatial (en y incorporant ou non le temps).

Ainsi, il nous apparaît primordial d'exprimer le plus clairement possible l'ontologie qui sous-tend notre méta-modèle dès son élaboration. Dans cet article, nous proposons les lignes de force de l'ontologie sans les aborder dans le détail. L'ontologie proposée s'inspire de notre expérience dans le domaine de l'acquisition de données. Dans un premier temps, nous considérons l'univers comme statique, sans composante temporelle. Nous ne présumons pas non plus du niveau de granularité de notre perception.

■ Ontologie proposée – premier niveau d'abstraction

- L'univers physique est composé d'un espace libre et d'un espace occupé
- L'espace libre est la portion d'univers dans lequel il est possible de se mouvoir physiquement.
- L'espace occupé est la portion d'univers dans lequel il n'est pas possible de se mouvoir physiquement.
- Le passage d'un espace à l'autre se fait au travers d'une interface sans épaisseur.
- Seule l'interface peut être perçue (mesurée) à partir de l'espace libre.

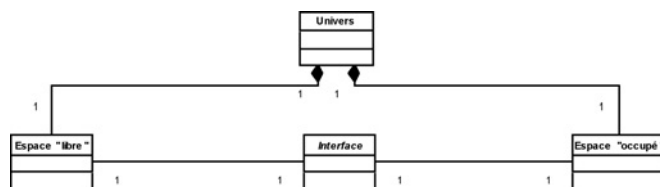


Figure 3. Premier niveau d'abstraction de l'ontologie proposée.

En tant qu'être humain, nous nous trouvons dans l'espace libre et nous avons conscience de l'existence de l'espace occupé au travers la perception de l'interface. Nous en percevons la forme, la position, la texture, la radiométrie... A la perception humaine on peut substituer des modes d'acquisition de données ne se propageant pas dans l'espace occupé. Nous n'avons donc pas conscience d'une potentielle partie d'espace libre qui serait totalement comprise dans l'espace occupé.

A ce stade, on peut déjà conclure qu'une modélisation basée sur cette ontologie ne concernera que des primitives géométriques de type surfacique plongée dans un espace 3D (car seule l'interface est mesurable et elle est sans épaisseur). De même, l'espace occupé étant inaccessible, il ne sera pas possible de le modéliser autrement que comme le complémentaire de l'espace libre. De ce fait on exclut toutes modélisations de type constructives (par exemple les standards IFC - Industry Foundation Classes). Le modèle issu de cette réflexion ontologique sera donc nécessairement complémentaire aux modèles en usage en architecture par exemple.

■ Ontologie proposée – deuxième niveau d'abstraction

- L'interface peut être segmentée en portions d'interface suivant des critères sémantiques, morphologiques, radiométriques ou autres.
- L'espace libre peut être segmenté en sous-espaces libres.
- L'espace occupé peut être segmenté en sous-espaces occupés.
- Un objet physique est composé d'un ou plusieurs sous-espaces occupés et potentiellement d'un ou plusieurs sous-espaces libres.
- Dans ce dernier cas, le sous-espace libre à considérer est une sous-catégorie appelée sous-espace libre intérieur.
- Un objet physique est associé à une ou des portions d'interface qui seront requalifiées en portions d'enveloppe interne si elles bordent un sous-espace libre intérieur composant l'objet physique, ou en portions d'enveloppe externe dans le cas contraire.
- Une ouverture est une surface de contact entre deux sous-espaces libres intérieurs ou entre un sous-espace libre intérieur et un sous-espace libre extérieur.

Ces règles appellent quelques commentaires. On accède à la géométrie d'un objet (par exemple un bâtiment) grâce à la "mesure" des portions d'interface qui lui sont associées. Le ou les sous-espaces libres intérieurs qui sont sémantiquement associés à l'objet permettent d'une part de distinguer les portions d'enveloppe interne des portions d'enveloppe externe et

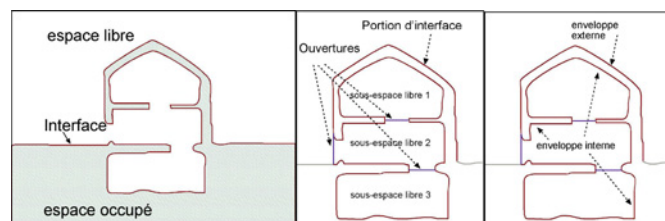


Figure 4. Illustrations des niveaux d'abstraction de l'ontologie proposée (coupe transversale dans un bâtiment).

d'autre part, au travers des ouvertures, d'envisager des connectivités à l'intérieur de l'objet et entre l'intérieur et l'extérieur. En ce sens, le choix de modélisation des sous-espaces libres internes composant un objet fixe le niveau de détail maximum sous lequel l'intérieur de l'objet peut être considéré. Par contre, il est conceptuellement possible d'envisager un niveau de détail plus grossier en envisageant une généralisation des sous-espaces libres intérieurs (et des portions d'enveloppes internes les bordant). Par exemple, si le sous-espace libre intérieur représente une "pièce", on peut envisager une généralisation vers un concept "d'étage". Notons qu'un objet peut n'être constitué que de sous-espaces occupés et uniquement perceptibles au travers d'une portion d'enveloppe externe (objet "plein" ou bien objet dont l'intérieur est inaccessible). Dans le même ordre d'idée, on peut envisager des objets uniquement perceptibles au travers de leur portion d'enveloppe interne (par exemple une canalisation souterraine).

La modélisation des bâtiments

Le CityGML a pour but d'offrir un standard d'échange spécifique aux modèles 3D urbains en ajoutant à l'interopérabilité géométrique du GML3 une interopérabilité sémantique (basée sur des définitions communes d'objets, attributs et relations). Les classes sémantiques définies sont les bâtiments et autres objets anthropiques, objets végétation, objets hydrographiques et les réseaux de transports. Le CityGML propose une solution pragmatique à la modélisation de l'espace urbain. Comme souvent dans le monde de l'information géographique, l'ontologie qui a inspiré les concepteurs est implicite et n'est donc jamais clairement énoncée. A l'analyse, il nous apparaît que cette ontologie implicite ne doit pas être fondamentalement différente de celle qui sous-tend nos travaux. Le diagramme suivant propose une reformulation sui-

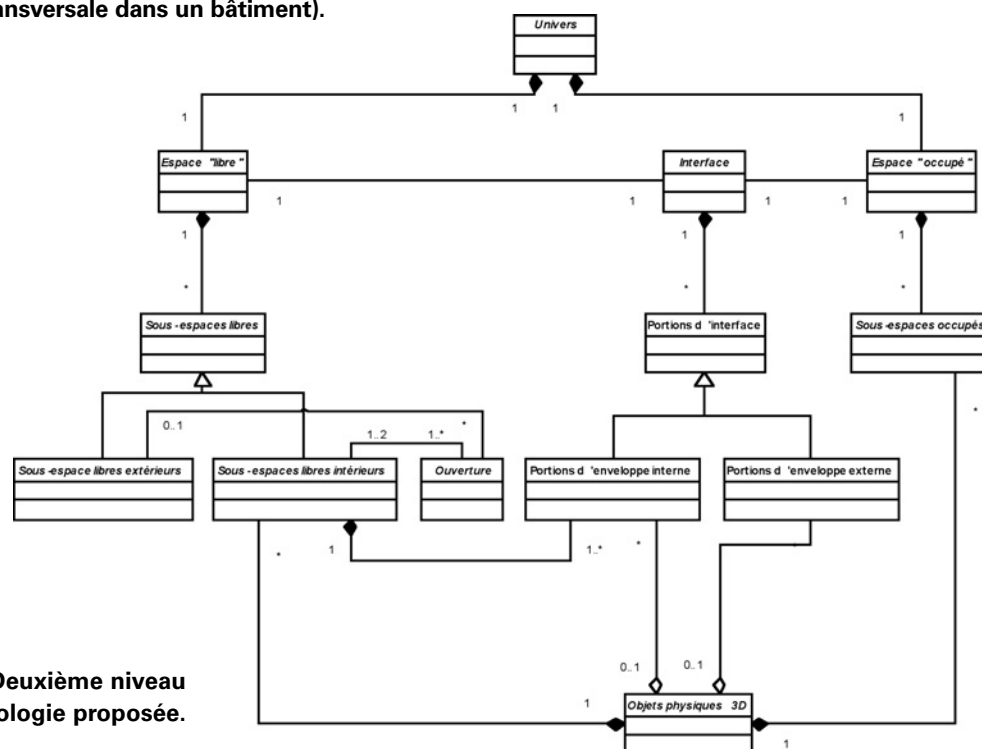


Figure 5. Deuxième niveau d'abstraction de l'ontologie proposée.

Figure 6. Intégration de certains objets CityGML dans l'ontologie proposée.

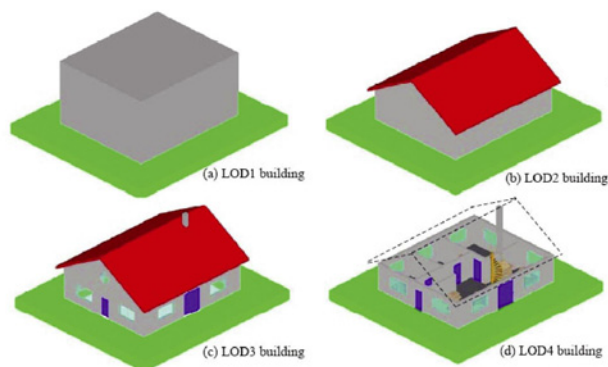
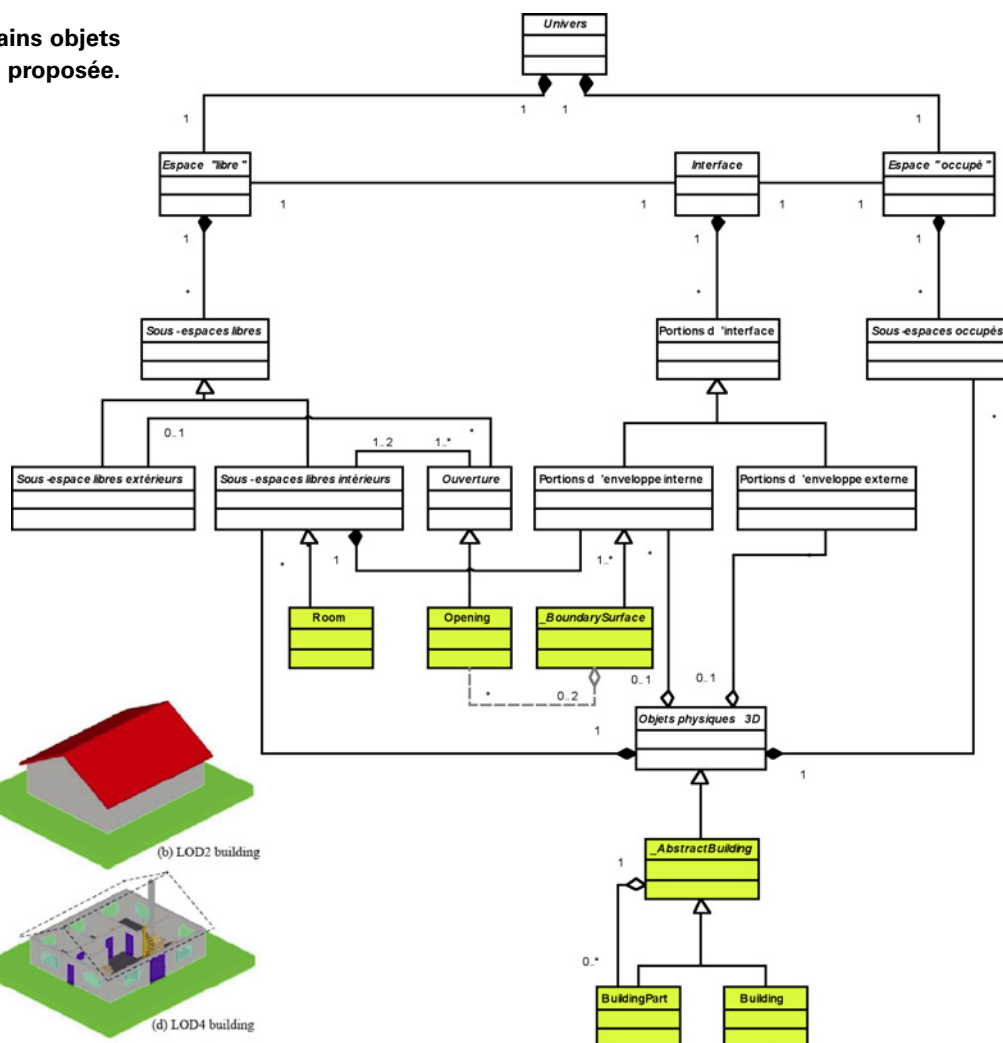


Figure 7. Les différents niveaux de détails de l'objet bâtiment dans CityGML (Gröger, Kolbe *et al.* 2007).

vant notre méta-modèle de certains objets liés à la modélisation des bâtiments dans CityGML. Notre objectif est d'envisager ce quasi-standard de l'information 3D urbaine dans le développement de notre système en étudiant sa correspondance avec notre ontologie et, le cas échéant, en proposant des modifications ou des aménagements à des concepts qui ne nous paraissent pas reposer sur une base ontologique forte.

Dans le cas des bâtiments, il existe une bonne correspondance entre notre méta-modèle et le CityGML (figure 6). Néanmoins, nous envisageons une modification en nous basant sur la logique de notre ontologie. En effet, le CityGML considère 5 niveaux de détails (level-of-Detail – LoD) dont 4 sont directement liés à la représentation des bâtiments (figure 7).

- Niveau 1 (LoD 1) : modélise les bâtiments comme des blocs avec des toits plats. Les modèles sont généralisés et aucune texture n'est appliquée. Qualité de positionnement en deçà de 5 m.
- Niveau 2 (LoD 2) : des modèles de toits (paramétriques) et des textures (photoréalistes ou synthétiques) sont ajoutées. Qualité de positionnement de 1 m en planimétrie et 2 m en altimétrie.

- Niveau 3 (LoD 3) : au-delà d'une augmentation de la qualité de positionnement (50 cm dans toutes les directions), la différence avec le niveau 2 est la prise en compte des ouvertures

- Niveau 4 (LoD 4) : est identique au niveau 3 pour l'extérieur du bâtiment, mais permet la modélisation de l'intérieur des bâtiments (éléments constitutifs et ouvertures). Qualité de positionnement de 20 cm dans toutes les directions.

Nous proposons de supprimer le niveau 4 en tant que tel et d'envisager 3 niveaux de détails associés à l'intérieur du bâtiment. De la sorte, nous suivons la logique de notre ontologie en considérant des niveaux de détails identiques pour les portions d'enveloppes internes et d'enveloppes externes de l'objet bâtiment (figure 8).

- Le niveau de détail interne 1 : considère un ou des espaces-libres intérieurs généralisés de forme parallélépipédique. Les sous espaces-libres internes peuvent être généralisés en plusieurs sous espaces superposés non connectés afin de rendre compte d'une notion d'étage.
- Le niveau de détail interne 2 : les sous-espaces libres internes sont tous représentés suivant une certaine généralisation géométrique. Les ouvertures reliant les sous-espaces internes sont représentées.
- Le niveau interne 3 : Est identique au niveau 2 mais sans généralisation et avec les ouvertures sur l'extérieur. La

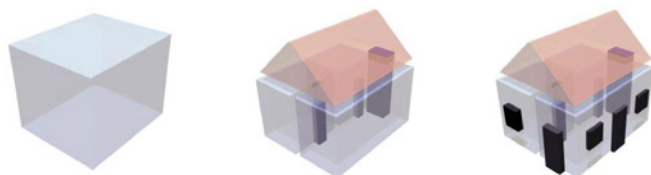


Figure 8. Proposition de niveaux de détails interne de l'objet bâtiment.



connexion entre l'intérieur d'un bâtiment et l'extérieur ne peut donc être envisagée qu'au niveau de détail 3, aussi bien interne qu'externe.

Cette proposition doit encore être étayée, mais c'est une bonne illustration d'une redéfinition de certains concepts au travers d'une ontologie spécifique.

Conclusions et Perspectives

Abordant une recherche sur la modélisation de l'espace urbain et le développement d'un système intégré de gestion de l'information 3D urbaine, nous avons voulu poser les bases ontologiques de notre démarche. Notre objectif est de pouvoir nous reposer sur ces bases pour développer un méta-modèle générique de l'information 3D urbaine nous permettant d'opérer des choix de modélisation réfléchis et justifiés. Dans cet article, nous avons d'abord insisté sur les différents types d'objets à considérer en vue d'obtenir de véritables SIG 3D urbains. Par la suite, nous avons exprimé les règles de base de notre ontologie clairement inspirée par nos connaissances en acquisition de données. Cette ontologie, au travers de notre méta-modèle, propose de définir un objet sur base d'une dualité fondamentale de l'univers, l'espace libre et l'espace occupé. Tout objet mesuré, l'étant en fait au travers de la mesure d'une portion de l'interface entre ces deux espaces. Ensuite, nous avons confronté notre méta-modèle au CityGML au travers d'un objet physique particulièrement important : le bâtiment. L'objectif est d'adopter tout ou partie de ce standard de l'information 3D urbaine après vérification de son adéquation avec notre ontologie. Une première analyse a déjà révélé certains ajustements possibles quant aux niveaux de détails à considérer. ●

Ce travail bénéficie du soutien de l'EducationalTrust du RICS (*Royal Institution of Chartered Surveyors*) au travers de l'action "Exploring needs and applicability of a 3D urban land register information system".

Contacts

Roland BILLEN - François LAPLANCHE

Unité de Géomatique, Université de Liège
rbillen@ulg.ac.be - F.Laplanche@ulg.ac.be

Siyka ZLATANOVA

Section GIS Technology, OTB, Delft University of Technology
s.zlatanova@tudelft.nl

Ludvig EMGARD

Section GIS Technology, OTB, Delft University of Technology
ludvig.emgard@sweco.se - K.L.Emgard@tudelft.nl

Bibliographie

- Billen, R. (2000).** *Integration of 3D information in Urban GIS: a conceptual view.* ISPRS 2000, Amsterdam, Pays-Bas.
- Billen, R. and S. Zlatanova (2003).** "3D spatial relationships model: a useful concept for 3D cadastre?" *Computers, Environment, and Urban Systems* 27: 411-425.
- Döllner, J., K. Baumann, et al. (2006).** "Virtual 3D City Models as Foundation of Complex Urban Information Spaces." *CORP 2006 & Geomultimedia06*: 107-112.
- Ewald, K. and V. Coors (2005).** Appraisal of standards for 3D City Models. Ninth International Conference on Information Visualisation (IV'05), Washington, DC, IEEE Computer Society
- Fonseca, F., M. Egenhofer, et al. (2000).** "Ontologies and Knowledge Sharing in Urban GIS." *Computers, Environment and Urban Systems* 24(3): 232-251.
- Frank, A. (1997).** "Spatial Ontology: A Geographical Point of View." *Spatial and Temporal Reasoning*: 135-153.
- Gröger, G., T. Kolbe, et al. (2007).** Candidate OpenGIS® CityGML Implementation Specification, Open GIS Consortium: 180.
- Kolbe, T. and G. Gröger (2003).** *Towards unified 3D city models.* ISPRS Comm. IV Joint Workshop on Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualization II, Stuttgart.
- Kolbe, T., G. Gröger, et al. (2005).** *CityGML - Interoperable Access to 3D City Models.* Int. Symposium on Geo-information for Disaster Management Delft, Springer Verlag.
- Laplanche, F. (2006).** *Environnement de conception de bases de données spatiales sur Internet.* Géographie, Université de Liège : 2002.
- OMG (2005).** Unified Modeling Language (UML) Specifications version 2.
- Smith, B. and D. Mark (1998).** *Ontology and Geographic Kinds.* 8th SDH 1998 (International Symposium on Spatial Data Handling), Vancouver.
- Vangenot, C., Ed. (2004).** *Les ontologies spatiales.* Revue internationale de Géomatique. Paris.
- Zlatanova, S. (2000).** 3D GIS for Urban Development. Technical Sciences. Graz-Austria, Graz University of technology: 222.
- Zlatanova, S. and D. Prosperi (2005).** *Large-scale 3D Data Integration: Challenges and Opportunities,* Taylor & Francis.

ABSTRACT

Key words : 3D SDI, CityGML, spatial ontology, 3D urban model, 3D city model, 3D GIS, Building

The need of 3D urban spatial data infrastructures (3D SDI) is now almost commonly accepted. However, their implementation suffers from a lack of standardisation. This is usually due to an underestimation of the initial conceptual step, where modelling options should be clearly stated. In this article, we present a modelling ontological approach inspired by our experience in spatial data acquisition techniques. In this ontology, one considers that the universe is composed of free space and occupied space and that their interface is the only measurable feature. On that basis, we present a generic 3D urban spatial information meta-model. This meta-model is compared to the City GML standard through the study of the building object. Expect from some level-of-detail issues, both models are compatible.

Création, administration et utilisation d'un modèle urbain numérique en 3D

■ Gerald FORKERT

■ MOTS-CLÉS

Modèle 3D urbain, niveau de Détail, aménagement urbain, visualisation 3D, intégration SIG

La mise en place de projet pour la modélisation tridimensionnelle urbaine est devenue une réalité depuis quelques années notamment en Allemagne et en Autriche. Certaines sociétés travaillant

dans ce domaine spécifique se sont même créées pour fournir des services d'assistance et développer des logiciels spécifiques.

Les outils adéquats devront répondre aux principes suivants :

- Dans son utilisation primaire, le modèle 3D urbain va servir de support lors de missions de planification urbaine et notamment à accroître la qualité des rendus des résultats de la planification.
- Un système logiciel spécifique doit pouvoir être utilisé par les services municipaux pour aider à la création du modèle en 3D. Des fonctionnalités de mise à jour, de gestion et de manipulation doivent également être disponibles.
- Pour jouer un rôle lors des processus de planification urbaine, le modèle 3D doit être compatible avec le Système d'Information Géographique (SIG) existant. Le système doit donc pouvoir être intégré dans le système de gestion des données topographiques existantes sous forme d'une extension tridimensionnelle.
- Les données topographiques existantes étant essentiellement linéaires, le modèle urbain doit reposer sur des mêmes lignes structurelles 3D. A partir de là, des modèles de surfaces pourront en être dérivés grâce à des algorithmes de triangulation intelligents.
- L'administration de la base de données du modèle 3D doit être assistée, notamment pour en assurer la mise à jour.
- L'utilisation du modèle 3D doit se faire, le plus largement possible, dans le cadre des processus de travail existants.

CityGRID est, par exemple, un système logiciel appartenant à cette catégorie. Cet article présente les concepts, les outils et certains exemples de réalisation de modèles 3D notamment dans les grandes villes autrichiennes.

Création du modèle urbain en 3D

La modélisation des bâtiments est réalisée à partir de ses lignes de structures. La représentation sous forme de surfaces est automatiquement dérivée de la structure linéaire. Si la structure linéaire de base n'est pas assez détaillée pour permettre d'en dériver un modèle de surfaces suffisamment représentatif, la structure linéaire peut être complétée et améliorée au cours du processus de modélisation. Dans le cas d'éléments linéaires, restitués à partir d'une photogrammétrie à grande échelle ou d'un levé géodésique garantissant une bonne précision, il sera intéressant de pouvoir stocker la position planimétrique et l'altitude de ces lignes. La modélisation consiste alors, d'une part, en des améliorations topologiques, et, d'autre part, à compléter la structure linéaire en intégrant de nouvelles lignes qui ne sont pas directement mesurables.

■ Structure des lignes d'objet

La modélisation repose essentiellement sur les types de lignes d'objet suivants dont une illustration est présentée dans la figure 1 :

- Ligne d'avant-toit (ligne de bordure)
- Ligne d'avant-toit détaillée (ou ligne de bordure détaillée)
- Ligne de faîte
- Ligne de toiture en général
- Ligne de rupture supérieure
- Ligne de rupture inférieure
- Ligne d'avant-toit interne
- Bord supérieur de la façade
- Bord inférieur de la façade
- Ligne de découpe de la façade

■ Unités/Identifiants

Tous les objets appartenant à un même bâtiment d'un point de vue administratif (par exemple, parce qu'ils représentent une même unité foncière ou parce qu'ils ont une même adresse ou sont enregistrés comme même entité dans le SIG) sont affectés à un même "numéro identifiant". Cette notion d'identifiant est, en règle générale, transcrite à partir du SIG déjà existant, et constitue l'ensemble des clés pour l'interconnexion du modèle urbain avec les informations relatives aux bâtiments qui y sont gérées.



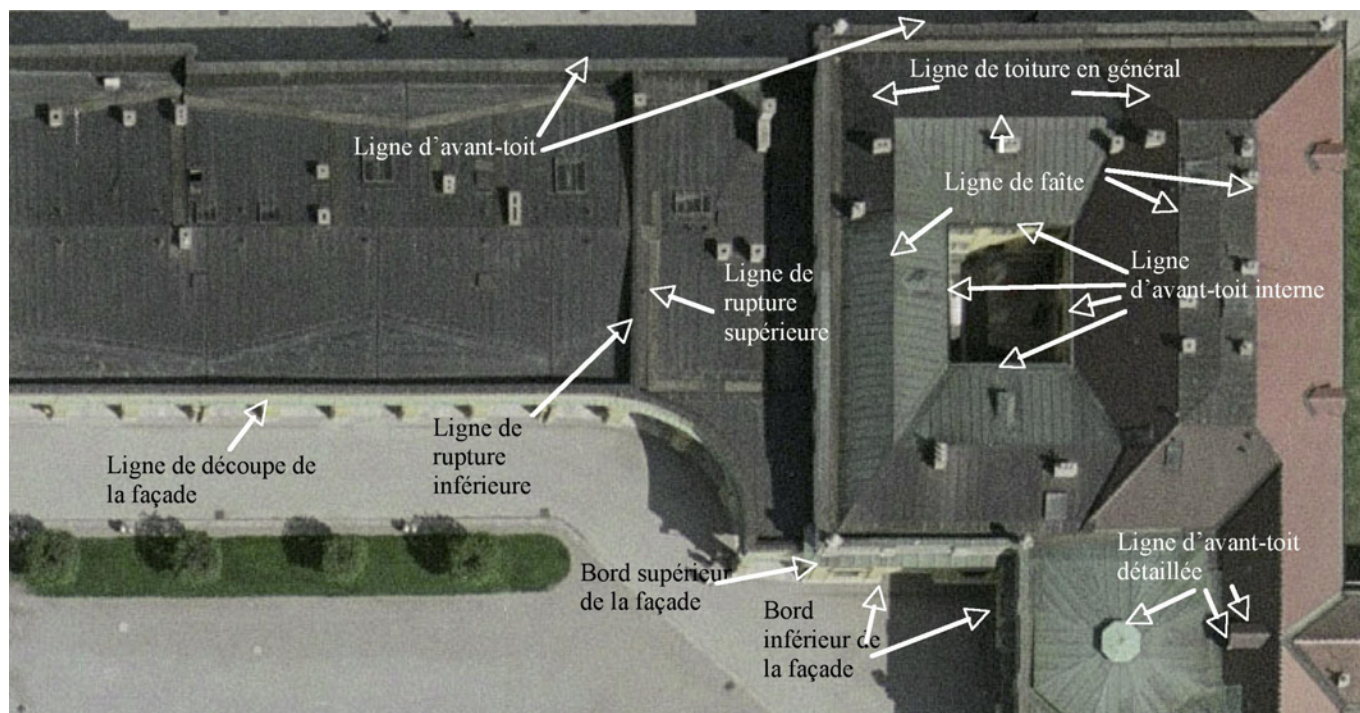


Figure 1. Les différents types de lignes de structure utilisés lors de la modélisation.



■ Structure des objets

Un bâtiment complexe ou un groupe de bâtiments devra être divisé en plusieurs "objets". Nous pouvons considérer comme "objet" toute construction autonome architecturalement parlant. Il faut ainsi définir une ligne d'avant-toit fermée, unique et propre à chaque "objet".

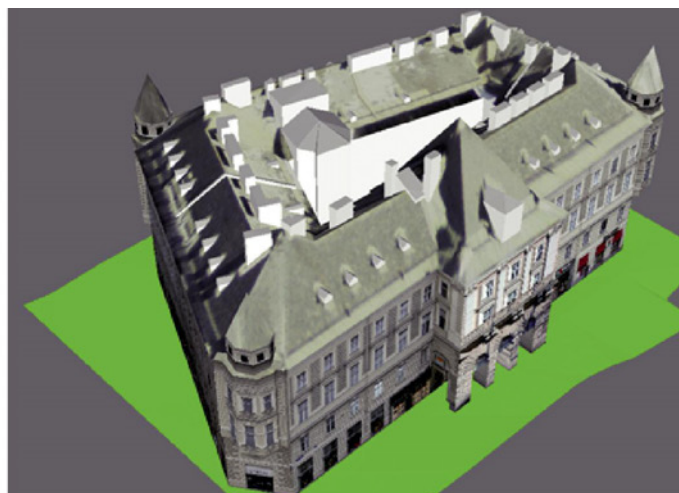
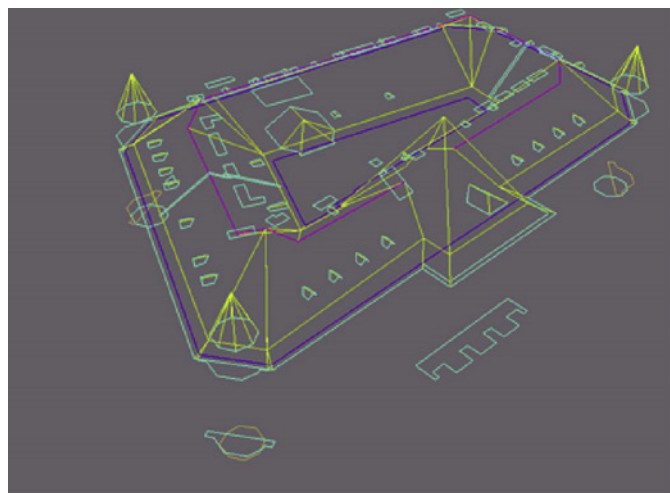
■ Éléments de détail

Pour une modélisation plus fine, les éléments débordant du toit, tels que lucarnes, cheminées, etc. doivent être structurés comme étant des "éléments de détail" d'un objet. Un "élément de détail" sera automatiquement extrudé sur le toit de l'"objet-père". Nous nous épargnons ainsi l'analyse explicite de lignes de rupture inférieures. Par ailleurs, la triangulation de l'"objet-père" en restera simple.

■ Modélisation

Après l'analyse, la modélisation est effectuée en plusieurs étapes avec le modèleur spécifique de l'outil. Dans les illustrations suivantes, nous retrouvons les lignes structurales stockées dans la base de données (figure 2a) et les modèles de surface dérivés (figure 2b) :

- Importation des lignes de toiture depuis l'analyse et triangulation automatique du modèle de surface.
- Correction semi-automatique d'erreurs éventuelles, modélisation du toit principal.
- Intégration des détails du toit.
- Modélisation des saillies de toit et des surélévations, des passages, des arcades, etc. Celle-ci peut être réalisée à l'aide de photographies de façades ou, pour une plus grande précision, à l'aide des levés terrestres existants.



Figures 2 : (a) modèle filaire des lignes de structure, (b) modèle de surface dérivé.

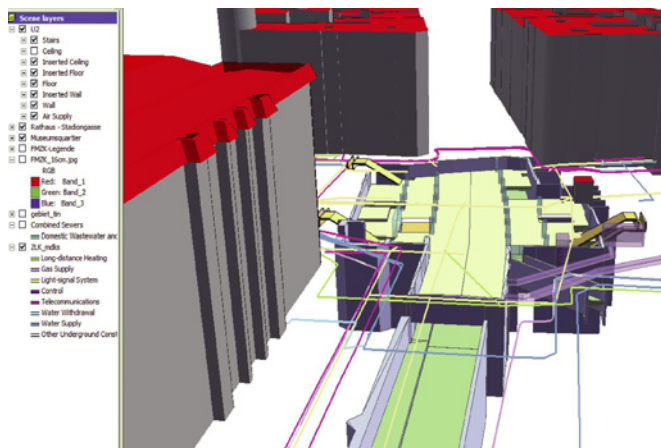


Figure 3 : Modèle tridimensionnel d'une station de métro généré avec le système CityGRID Modeler intégré dans le modèle urbain. Représentation du modèle sous ArcGIS.

- Intégration d'éléments de façades tels que des balcons.
- Texturation du toit et des façades.

■ *Modèle numérique de terrain*

En ce qui concerne le modèle numérique de terrain, la prise en compte des niveaux de détail suivants se sont avérés judicieux :

- Pour les modèles urbains qui ne seront observés que de très haut, donc seulement en survol virtuel, la création d'un simple modèle de terrain à partir de points géodésiques existants est suffisante. Le réseau de triangulation (TIN) interpolé devrait idéalement avoir un maillage de 25 m à 50 m. Un bon exemple de ce niveau de détail est le modèle de terrain de Google Earth.
- Pour les modèles urbains qui seront observés depuis une faible altitude, donc en vol rasant virtuel, la prise en compte supplémentaire des bords et ruptures du terrain près des talus, des murs de soutènement, des berges de rivières etc. est indispensable.
- Pour les modèles urbains qui seront observés depuis le sol, donc par un promeneur virtuel, toutes les dénivellations de terrain de plus de 0,3 m devraient être prises en compte et ce, sous forme de lignes de rupture supérieures et inférieures. De plus, il serait avantageux de prendre également en compte des limites inférieures de bâtiments ayant éventuellement déjà fait l'objet d'un levé. En option, on pourra aussi intégrer dans le modèle numérique de terrain les limites inférieures déterminées au cours de l'extrusion des façades.

■ *Ponts, installations souterraines*

Ponts et installations souterraines peuvent aussi être représentés selon le principe de la modélisation linéaire. Dans ces cas, les lignes structurales définissent les bords des différents éléments de construction. La création de tels modèles massifs tridimensionnels peut se faire très efficacement à l'aide de plans de construction (figure 3).

■ *Données laser 3D*

La photogrammétrie aérienne à grande échelle (cf. § Degrés de détail) est la technique la mieux appropriée pour l'analyse



Figure 4 : Représentation de la végétation sous forme de nuages de points LIDAR.

et la modélisation de bâtiments dans la zone infra-urbaine. La modélisation de bâtiments à partir des données laser aéroporté (aussi appelé "Light Detection And Ranging" ou "LIDAR") ne donne de bons résultats, selon l'état actuel de la technique, que pour des toits de grande surface et de structure simple et n'est donc recommandée que pour les zones appartenant à la périphérie des villes et pour les zones d'habitat en lotissement et jardins.

En revanche, les données de laser 3D, qu'elles proviennent du LIDAR ou de la lasergrammétrie terrestre, peuvent représenter un précieux complément du modèle 3D urbain. Les données laser saisies avec une densité de l'ordre de 4 points par m² ou plus, conviennent en effet parfaitement à la représentation visuelle rationnelle de la végétation. Ainsi, le système gère-t-il efficacement la représentation de très grandes quantités de points pour une visualisation en temps réel (plusieurs centaines de millions de points, en plus du modèle de bâtiments) (figure 4).

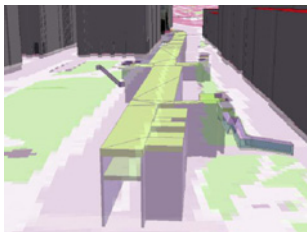
Administration du modèle urbain

Le modèle urbain en 3D est géré à l'aide d'une base de données. Chaque unité de bâtiment est stockée dans la base de données sous un identifiant univoque qui peut être prescrit par l'utilisateur. De cette manière, des modèles urbains avec plusieurs centaines de milliers de bâtiments peuvent être gérés efficacement. L'accès rapide et ciblé à un bâtiment particulier à l'aide de son identifiant ou de son adresse est une condition essentielle au maintien à jour du modèle 3D urbain. La modélisation linéaire est une autre condition préalable à la mise à jour simple, puisque les lignes structurales d'un bâtiment, qui sont stockées, peuvent être facilement projetées dans une image aérienne et être contrôlées.

■ *Degrés de détail*

La modélisation des bâtiments peut se faire avec différents niveaux de détail de représentation. En nous appuyant sur la classification en usage à l'échelle internationale, nous définissons les niveaux de détail ("Level of Detail" ou LoD) suivants :



LoD 1 Modèle bloc 	LoD 2 Modèle de forme de toiture 	LoD 3 Modèle texturisé 	Métro, ponts 
Sources de données : Photogrammétrie LIDAR	Photogrammétrie à grande échelle	Photos de façades et lasergrammétrie terrestre pour des bâtiments complexes	Plans de construction ou données de relevés topographiques
Utilisations : Protection contre les bruits, planification urbaine de grande ampleur	Planification urbaine de faible ampleur, développement de projet	Développement de projet, architecture, protection des monuments et sites classés	Sécurité interne, administration des réseaux d'alimentation



■ Versions successives

Afin de pouvoir suivre à tout moment les modifications effectuées au cours de la modélisation, chaque bâtiment peut être stocké avec un nombre indéfini de versions. De cette manière, il est également possible de représenter et simuler des bâtiments futurs, en phase de projet.

■ Interface avec le Système d'Information Géographique

Pour assurer une utilisation des modèles de bâtiments dans le SIG existant, une interface spécifique a été conçue. Elle permet d'extraire ou d'accéder à des informations de type SIG, à partir du modèle urbain 3D (figure 5).

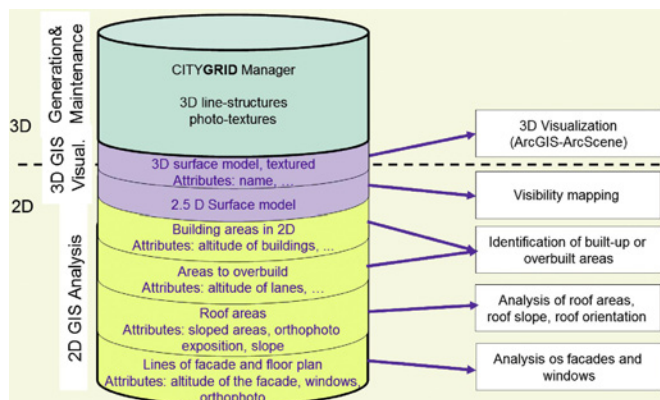


Figure 5 : Interface SIG.

Applications

Une bonne illustration des différents stades de traitements et des différentes possibilités d'applications est donnée par l'exemple du modèle 3D urbain de la ville de Vienne (Autriche). Le modèle de base a les caractéristiques détaillées dans le tableau 1.

Dimensions du modèle : 30.000 bâtiments de LoD 2 avec tous les détails de toitures, 200.000 bâtiments de LoD 1, 35 km d'installations souterraines du métropolitain. Génération du modèle depuis 2003 par le Service Géodésique de la ville de Vienne à l'aide de CityGRID Modeler.

Administration des données : Intégration dans une base Oracle

Mise à jour : La mise à jour se fait en continu, en liaison avec celle des autres données topographiques de la ville. Tous les 3 ans, toutes les données en 2D et 3D d'une feuille cadastrale sont intégralement contrôlées et mises à jour dans le cadre d'une révision.

Charges de personnel : En moyenne, 2 à 3 personnes sont chargées de la création et de la mise à jour du modèle, y compris de l'analyse photogrammétrique.

Utilisation : En l'espace de 3 ans, chaque modèle des bâtiments est en moyenne transmis six fois à un autre département ou à des utilisateurs privés.

Environnement SIG : ESRI

Source : Département de Géomatique et Service Géodésique de la ville de Vienne.

Illustration :

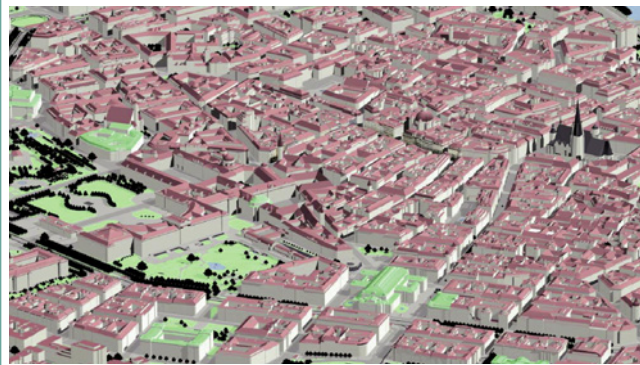


Tableau 1. Caractéristiques du modèle 3D urbain de la ville de Vienne (Autriche).

Utilisation du modèle urbain

La partie suivante reprend quelques utilisations concrètes du modèle 3D urbain dans le cadre de la gestion de la ville de Vienne et de ses environs.

■ Etude de visibilité

Le tableau 2 présente le cas de l'utilisation du modèle 3D urbain dans le cadre d'une étude de visibilité. Lors des phases initiales d'un projet, il convient souvent d'examiner et de définir quelles sont les hauteurs de constructions maximales pouvant être tolérées par rapport à la physionomie urbaine existante. Les modèles 3D sont alors souvent très utiles.

Données disponibles : Modèle urbain en 3D dans l'environnement du projet, à un niveau de détail de représentation LoD 2 ou supérieur.

Préparation liée au projet : Du modèle urbain en 3D est dérivé un modèle de surface matriciel dense qui est ensuite utilisé avec des outils pour la cartographie de visibilité des SIG standards. A cet effet, les nouveaux projets de construction en hauteur sont introduits sous la forme de leur projection horizontale accompagnée de la hauteur de construction. Le terrain est ensuite relevé à hauteur des yeux. La cartographie de visibilité automatique fournit finalement tous les pixels, marqués en couleur, à partir desquels le projet prévu serait visible.

Solution du problème : La hauteur de construction du projet prévu peut être relevée dans le cadre d'une simulation pas à pas, tant qu'aucune dégradation des zones sensibles de la ville n'est décelée. Ces zones sensibles sont, par exemple, les axes de perspective – significatifs du point de vue urbanistique – le long des rues importantes et les sites qui ont de tout temps déjà permis d'offrir une vue attrayante sur la ville ou sur des édifices importants.

Source : Service de l'Urbanisme de la ville de Vienne.

Illustration : Etude de visibilité pour le projet de tour "Kometgründe" à Vienne.

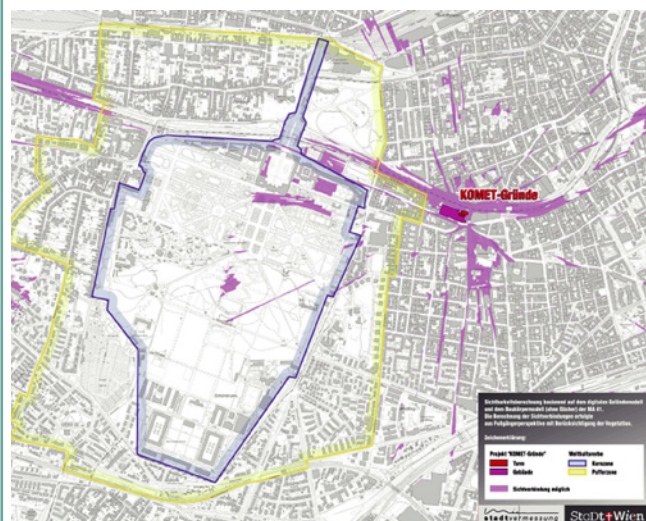


Tableau 2. Etude de visibilité.

■ Modèle d'environnement pour l'élaboration d'un "masterplan"

Dans le cas où la construction de nouveaux édifices est planifiée à l'échelle d'un quartier entier, il faut, et ce dès le début du processus de planification, prédéfinir la structure des voies de circulation et les volumes disponibles pour la construction des édifices. Ce "masterplan" doit toutefois être soigneusement adapté à l'environnement existant. Le tableau 3 montre les caractéristiques d'une telle analyse.

Données disponibles : Modèle 3D urbain dans l'environnement du projet, à un niveau de détail de représentation LoD 1 ou supérieur.

Préparation liée au projet : Tout autour du nouveau quartier, la zone de projet, qui comprend aussi les bâtiments existants avoisinants, est redéfinie. Les modèles des bâtiments de cette zone de projet sont alors prélevés du modèle 3D urbain et ils sont stockés localement. Le cas échéant, des bâtiments subsistant sur la partie à construire devront être "démolis" par voie numérique. Dans un environnement logiciel de type DAO, les volumes maximums constructibles, conformément à la nouvelle affectation du sol, peuvent maintenant être construits sous forme de ce qu'on appelle des "corps de bâtiment d'affectation".

Solution du problème : En général, le masterplan est créé dans le cadre d'un long processus de discussion, au cours duquel plusieurs variantes d'affectation sont mises au point, visualisées en trois dimensions et évaluées en liaison avec les quartiers environnants.

Il est fréquent que les investisseurs déterminants soient aussi déjà intégrés dans ce processus de discussion afin de parvenir à un compromis optimal entre leurs intérêts économiques et la protection de la physionomie de la ville.

Source : Service de l'Urbanisme de la ville de Vienne.

Exemple : Masterplan de la gare centrale de Vienne



Tableau 3. Elaboration d'un "masterplan" pour le développement urbain.

► ■ Base de décision pour le développement du projet

Au cours du développement du projet, des investisseurs privés entrent en négociation avec le service de l'urbanisme de la ville pour obtenir des conditions de construction qui soient les plus avantageuses possibles (donc les plus permissives possibles) pour une parcelle de constructibilité bien définie. Dans le cas de gros projets d'investissement, susceptibles d'avoir aussi des incidences économiques positives sur la ville, le service de l'urbanisme est confronté au problème consistant à trouver un compromis avec la structure urbanistique environnante, ce compromis devant être le plus optimal possible (tableau 4).

Données disponibles : Modèle 3D urbain dans l'environnement du projet, à un niveau de détail de représentation LoD 2 ou supérieur ; le cas échéant, données LIDAR pour la représentation de la végétation et du plan d'avant-projet sommaire.

Préparation liée au projet : Les modèles 3D des bâtiments de la zone de projet ainsi que l'extrait de plan correspondant sont stockés localement à partir des données LIDAR. Dans un environnement logiciel de type DAO, le corps des bâtiments projetés est alors bâti étage par étage sous forme de "modèles en couches", à l'aide des plans d'avant-projet. A l'aide d'un modèle de surface matriciel dérivé du modèle urbain en 3D, il est possible d'obtenir, par filtrage des données LIDAR, les nuages de points qui représentent la végétation. A partir du modèle numérique de terrain, des bâtiments environnants, du modèle de projet et des nuages de points extraits par filtrage, il est finalement possible de créer une simulation 3D interactive et "navigable".

Solution du problème : Le projet envisagé par l'investisseur peut être représenté avec les bâtiments existants et avec la végétation, et peut être observé sous tous les angles de manière interactive. De cette façon, les incidences possibles du projet peuvent être évaluées par des décideurs politiques, ce qui n'est généralement pas possible au moyen des seuls plans de projet. L'investisseur peut déjà entrer en négociation avec les décideurs politiques à un stade précoce du développement du projet, avant que des coûts élevés ne soient occasionnés pour la planification.

Source : Service de l'urbanisme de la ville de Klosterneuburg.

Exemple : Hospice de Weidling, comparaison situation actuelle / future.

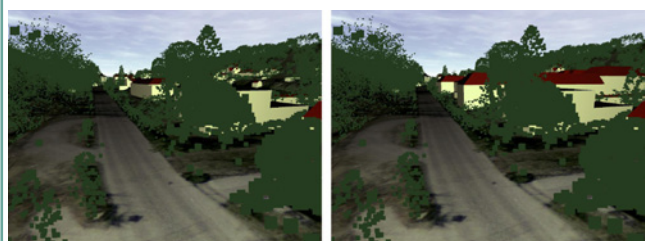


Tableau 4. Simulation dans le cadre des négociations de projet.

■ Modèle de base en 3D pour les concours d'architectes

Dès que les prescriptions de constructions (qui sont souvent le résultat des processus décrits dans les étapes précédentes) ainsi que la planification du projet de construction sont définies, il s'agit très souvent de trouver la variante la plus optimale dans le cadre d'un concours d'architectes. Pour cela, il faut mettre des informations sur l'environnement architectural existant à la disposition des architectes participant à ce concours. Le tableau 5 décrit ce processus.

Données disponibles : Modèle 3D urbain des bâtiments existants ("modèle de l'existant", ou "modèle d'environnement", éventuellement déjà créé dans le cadre des étapes précédentes) à un niveau de détail LoD 2 ou LoD 3.

Préparation liée au projet : Le modèle 3D de l'existant est converti en différents formats DAO (AutoCAD, Microstation, 3d Studio ou systèmes logiciels équivalents) et mis à la disposition des architectes participant au concours. En option, l'adjudicateur peut, pour l'évaluation des résultats du concours, faire représenter les projets soumis sous forme de modèles d'architecture 3D et intégrer ceux-ci dans une simulation 3D du projet (comme décrit précédemment).

Solution du problème : Grâce au modèle de l'existant mis à disposition, les architectes participant au concours peuvent mieux tenir compte de la structure architecturale à conserver, ce qui a généralement pour effet d'augmenter la qualité des résultats fournis. L'adjudicateur a en outre la possibilité d'évaluer les projets soumis dans un cadre homogène.

Source : Land Niederösterreich.

Exemple : Gugging (près de Vienne en Autriche).



Tableau 5. Fourniture de modèle 3D.

■ Simulation 3D pour l'information des citoyens

Dans le cas de gros projets en zone urbaine (tableau 6), les citoyens ont souvent de vives objections. Les riverains, qui ont qualité de parties dans le cadre de la procédure administrative en vue de l'autorisation de l'ouvrage, peuvent retarder sensiblement le projet avec leurs protestations. L'expérience montre notamment que lorsque les riverains craignent une dégradation de la perception visuelle habituelle, il faut s'attendre à des résistances de leur part. Dans de tels cas, une simulation facilement compréhensible du projet est donc indispensable.

Données disponibles : Modèle urbain en 3D des bâtiments existants ("modèle de l'existant", ou "modèle d'environnement", éventuellement déjà créé dans le cadre des exemples précédents) ainsi que modèle du projet à un niveau de qualité LoD 2 ou LoD 3.

Préparation liée au projet : Pour la présentation aux riverains, un modèle texturé à un niveau de qualité LoD 3 est impératif. Si le modèle 3D urbain n'est disponible qu'en qualité LoD 2, il faut encore procéder à une texturation des façades et toitures dans la zone du projet.

Le projet lui-même peut également être facilement préparé sous forme de modèle LoD 3 sur la base de la planification détaillée déjà disponible. Si la zone de projet possède une végétation significative, cette dernière peut être saisie très efficacement par lasergrammétrie terrestre. Si besoin, il est possible aussi de créer une simulation de la projection d'ombre produite par le nouveau projet.

Solution du problème : La présentation interactive du projet prévu dans le cadre de l'environnement existant est généralement ressentie de façon très crédible par les citoyens concernés. D'une part, parce que le modèle de l'existant a été généré à partir de données topographiques, d'autre part, parce que le citoyen peut décider lui-même à partir de quel endroit il souhaite observer le projet prévu, et enfin parce qu'il peut déterminer les distances et les différences de niveau de manière simple à l'aide de fonctions de mesures numériques. L'objectif est particulièrement bien atteint si les exploitants du projet essaient d'abord eux-mêmes, à l'aide de la simulation 3D, d'identifier les riverains qui pourraient être visuellement gênés par le projet et de la part desquels il faut s'attendre à des réticences. Il est alors possible de commencer préalablement à négocier des mesures de compensation, ou autres, avec ces riverains. De cette manière, il est possible d'éviter des retards imprévus de la mise en chantier.

Source : Département de Géomatique de la ville de Klagenfurt.

Exemple : Centre commercial ECE à Klagenfurt / Autriche.



Tableau 6. Comparaison des situations actuelles / futures dans le cadre d'un projet d'aménagement.

Conclusion : perspectives d'utilisation du modèle 3D urbain

Le développement urbain et la planification urbaine requièrent actuellement des exigences très élevées en matière de représentation tridimensionnelle, en termes de détails, d'une part, et de disponibilité à grande échelle du modèle 3D urbain, d'autre part. C'est la raison pour laquelle les projets actuels de développement urbain constituent la plupart du temps l'occasion concrète de commencer l'élaboration d'un modèle 3D urbain détaillé.

Le système logiciel *CityGRID* a pour but de rendre ce modèle urbain également exploitable pour d'autres applications, afin de créer les effets de synergie les plus importants possibles pour la planification urbaine, par exemple.

Le modèle 3D urbain pourra alors être également exploité pour les exemples d'applications supplémentaires suivantes :

- Dérivation d'un modèle de base avec un niveau de détail LoD 1 pour la simulation des bruits à grande échelle.
- Détermination de la position des fenêtres à l'aide de la texture des façades pour la simulation des bruits à petite échelle.
- Visualisation de murs antibruit projetés pour l'information des riverains dans les zones sensibles.
- Optimisation de l'aménagement d'espaces verts en zone urbaine par une simulation 3D de variantes de plantation.
- Meilleure planification de nouveaux tracés de canalisations souterraines à proximité du réseau métropolitain.
- Simulation numérique de mesures d'évacuation dans le réseau métropolitain.
- Documentation de l'existant pour la protection des monuments et sites classés.
- Base d'étude de projet pour les aménagements de combles.
- Représentation en 3D de la ville dans Google Earth, dans le cadre du marketing urbain. ●

Contact

Gerald FORKERT

forkert@geodata.at

www.citygrid.at

ABSTRACT

Key words : 3D city models, LoD, urban planning, 3D visualization, GIS integration

CityGrid is a modular system for creating 3-D city models. It is designed to enable creation of photorealistic geo-referenced digital reproductions of cities. Buildings, streets, vegetation and terrain are represented as a model. The concepts for rapid creation of 3-D city models from roof structure lines are discussed. Different Levels of Details (LoD) are proposed. Tools and applications for urban planning with 3D data are described.

SIG et 3D au service des collectivités territoriales : l'expérience de la Ville du Havre

■ Olivier BANASZAK - Mathieu KOEHL

MOTS-CLÉS

modélisation 3D, projet, ville, aide à la décision, communication

L'évolution des technologies SIG confirme ce qui pouvait être pressenti depuis une dizaine d'années : les données géographiques dans les SIG sont appelées à mieux prendre en compte la troisième dimension. Dans un proche avenir, l'approche géographique de notre monde qui est véhiculée par des outils comme Google Earth ou le Géoportail 3D deviendra courante et s'adressera au plus grand nombre, contribuant ainsi au développement d'une culture géographique plus intuitive.

Devant le succès et l'engouement dont bénéficient actuellement les technologies 3D et leurs diverses applications, il paraît aujourd'hui intéressant de faire un état des lieux. Quel exemple plus diversifié pour cela que le champ des collectivités territoriales et de leurs multiples compétences.

Le service Système d'Information Géographique Urbain (S.I.G.U.) de la Ville du Havre a commencé à modéliser la Ville en trois dimensions dès l'an 2000. L'intérêt de cette démarche et des possibilités qu'elle offre ont pu largement être vérifiés, notamment pour ce qui concerne la concertation publique et l'accompagnement de projets.

L'activité s'est alors développée. Une maquette virtuelle complète de la Ville a pu être constituée et continue maintenant à s'enrichir. Son exploitation a permis au service S.I.G.U. d'acquérir une solide expérience, dont on trouvera dans la suite de cet article l'illustration et quelques résultats.

Quelles données 3D pour les SIG ?

■ Le contexte

La gestion de données tridimensionnelles ne constitue pas en soi une réelle nouveauté dans le domaine des SIG.

En effet, la diversité des cultures techniques des éditeurs de logiciels SIG a permis l'émergence de produits intégrant la 3D volumique dès le milieu des années 90. Toutefois, ces anciens outils exigeaient alors des configurations informatiques très spécifiques et coûteuses qui restreignaient leur usage à quelques spécialistes.

Le progrès technologique en informatique a permis le développement de l'utilisation des techniques de simulation en 3D grâce à l'effet moteur que constitue le développement des jeux vidéo. Aujourd'hui, les cartes graphiques accélératrices 3D font partie des composants de base de tout ordinateur, ce qui ouvre la porte à de nouvelles possibilités.

Parallèlement, l'essor de l'utilisation d'Internet et de l'implantation du haut débit permet aux PC familiaux de pouvoir accéder à des volumes et flux de données plus importants dans de bonnes conditions de performance.

Cet accroissement du niveau de performance des ordinateurs permet aussi de pouvoir bénéficier de stations de calcul 3D

très puissantes pour un coût d'équipement raisonnable, ce qui accroît l'accessibilité à ces outils sur un plan financier.

Il n'en demeure pas moins que la mise en œuvre d'une maquette numérique en trois dimensions d'un territoire requiert une forte technicité. Il s'agit de développer une grande polyvalence car de nombreuses technologies sont mises en œuvre dans les processus de constitution et d'exploitation de cette maquette.

■ Les formats et les outils

Une grande diversité

La longue période de gestation et de développement des technologies 3D a donné naissance à de nombreux logiciels qui se sont imposés chacun pour des utilisations spécifiques. Au fil de leur évolution, les domaines d'application de ces outils en sont venus à se recouvrir partiellement.

Les données sont la plupart du temps étroitement liées aux outils qui les exploitent, elles en sont même parfois indissociables. Ceci est d'autant plus vérifié dans un environnement industriel fortement concurrentiel, car en pleine expansion. Aussi plusieurs formats de données se sont imposés au fil du temps et constituent de fait des "standards". Ces formats sont dans leur majorité liés à des logiciels particuliers, mais il

existe des formats libres qui résultent plutôt de démarches de conception collectives telles que le format X3D du consortium Web3D. Ce format est le successeur désigné du format VRML (Virtual Reality Mark-up Language – langage de balises pour la réalité virtuelle) qui est plus connu puisqu’il constitue une norme ISO.

Les logiciels de modélisation 3D sont multiples. Pour n’en citer que quelques-uns, nous avons : Blender, Lightwave 3D, 3D StudioMax, Alias, SketchUp, Rhino 3D, etc.

Les logiciels de CAO/DAO tels que AutoCAD et Microstation offrent la possibilité de réaliser des plans de conception technique en trois dimensions et intègrent donc tout naturellement un modèleur 3D.

Enfin, les principaux logiciels SIG actuels permettent le chargement et l’exploitation de données en 3D, à des degrés variés. Certains disposent même d’un éditeur graphique de données en 3D ou encore gèrent nativement les données 3D volumiques.

Les choix de la Ville du Havre

Les services techniques de la Ville conçoivent leurs projets d’aménagements au moyen du logiciel AutoCad. Les projets peuvent donc être conçus, dès l’origine, en trois dimensions, ce qui en permet une intégration directe dans la maquette en 3D qui est construite avec le même logiciel.

Le SIG de la Ville est lui basé sur la plateforme ArcGIS de l’éditeur ESRI Inc. Pour réaliser l’exploitation la plus aboutie, en termes de rendu des données 3D, le service S.I.G.U. utilise le logiciel 3D StudioMax qui présente l’avantage d’une grande compatibilité avec AutoCad (même éditeur).

■ Les modèles de données

La forme que revêt la modélisation des données en trois dimensions a une grande importance car elle conditionne les exploitations que l’on va pouvoir en faire. Il existe plusieurs procédés de modélisation géométrique d’objets 3-D :

- Les premiers procédés utilisent des procédés analytiques qui reposent sur des résolutions de surfaces ou des modèles standards de volumes.
- Les seconds procédés, dits procédés d’approximation, reposent sur des méthodes d’interpolation, d’approximation par éléments finis, etc.

Dans un système de traitement de données graphiques, orienté vecteur, nous trouvons principalement des lignes, des surfaces et des volumes.

Il s’agit là, en fait, des trois types de modèles les plus importants utilisés dans le domaine du DAO.

La modélisation géométrique dans un Système d’Information Topographique utilise principalement le mode de représentation BR (Boundary Representation, représentation par frontières).

Cette représentation permet de travailler avec les éléments géométriques directement saisis lors de l’acquisition des données, à savoir, les points et les contours formant des surfaces. Des extensions sont possibles en utilisant des primitives 3-D déjà existantes (comme les cylindres, les troncs de cônes, les portions de sphères) ou en construisant des primitives à l’aide des outils de DAO.

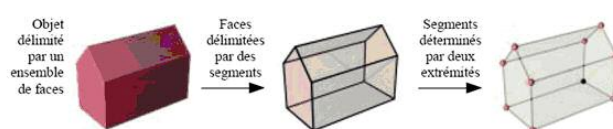


Figure 1. Décomposition en BR.

Le modèle BR est l’extension indispensable du modèle “fil de fer” qui permet de gérer sans ambiguïté n’importe quel type d’objet (ponctuel, linéaire, surfacique et même volumique pour certains modèles suffisamment élaborés). Dans le cas du BR simple, les objets sont définis par un ensemble de faces. Chaque face est ensuite définie par un ensemble de segments, et enfin, chaque segment dispose de deux extrémités (Figure 1).

Des volumes peuvent être introduits au moyen d’un BR qui intègre l’orientation des faces (l’orientation permet de savoir de quel côté de la face se situe le volume). Grâce à un BR simple, on ne peut connaître que les frontières de l’objet sans avoir d’idée sur ses propriétés volumiques.

Il convient également de signaler que les faces délimitées par un ensemble de segments doivent être planes. Si l’on se restreint à des faces triangulaires, la vérification de la planéité des faces n’est plus à faire. Les modèleurs qui autorisent la définition de faces par un ensemble de segments (ou ce qui revient au même, par une suite de points) mettent en garde au sujet des faces non planes.

Souvent, pour être affichées, ces faces sont triangulées grâce à une méthode automatique qui, lorsque la face n’est vraiment pas plane, ne donnera pas toujours le résultat attendu par l’utilisateur.

Cependant, les faces “quasiment” planes seront acceptées puisque les arrondis sur les données ne permettent pas d’avoir des faces absolument planes.

Cette modélisation par frontières est celle qui se rapproche le plus des primitives vecteur utilisés par les systèmes bidimensionnels.

La décomposition des objets en simplexes peut donc être considérée comme un BR simplifié où les seules faces autorisées sont les triangles.

Un n-simplex est l’entité la plus simple de dimension n. Le 0-simplex est un point, le 1-simplex est un segment, le 2-simplex un triangle, le 3-simplex un tétraèdre, etc.

Chaque n-simplex est délimité par n+1 (n-1)-simplexes (par exemple, un triangle est délimité par 3 segments).

Avec une telle restriction, toutes les faces sont absolument planes puisque chaque face est un triangle (aucune vérification de planéité n’est à effectuer car un triangle est toujours plan).

Les objets regroupant plusieurs n-simplexes (n non obligatoirement unique) forment des complexes simpliciaux. Ce sont ces complexes qui peuvent définir des objets plus significatifs. Cependant, les complexes simpliciaux doivent répondre à deux conditions :

- Quel que soit le n-simplex appartenant au complexe simplicial, tous les m-simplex ($m \leq n$) qui entrent dans sa composition doivent appartenir au complexe.

- Quels que soient S_1 et S_2 , deux simplexes du complexe simplicial, alors l'intersection de S_1 et de S_2 est soit vide, soit égale à un simplex commun à ces deux simplexes (et donc appartenant à ce même complexe).

Cette dernière condition apporte une certaine cohérence aux données, et en quelque sorte une topologie (les relations de construction sont topologiques puisqu'invariantes par homéomorphisme). En effet, deux segments, lorsqu'ils s'intersectent ailleurs qu'en leurs extrémités, donnent naissance à un point et chacun de ces deux segments se divise en deux. C'est ce que l'on appelle des données "topologiquement" cohérentes.

Tous les modèles présentés ne se comportent pas de la même manière devant les différentes applications qui requièrent une représentation d'objets en trois dimensions. Certains pourront convenir parfaitement à des applications de la mécanique alors qu'ils seront totalement inadaptés au monde géographique. Chaque application a ses propres spécificités, et c'est principalement pour cette raison qu'il existe plusieurs types de modélisations.

■ Typologie des données 3D dans les SIG

Les données 3D dans les SIG existent sous différentes formes qui dépendent de leur mode d'acquisition et de l'objet qu'elles modélisent.

Le sol

L'objet qui modélise le relief et la surface terrestre s'appelle le Modèle Numérique de Terrain (MNT). Ce MNT se rencontre sous diverses formes : image (grille d'altitudes) ou vectorielles (semis de points régulier, courbes de niveaux, réseau de triangles irréguliers, etc.).

L'exploitation de ce MNT à des fins de connaissance du territoire conduit à "draper" sur le MNT une orthophotographie, permettant ainsi de visualiser le relief complété par des informations contenues dans des images.

Le sursol

Entrent dans cette catégorie tous les objets dépassant du sol de façon significative, principalement les bâtiments et la végétation.

Les bâtiments sont modélisés avec leur toiture. Pour améliorer le niveau de réalisme des bâtiments, les façades et les toits sont texturés. Pour ce faire, on applique soit des textures génériques (couleurs proches de la couleur dominante du bâtiment), soit des images correspondant à une photographie numérique de la façade. La photographie aérienne apporte des informations et des données permettant de texturer les toitures.

La végétation peut-elle être modélisée sous deux formes ? Dans le cas d'un bois, par exemple, on pourra extraire du MNE (Modèle Numérique d'Élévation incluant le sursol) le volume correspondant à ce bois. Un rendu suffisamment réaliste sera obtenu par drapage de la photographie aérienne. Pour les alignements d'arbres ou les arbres isolés, par contre, la connaissance de la localisation et de la hauteur de chaque arbre permettra de le représenter individuellement en trois

dimensions. Le fait de connaître également l'essence de l'arbre autorise l'appel à des modèles d'arbres prédéfinis, disponibles dans des bibliothèques d'objets spécifiques.

Les thématiques

Il s'agit potentiellement de tous les objets de notre environnement quotidien. Dans le cadre des collectivités territoriales, ce sont les éléments entrant dans la gestion des espaces publics qui sont les plus intéressants.

Si ces éléments sont généralement présents dans les bases de données géographiques des Systèmes d'Information Territoriaux, la plupart ne sont modélisés qu'en 2D. Il est donc nécessaire de les modéliser en 3D, notamment en les projetant sur le MNT ou le MNE, ce qui peut être automatisé grâce aux logiciels SIG.

Le mobilier urbain, le jalonnement et la signalisation verticale, les candélabres sont autant de données thématiques pouvant être modélisées en 3D. L'univers 3D de la maquette virtuelle peut ainsi être enrichi en lui conférant un niveau de détail, donc de réalisme, plus élevé.

Le sous-sol

L'amélioration de la connaissance du sous-sol, dans sa composition mais aussi et surtout par les nombreux réseaux tridimensionnels qui y sont enfouis (eau, assainissement, chauffage, électricité, gaz, téléphone et fibres, câbles, etc.) ou qui le sillonnent (cavités et galeries souterraines, cours d'eau, etc.) représente un enjeu très important. Elle constitue également une pierre d'achoppement car l'acquisition des données sur le sous-sol est encore délicate et coûteuse.

Acquisition des données : quelles techniques ?

■ La photogrammétrie : une technologie qui a fait ses preuves

Quel type de restitution ?

Le choix des spécifications concernant la restitution photogramétrique et la prise de vue aérienne requise pour la restitution dépend de la précision et du niveau de détail que l'on souhaite mettre en œuvre dans la modélisation en 3D de son territoire.

Il faut garder à l'esprit que plus le niveau de détail est élevé, plus le volume des données à gérer sera important. Ceci pourra avoir de grandes incidences sur la capacité à exploiter la maquette de façon suffisamment performante. En outre, le travail de mise à jour de la maquette peut s'avérer long et coûteux si la précision est trop élevée et nécessite, par exemple, des relevés topographiques complémentaires.

Dans le cas des maquettes 3D, la restitution photogramétrique sert de relevé de base. Les bâtiments sont acquis à partir de leurs toits dont les contours sont projetés sur les surfaces sous-jacentes (MNT ou éléments de toits inférieurs). Le modèle résultant est un modèle de surfaces. Chaque bâtiment est décomposé en faces indépendantes. Les façades de

bâtiments résultant de cette modélisation sont décomposées en faces simples ; une façade peut, de ce fait, être décomposée en plusieurs faces :

- Cette modélisation a l'avantage d'utiliser une restitution fidèle des éléments en suivant le Z et de pouvoir générer des faces automatiquement par projection.
- Cette modélisation a l'inconvénient de décomposer un bâtiment en plusieurs entités lors de la projection.

Les toits relevés sont ainsi classés en 3 types :

- Toit terrasse – plat
- Toit multipan
- Élément sur Toit

Chaque type est restitué sous forme de contours ou de segments. Ainsi, distinguons-nous parmi les premiers éléments des "contours de toits terrasses – plats", des contours de "trous de toits terrasses – plats", des "contours d'éléments sur toits", des "contours de toits multipans", des "contours de chien-assis" et autres lucarnes. Les segments mesurés correspondent essentiellement aux "arêtes faîtières".

Des indications sur ces "Modèles et méthodologies de saisie pour maquettes numériques 3D" ont déjà été données, notamment dans la revue XYZ n°97 [2003].

Caractéristiques des données de la Ville du Havre

La maquette 3D de la ville du Havre a été obtenue par restitution photogrammétrique en 3 dimensions des bâtiments à

partir d'une prise de vue aérienne de 2006 réalisée avec une chambre de prise de vue Leica ADS40. Ce travail a permis d'obtenir des vecteurs de contours du bâti et des faîtages (formats dwg ou dxf). La restitution a également porté sur l'implantation des arbres sur le domaine public.

La précision du niveau de détail est de 2 mètres, mais la précision du pointé est, elle, proche de la taille des pixels de la prise de vue (20 cm). La saisie des détails architecturaux a été effectuée pour les variations de hauteurs supérieures à 2 mètres, de ce fait certains balcons, cheminées et cages d'ascenseur n'ont pas été restitués.

Un traitement automatique en interne permet de projeter les façades à l'aplomb des toits sur le MNT. Un soin particulier a été apporté à l'accrochage aux objets. (Figures 2)

Le traitement des surfaces non planes a été spécifique. Il était nécessaire de trianguler les surfaces, de les saisir par "facetisation" même si l'environnement de restitution permettait d'obtenir des surfaces non planes.

Les toits (faîtage, terrasse,...) ont été saisis en objets "Face 3D" ou "Maillage 3D", les contours des toits ont été saisis en objets "Polyligne 3D" fermés.

■ Les Modèles Numériques d'Élévations (MNE) : une solution émergente

Production d'un MNE

Les MNE peuvent être obtenus par deux méthodes principales. La plus ancienne est issue du domaine spatial et de la télédétection. Il s'agit d'appliquer des algorithmes de traitement à des couples de clichés numériques présentant une zone de recouvrement pour calculer des grilles de MNE. Cette méthode donne de bons résultats pour les données à petite échelle.

La technologie émergente actuellement repose sur l'utilisation de lasers aéroportés (LIDAR). Cette technologie permet de produire simultanément un MNT et un MNE. Le nuage de points obtenus correspond au MNE mais comporte des zones indécises, notamment les zones de végétation. En effet, la végétation n'est traversée que partiellement par le rayonnement Laser, d'où un bruit parfois important.

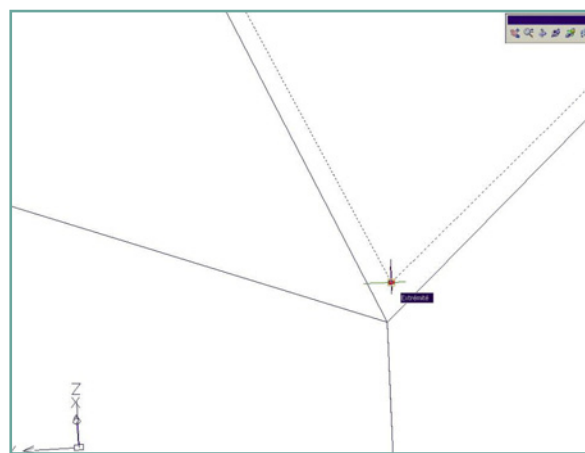
Des méthodes de filtrage permettent néanmoins de segmenter les nuages de points en ne conservant que la partie correspondant au terrain naturel ou au sol. Les zones recouvertes par des bâtiments sont ainsi détectées, les bâtiments éliminés et le sol sous-jacent apparaît alors grossièrement interpolé : cette partie conservée constituera le MNT. La végétation peut également être en partie éliminée par ces méthodes.

En conservant les parties du sursol, après avoir filtré le nuage de points et réduit les bruits, nous obtenons un MNE constitué en partie du MNT et de tous les éléments du sursol.

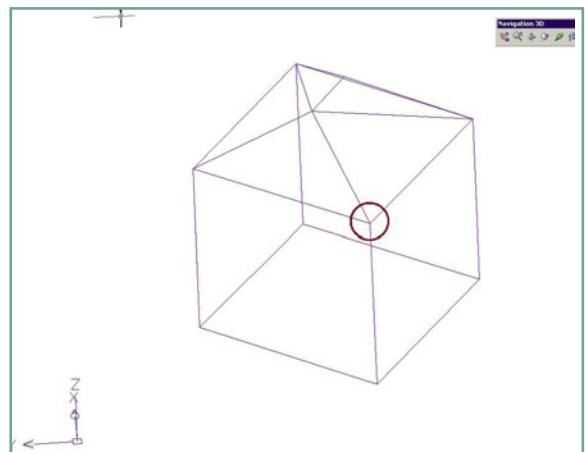
Vectorisation

En croisant le MNE avec une couche d'emprise de bâtiments en 2D, il est possible de vectoriser les bâtiments en 3D pour créer une maquette. Cette vectorisation repose sur des profils obtenus par intersection ou projection des nuages de points correspondant aux façades sur le sol : on obtient ainsi la trace au sol du contour du bâtiment. L'élévation du bâtiment est

Figures 2.



a) Exemple de mauvais accrochage.



b) Exemple de bon accrochage.



ensuite obtenue en extrudant verticalement les traces au sol jusqu'à l'altitude du contour des toits (en général, la ligne des gouttières). Les toits sont vectorisés en segmentant les nuages en parties correspondantes et en y déduisant des pans de toits sous forme de plans moyens. Il ne reste alors plus qu'à contraindre les différentes arêtes communes pour obtenir une structure conforme à la réalité.

La qualité géométrique de la maquette résultant dépend alors de la densité et de la précision du MNE. En fonction de la densité de l'acquisition LIDAR (quelques décimètres) le MNE pourra constituer une base très intéressante pour la constitution d'une maquette 3D.

La végétation pourra, par exemple, être conservée sous forme de nuage de points pour un rendu réaliste. Les bâtiments pourront également être conservés sous cette forme pour des visualisations à petite échelle.

Quelles nouvelles possibilités avec la 3D ?

■ Découverte et visite du territoire

L'orthophotographie aérienne permet de comprendre un lieu de façon bien plus intuitive et détaillée que la cartographie, qui s'adresse à un public plus initié et demande une plus grande capacité d'abstraction.

Cependant, il manque une information pour pouvoir réellement prendre la mesure du territoire qui est le sujet de cette photographie : la perception du relief. On peut certes, l'obtenir par ajout d'informations graphiques (courbes de niveau, dégradés de couleurs, ...). Mais, c'est alors au prix de la lisibilité de cette photographie, ce qui lui enlève inévitablement une partie de son intérêt.

Le MNT et les technologies 3D nous permettent de pallier cette lacune en nous offrant la possibilité de représenter et de visualiser cette orthophotographie drapée sur la surface du terrain naturel.



Figure 3. Représentation 2D du plateau au nord ouest de la Ville permettant de localiser les projets en cours d'étude.

Complémentarité entre représentation 2D et 3D

Ce mode de représentation n'est cependant pas nécessairement antagoniste avec la représentation plane plus traditionnelle. Il se présente même une certaine complémentarité entre les deux formes de perception du territoire.

En effet, la représentation plane du territoire est très efficace pour nous permettre de situer, de localiser un lieu ou un objet au sein d'un vaste territoire (Figure 3).

Les avantages de la 3D

Une fois cet endroit repéré et situé dans son environnement, la 3D nous permet d'accéder à une compréhension intuitive du site en nous offrant la possibilité de nous y immerger.

Utilisé de façon interactive, avec des fonctions de navigation ad hoc, le modèle 3D va pouvoir faire l'objet d'une véritable exploration virtuelle. Il nous permet alors de découvrir un espace donné en le parcourant virtuellement. Un site va pouvoir être visualisé sous tous ses aspects avec différents points de vue, celui du piéton, de l'automobiliste ou du pilote d'avion ! (Figure 4)

Plus le niveau de réalisme est élevé, plus la perception de l'espace sera intuitive. De ce point de vue, il est intéressant d'enrichir la maquette en y incorporant le mobilier urbain, la végétation, des véhicules ou encore des êtres vivants virtuels.

L'intérêt de la perception tridimensionnelle prend toute sa mesure lorsque l'on associe toute la richesse de la connaissance du terrain naturel et du sursol à celle du sous-sol. Les technologies 3D nous offrent en la matière des perspectives importantes. La modélisation en 3D des réseaux enterrés et l'amélioration de notre connaissance de ceux-ci représentent un enjeu de taille pour le développement futur des SIG. La tragique explosion d'une canalisation de gaz percée récemment lors de travaux de voirie nous le rappelle cruellement.

De manière plus générale, la modélisation en 3D du territoire se révèle très utile pour la réalisation de projets d'aménagement et d'urbanisme, grâce à la lisibilité qu'elle confère.



Figure 4. Visualisation en 3D des projets sur ce même territoire.

■ La 3D dans le cycle du projet

Pour bien concevoir un projet, il faut avant tout comprendre l'existant. Comme on vient de le voir, la maquette en 3D est un outil de choix pour faciliter et améliorer cette compréhension.

Mais l'intérêt des technologies 3D pour la gestion de projet va bien au-delà. En effet, le fait de disposer de cette représentation virtuelle du territoire existant permet de pouvoir réaliser des simulations. Il est ainsi possible de mettre en scène tout projet de construction, d'aménagement ou de renouvellement urbain.

La 3D se révèle intéressante à exploiter à toutes les étapes d'un projet qu'elle accompagne depuis sa conception initiale jusqu'à sa mise en œuvre concrète.

Aide à la décision

Elaborer un projet, consiste à faire des choix. La modélisation en 3D d'un projet et son insertion dans la maquette en 3D du territoire constituent, à cette fin, un puissant outil d'aide à la décision.

Ainsi, alors qu'un projet n'en est encore qu'au stade de l'idée, le modèle 3D va permettre, par exemple, de simuler et de visualiser différentes hypothèses de volumétrie pour les valider ou les invalider. (Figure 5)

Au stade d'un avant-projet sommaire, on va pouvoir visualiser le projet dans l'espace et vérifier, en premier lieu, sa pertinence et sa cohérence, puis sa bonne insertion dans le site. La simulation va, en effet, permettre de visualiser l'impact d'un projet sur son environnement.

Ceci est bien sûr intéressant dans le cadre de l'étude d'impact, lors de la conception d'un projet, mais sera également utile pour l'instruction des demandes de permis de construire. Si le volet paysager du dossier de demande d'autorisation n'est pas suffisamment représentatif du projet et si des doutes subsistent quant à l'impact paysager des travaux, il sera possible de réaliser une simulation à partir des plans-projets remis par l'architecte.



Figure 5. Simulation de la volumétrie d'un plan de composition.

Ainsi, à la Ville du Havre, il est arrivé que la vue en perspective fournie par l'architecte donne l'impression que l'immeuble de logement projeté avait une volumétrie et surtout une hauteur trop importante par rapport aux immeubles avoisinants. (Figure 6). Un refus de permis de construire était alors à craindre. Par acquis de conscience, la simulation en 3D de l'immeuble a permis de calculer l'image de synthèse correspondant au point de vue de la perspective initiale. Résultat : la perspective dessinée à main levée était fautive et trompeuse, le bâtiment s'insérait bien dans l'existant et le permis de construire a été finalement délivré. (Figure 7) Le bâtiment, une fois construit est effectivement bien intégré dans l'environnement. Le fait de pouvoir visualiser un projet en 3D suffit en lui-même à constituer une aide précieuse à la conception. Ainsi, dans un autre exemple, le projet d'aménagement d'un parc sportif a été recréé en 3D avec toutes ses composantes (bâtiments, voirie et espaces verts). Cette étape a permis de détecter la présence d'arbres dont l'arrachage n'avait pas été prévu. Ils se situaient au milieu d'un futur vestiaire ou encore d'une zone de stationnement. Une telle erreur reste toujours possible lorsque l'on travaille avec les logiciels de CAO/DAO sur des projets complexes faisant intervenir de très nombreuses couches correspondant aux différents corps de métier. L'exercice de modélisation en 3D de l'ensemble du projet permet de faciliter les contrôles et de déceler plus rapidement ce type d'erreurs.



Figure 6. Perspective à main levée d'un immeuble de logements.



Figure 7. Simulation 3D calculée à partir du projet d'immeuble de logements.



Enfin, les données géographiques en 3D permettent de réaliser des études et analyses spatiales tridimensionnelles qui se révèlent très malaisées sans ces technologies : il s'agit de toutes les études d'ensoleillement et autres études d'exposition à différents phénomènes, de propagation ou encore d'intervisibilité.

Concertation et communication

Outre sa vocation d'outil d'aide à la décision, la 3D revêt aussi un rôle très important dans l'accompagnement du projet en termes de communication.

Les films d'animation en images de synthèse 3D simulant l'insertion d'un projet dans son environnement constituent un support d'information très performant et efficace. Ils permettent d'expliquer ce projet au public de manière didactique et concrète. Ils sont donc utiles tant pour la concertation publique que pour l'explication du projet aux partenaires et à la population.

Dans le cadre de la concertation, on peut ainsi mettre en scène différentes hypothèses d'aménagement en expliquant les choix qui ont été réalisés. Grâce à ces simulations, la compréhension du projet devient accessible à tous, ce qui permet de favoriser un débat constructif, bien centré sur le projet.

Pour la communication autour du projet, les possibilités offertes sont multiples, car différents types de supports peuvent être mis en œuvre, outre les films de simulation. On peut, par exemple, créer des images de synthèse en haute définition pour la réalisation de posters, d'affiches ou pour l'illustration de plaquettes d'information. On peut encore réaliser des cédéroms ou mettre en place des bornes d'information permettant une navigation interactive dans la maquette de l'existant et du projet.

Nombre de ces possibilités ont pu être exploitées avec un grand succès par la Ville du Havre au cours de ces dernières années, notamment pour l'accompagnement des opérations de renouvellement urbain.

Mise en œuvre de la 3D à la Ville du Havre

■ Quelques chiffres

Le Havre en 3D, c'est 60,3 km² de territoire restitué, soit 100 % des bâtiments de la ville, ce qui représente 65 661 bâtiments restitués pour un total de 359 896 facettes de toits.

En outre, 23 646 arbres ont été restitués sous la forme de points cotés avec la hauteur de l'arbre. 60 % des bâtiments de la ville ont été photographiés pour texturer les façades, ce qui représente 2915 prises de vues réalisées sur le terrain et 2369 images redressées.

En termes d'exploitation de la maquette 3D, 60 projets de réalisation de produits à valeur ajoutée, ont été réalisés depuis 2001.

■ D'un SIG 2D vers un SIG 3D

La démarche de création d'une maquette en 3D de la Ville du Havre a débuté en 1999, à l'initiative du service S.I.G.U. L'enjeu

était de commencer à acquérir et structurer la donnée géographique de l'avenir.

Cette démarche vise à atteindre trois objectifs :

- constituer une base de données géographiques 3D avec une précision de 0,40 m ;
- avoir un rendu photo-réaliste sur toute la ville ;
- mettre à disposition des services municipaux via les logiciels de CAO/DAO (AutoCad), de SIG (ArcGIS) et les outils de visualisation par Intranet.

Constitution des données 3D

Pour la constitution de la maquette, deux axes ont tout d'abord été suivis :

- Acquisition de la BDTopo 3D de l'I.G.N. assortie de son MNT ;
- Restitution photogrammétrique par le laboratoire de photogrammétrie de l'INSA de Strasbourg, des bâtiments d'un quartier pilote à partir d'une photographie aérienne 1997.

Si la BDTopo 3D a rapidement montré quelques lacunes et une certaine inadéquation avec les besoins d'une collectivité territoriale, la restitution des bâtiments a présenté un intérêt indéniable, confirmant ainsi la pertinence de la démarche de création d'une maquette 3D virtuelle de la Ville.

De nouveaux modèles 3D ont ensuite été réalisés sur les quartiers à forts enjeux en termes de projets urbains. Ils ont permis d'affiner un cahier des charges et des spécifications techniques pour la constitution des données 3D.

La restitution photogrammétrique permet d'obtenir les faîtes des bâtiments : les toitures sont décomposées en faces adjacentes selon leurs discontinuités et leurs contours sont également restitués.

Il est alors possible de projeter ces contours des toitures sur le MNT afin de créer les faces correspondant aux murs. On obtient ainsi une base de données 3D des bâtiments de la Ville. La dernière étape consiste à associer une texture à chaque face : l'orthophotographie sert de base pour l'extraction des textures des toits et des photographies numériques des façades sont utilisées pour texturer les murs des bâtiments.

Extension et mise à jour

Le modèle et la structuration 3D étant établis, la maquette pouvait être complétée sur l'ensemble du territoire. En 2006/2007, une action combinée de réalisation d'un orthophotoplan numérique, de complément et de mise à jour de la maquette 3D a été entreprise à cette fin.

Dans un premier temps, un marché public a été passé en 2006, en partenariat avec la Communauté de l'Agglomération Havraise (CODAH) et le Port Autonome du Havre, pour la réalisation d'un MNT, d'un MNE et d'un orthophotoplan numérique couvrant un territoire de 650 km². La prise de vue aérienne a été réalisée au moyen d'une chambre de prise de vue Leica ADS40. Celle-ci a permis d'obtenir deux orthophotoplans (couleur et infrarouge) ayant une résolution et une précision de 20 cm.

Le MNT et le MNE ont été mesurés lors du même vol avec un laser aéroporté (LIDAR) Leica ASL50. La densité des nuages de points résultants est de 0,25 point/m² avec une précision de mesure de 30 cm en altimétrie.

A partir des données panchromatiques obliques de la prise de

vue, un second marché de restitution photogrammétrique a été passé par la Ville du Havre, afin de mettre à jour et de compléter la maquette existante. La prestation a permis également d'assurer la restitution des arbres situés sur le domaine public (hors forêt).

En ce qui concerne l'évolution de la maquette, la couche des bâtiments 3D est mise à jour régulièrement dans le cadre de l'entretien des référentiels géographiques de la Ville du Havre qui est réalisé par le service S.I.G.U., à partir notamment des informations des permis de construire.

Exploitation et valeur ajoutée

Tout comme les cartes constituent une production à valeur ajoutée à partir de la représentation des données géographiques en 2D, divers produits sont réalisés grâce à la représentation des données 3D. Il s'agit principalement d'images de synthèse en haute définition et de films d'animation.

Un logiciel modélisation et de rendu en 3D (3D StudioMax) est utilisé pour cela. Un univers 3D y est créé en y important le MNT, l'orthophotoplan et les bâtiments avec leurs textures photo-réalistes. A ce stade les faces des bâtiments sont réunifiées et chaque bâtiment devient un objet à part entière.

Cette mise en scène peut être complétée par l'insertion du mobilier urbain et des arbres. Les essences de ces derniers étant contenues dans la base, l'utilisation de bibliothèques "standards" de végétaux permet d'obtenir des rendus plus réalistes.

Enfin, il est possible d'ajouter "de la vie" à cet univers 3D : il est animé avec des véhicules et des êtres vivants virtuels.

Exemples d'applications

Voici quelques exemples de réalisations du service S.I.G.U. obtenues grâce à l'exploitation de la maquette en 3D de la Ville.

Renouvellement urbain dans les îlots du "Pré-fleur" et "Jules Vallès"

La ville du Havre a mené à bien ces dernières années un vaste programme d'opérations de renouvellement urbain, en partenariat avec l'Agence Nationale du Renouvellement Urbain (ANRU). La 3D a permis d'accompagner ces opérations depuis l'établissement du programme jusqu'à la concertation et la communication avec les habitants, pour lesquels elle a donné des résultats remarquables (Figure 8).



Figure 8. Réaménagement de l'îlot "Jules Vallès".



Figure 9. Simulation d'embellissement de la "Rue de Paris" avec des stores.



Figure 10. Simulation de terrasses.

Stores de la "Rue de Paris"

Il s'agissait de simuler la mise en place de stores sous les arcades de la "Rue de Paris" afin de vérifier la pertinence de cette action d'embellissement de la Ville. Un film d'animation a été réalisé à cet effet. Il a également permis une concertation avec les commerçants qui étaient associés à l'opération (Figure 9).

Aménagement de terrasses sur la "Rue Racine"

Dans le même esprit, la 3D a été utilisée dans le cadre d'une réflexion portant sur la mise en place de terrasses sur une rue piétonne. Une simulation 3D a permis de visualiser l'impact de ces terrasses et de vérifier si leur ensoleillement serait suffisant (Figure 10).



Figure 11. Projet de transport en commun en site propre.



Figure 12. Projet des jardins suspendus.



Projets de Transport en Commun en Site Propre (TCSP) et d'urbanisation du plateau nord-ouest

La Ville du Havre et la CODAH étudient actuellement la mise en place d'un TCSP (de type tramway) qui devrait voir le jour dans plusieurs années. La 3D va accompagner ce projet. Elle a commencé à être mise à contribution pour l'étude de la traversée des voies existantes (Figure 11).

Reconversion du "Fort de Sainte-Adresse"

Le fleurissement de la Ville du Havre est réalisé en régie par la Direction des Espaces-Verts, qui a conçu un superbe projet de réaménagement d'un ancien fort militaire afin d'y accueillir les serres municipales de production ainsi que des serres d'exposition (Figure 12).

Perspectives

Les évolutions prochaines de la mise en œuvre de la 3D à la Ville du Havre devraient porter principalement sur l'accessibilité aux données 3D. Le défi à relever porte sur la démocratisation de l'exploitation de ces données, au même titre que des autres données géographiques de référence de notre SIG. Au sein de la collectivité tout d'abord, il faut mettre en place la possibilité pour les services de pouvoir accéder à la maquette 3D pour la consulter et l'exploiter. A cette fin, le SIG constitue un premier outil, qui cependant est insuffisant car son usage est réservé aux seules stations de travail équipées. Au-delà de l'usage interne, il semble très important de pou-



Figure 13. Un aperçu du futur outil web de visualisation du Havre en 3D.

voir offrir la possibilité au grand public de pouvoir s'approprier ce nouveau mode de découverte du territoire, à l'instar des possibilités offertes par Google Earth ou le Géoportail 3D. Plusieurs collectivités ont d'ailleurs déjà franchi ce palier et ont mis en ligne sur internet des outils permettant de visualiser leur maquette 3D (Figure 13). Enfin, l'extension de notre maquette en 3D sur l'ensemble du territoire de l'agglomération est envisagée, à terme, par la CODAH dans le cadre de la mise en œuvre de son SIG communautaire.

Conclusion

A la Ville du Havre, l'intérêt de la démarche de modélisation en 3D de la Ville a pu être établi et confirmé dans de nombreux domaines. On observe aujourd'hui une certaine maturité des technologies qui doit inciter à se lancer dans le projet de constitution de ce qui semble être destiné à devenir la donnée géographique de référence de l'avenir.

Ce serait une erreur de réduire la 3D à un simple produit de communication car les enjeux de la donnée 3D dépassent largement cette seule exploitation.

L'utilisation des techniques de modélisation 3D produit un fort effet attractif, du fait, certainement, de la dimension de haute technologie et de l'image de modernité qu'elle renvoie à juste titre.

Il convient donc de faire preuve d'une grande déontologie dans leur mise en œuvre afin de ne pas enjoliver artificiellement la réalité ou les projets mis en scène, que cela soit à des fins d'aide à la décision ou de communication.

Remerciements

Je tiens à remercier la Ville du Havre qui soutient depuis le début cette démarche innovante de modélisation de la Ville en 3D, le service S.I.G.U. en général et M. Anthony Guérout (responsable de l'activité 3D), en particulier, pour la qualité du travail qui a été accompli pour parvenir aux résultats actuels ainsi que pour leur collaboration au présent article. ●

Contact

Olivier BANASZAK

Ingénieur en chef – Chef du service SIGU de la Ville du Havre
olivier.banaszak@ville-lehavre.fr

Mathieu KOEHL

Maître de conférences – INSA de Strasbourg
mathieu.koehl@insa-strasbourg.fr

ABSTRACT

Key words : 3D modelling, project, city, communication, decision making

The concept of a 3D model for the management of the City of "le Havre" has been defined since 8 years. Nowadays, the whole city is available in 3D. The paper retraces the history of the constitution of the 3D database, the different steps of the project and data formats, as well as tools and concepts. Ideas for the development of new functionalities in the future are described.