

# XYZ

Éditée par l'Association Française de Topographie  
n° 114



- topographie
- géodésie
- photogrammétrie
- SIG
- géomatique
- métrologie
- hydrographie
- topométrie
- cartographie
- génie civil
- histoire

CNAM : CRÉATION D'UNE CHAIRE DE GÉOMATIQUE  
Leçon inaugurale de Laurent Polidori

**27 mars 2008 : 4<sup>e</sup> Forum de l'AFT**  
**XYZ et SIG :**  
**vers la généralisation**  
**de la 3D**

Dossier p. 23 et suivantes



## La revue XYZ est éditée par l'Association Française de Topographie (AFT)

Membre de la FIG (Fédération Internationale des Géomètres) 

2, avenue Pasteur - 94165 Saint-Mandé Cedex - Tél.: 01 43 98 84 80 - Fax: 01 43 74 72 80

Courriel: [info@aftopo.org](mailto:info@aftopo.org) • Site Internet: <http://www.aftopo.org>

### Directeur des publications

André Bailly  
Ingénieur Géomètre ETP

### Directeur adjoint des publications

Emmanuel Natchitz  
Enseignant-Chercheur ESTP

### Rédaction et administration XYZ

2, avenue Pasteur  
94165 Saint-Mandé Cedex  
Tél. 01 43 98 84 80  
Fax 01 43 74 72 80

### Rédacteur en chef

Jean-Pierre Maillard  
Urbaniste, Géomètre-Expert Foncier,  
Marne-la-Vallée

### Comité de Rédaction

Stéphane Durand  
Enseignant-Chercheur - ESGT Le Mans  
Pierre Grussenmeyer  
Professeur des universités  
INSA de Strasbourg

Michel Kasser  
Professeur des universités  
Directeur ENSG - Marne-la-Vallée  
Tania Landes  
Maître de Conférences  
INSA de Strasbourg

### Responsable du site Internet

Tania Landes

### Publicité

Samuel Guillemain  
Tél.: 06 72 12 08 97  
[communication@aftopo.org](mailto:communication@aftopo.org)

### Conception et maquette

Dorothée Picard

### Autre publication: L'annuaire de l'AFT

### ALBEDIA IMPRIMEURS

137, avenue de Conthe  
BP 337 - 15003 Aurillac Cedex  
Tél.: 04 71 63 44 60  
Fax: 04 71 64 09 09

### Dépôt légal

1<sup>er</sup> trimestre 2008 ISSN 0290-9057  
N° CPPAP: 01 11 G 80 866

### Tirage de ce numéro: 1600 ex

### Abonnement annuel

France CEE: 83 €  
Etranger (avion, frais compris): 86 €  
Les règlements payés par chèques  
payables sur une banque située hors  
de France doivent être majorés de 10 €,  
sauf à utiliser l'identifiant international  
de compte IBAN  
FR69 2004 1000 0116 3000 3Y02 048  
Le numéro: 23 €  
Le bulletin d'adhésion est en p.80  
Membre du SPCS Syndicat de la Presse  
Culturelle et Scientifique

L'AFT n'est pas responsable des opinions  
émises dans les conférences qu'elle organise  
ou les articles qu'elle publie. Tous droits de  
reproduction ou d'adaptation strictement  
réservés.

Image de couverture :  
©Ville du Havre - Service SIGU

## ■ Editorial ..... 5

## ■ Info-Topo

> Les informations de la profession..... 7

## ■ Manifestations

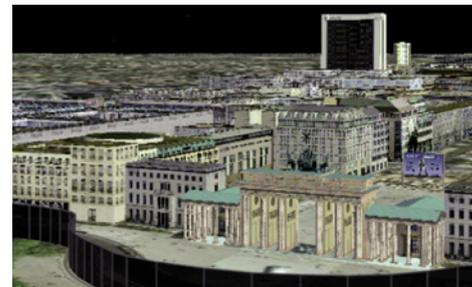
> CIPA 2007 - 21<sup>e</sup> Symposium du comité  
ISPRS-ICOMOS pour la documentation  
du patrimoine culturel  
Athènes (Grèce), 1-6 octobre 2007  
Pierre GRUSSENMEYER ..... 11

## ■ La vie des écoles

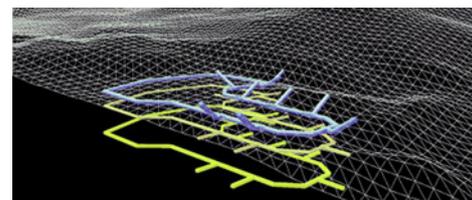
> CNAM : création d'une chaire  
de géomatique - Les origines  
et les principes de la géomatique  
Laurent POLIDORI ..... 12  
> L'Ecole Chez Soi s'engage  
dans "VILLAvenir" ..... 20

## ■ Dossier SIG : Vers la généralisation de la 3D

> 4<sup>e</sup> Forum ..... 23



> Panorama des potentialités SIG  
en 3 dimensions : vers des modèles  
virtuels 3D de villes  
Robert LAURINI - Sylvie SERVIGNE ..... 24



> Méthodologie de montage d'un SIG-3D  
par des Etudiants  
François BOUILLÉ ..... 29

> Vers la création d'un méta-modèle générique  
de l'information spatiale 3D urbaine  
Roland BILLEN - François LAPLANCHE  
Siyka ZLATANOVA - Ludvig EMGARD ..... 37

> Création, administration et utilisation  
d'un modèle urbain numérique en 3D  
Gerald FORKERT ..... 43



> SIG et 3D au service des collectivités  
territoriales : l'expérience de la Ville  
du Havre  
Olivier BANASZAK - Mathieu KOEHL ..... 50

## ■ Photogrammétrie

> Estimation automatique de l'orientation  
relative en imagerie terrestre  
Mahzad KALANTARI - Franck JUNG ..... 59

## ■ Réglementation

> Le code général des propriétés  
des personnes publiques  
Jean-Pierre MAILLARD ..... 64

## ■ GSF

> Chassé-croisé frisquet...  
Du nord au sud et du sud au nord  
François BODIN ..... 67

## ■ Topo vécue

> Dans les terres australes  
et antarctiques françaises  
Paul COURBON ..... 68

## ■ Art et Géométrie



> Aurélien Bory :  
Qi qiao ban  
(le tangram)  
Jean-Pierre  
MAILLARD ..... 74

## ■ Livres ..... 76

Pour la recherche de nos annonceurs  
consulter la page 77.

**PROCHAIN XYZ - n° 115**  
**La mesure de l'exactitude**  
**d'un récepteur GNSS**

*Longtemps attendue, souvent repoussée, bientôt disponible sans limites, elle entre à grands pas dans le quotidien de tout "géomaticien". Mais à quelles conditions, à quel prix, avec quelles contraintes, pour quels bénéfices ?*

*Nous parlons bien sûr de la 3D, la nouvelle dimension émergente des Systèmes d'Information Géographique.*

*Une nouvelle dimension également pour l'AFT qui, à travers ce n°114 d'XYZ, propose un dossier thématique spécial consacré justement à la 3D dans les SIG et aux SIG 3D... préparant, par la même, le quatrième Forum de la Topographie qui aura lieu le 27 mars 2008 à Cachan.*

*En faisant allusion au titre de la revue, où le "Z" n'a jamais été oublié, le thème du prochain forum est clairement affiché : "XYZ et SIG – vers la généralisation de la troisième dimension !"*

*Bien évidemment, ce dossier doit permettre de réfléchir, entre autres, aux enjeux, aux apports, aux réticences, mais surtout aux perspectives de la réelle 3D dans les SIG. Apparaissant (enfin) dans la plupart des SIG, elle fait l'objet des stratégies prioritaires dans les développements futurs.*

*On en comprendra ainsi l'articulation :*

*Le dossier thématique définit d'abord le contexte. La 3D est considérée de son point de vue géométrique.*

*On y trouve ensuite un état de l'art sur la 3D et sur ses perspectives en termes d'utilisation. Le CityGML, standard très récemment adopté y est mentionné. Le lecteur peut comprendre les concepts grâce à un exposé sur ses aspects les plus théoriques dans lequel une structuration spécifique des données 3D est proposée.*

*Pour se donner tous les atouts et appréhender sereinement cet univers exploré par les plus ambitieux, la meilleure réponse se trouve ensuite, et comme souvent, par le passage obligé de l'apprentissage. La 3D n'a de secrets que pour ceux qui ne la connaissent pas ! Une démystification en est donnée sous la forme d'un programme de formation destiné aux futurs spécialistes de la question.*

*Une application plus pratique de la modélisation des milieux urbains ouvre ensuite l'horizon aux plus pragmatiques vers des solutions existantes et des traitements éprouvés.*

*Enfin, l'exemple de la ville du Havre illustre bien nombre d'applications opérationnelles sûrement appelées à se généraliser. On y ressent les besoins, voire la dépendance à la 3D qui guette tous ceux qui oseront se lancer dans la démarche.*

*A nous tous, acteurs des collecte, structuration, diffusion et utilisation de données comme de solutions tridimensionnelles d'œuvrer pour que cette dimension soit, dans les deux sens du terme, à la hauteur des nombreuses espérances qu'elle suscite.*

*Rendez-vous donc au quatrième Forum de la Topographie pour s'informer, se former, échanger et partager nos expériences dans ce domaine.*

**Mathieu Koehl**

## ■ Les fiches AMO du CNIG en ligne sur GeoRezo

L'association GeoRezo.net, avec l'aimable autorisation du Conseil National de l'Information Géographique (CNIG), vient de procéder à la mise en ligne sur son site Internet des fiches du groupe de travail "Aide à la Maîtrise d'Ouvrage pour l'Information Géographique": <http://georezo.net/forum>, rubrique "Annonce". Ces fiches, éditées par le CNIG, reprennent les grands thèmes de l'utilisation de l'information géographique dans les organismes publics. Elles constituent une base de référence unique en français.

► **Pour plus d'informations :**  
[www.cnig.gouv.fr](http://www.cnig.gouv.fr) - <http://georezo.net>

## ■ L'APIA vient d'acquérir 530 unités Topcon GMS-2

L'Agence roumaine des paiements et interventions de l'agriculture (APIA) vient d'acquérir 530 unités GMS-2, le nouveau mobile portable SIG-GPS de Topcon, qui dispose des fonctionnalités suivantes :

- Suivi de double constellation GPS et Glonass ;
- Appareil photo numérique intégré associant des photos aux coordonnées d'emplacement ;
- Compas électronique pour les informations de relèvements et de direction ;
- Capacité d'utilisation comme un système de cartographie SIG ;
- Un récepteur de relevés statiques de niveau L1 ou un contrôleur de champ.

► **Pour plus d'informations :**  
[www.topcon.eu](http://www.topcon.eu)

## ■ FARO rentre dans le TOP 25 édité par le magazine FORBES

FARO Technologies Inc, leader mondial de systèmes portables pour la mesure 3D, a été nommée par le magazine FORBES dans sa liste des 25 entreprises américaines les plus dynamiques du secteur technologique, aux côtés d'entreprises de renommée internationale telles que Google et Adobe. FARO, comme toutes les entreprises du "TOP 25", satisfait à des critères bien précis (hausse annuelle du chiffre d'affaires, rentabilité au cours des douze derniers mois, croissance prévisionnelle annuelle des revenus, aucune implication dans des litiges juridiques importants).

► **Pour plus d'informations :**  
[www.faro.com](http://www.faro.com)

## ■ Protocole d'accord entre l'Union belge des géomètres-experts et l'Ordre français des géomètres-experts

Le 21 décembre 2007, les Présidents de l'Union belge des géomètres-experts et de l'Ordre des géomètres-experts français, Alain HENDOUX et Pierre BIBOLLET, ont procédé à la signature officielle d'un protocole d'accord cristallisant la convergence entre les deux organisations professionnelles sur de nombreux dossiers : les chantiers prioritaires porteront sur la méthodologie de définition des surfaces bâties, la procédure d'établissement des plans annexés aux documents d'arpentage, la pérennisation de la délégation de service public, les problématiques relatives à la responsabilité et l'assurance professionnelle.

En raison notamment de la proximité de leurs systèmes juridiques dans le domaine du foncier, l'Union belge et l'Ordre des géomètres-experts travaillent déjà en commun au sein des organisations européennes (CLGE, GE) et francophone (FGF) de géomètres. Ce protocole vient donc réaffirmer leur volonté commune de renforcer les liens d'amitié et d'échanges sur le plan bilatéral.

► **Pour plus d'informations :** [www.geometre-expert.fr](http://www.geometre-expert.fr)

## ■ Autodesk lance la 1<sup>re</sup> saison des geoweb'stories, pour donner la parole à ses clients

Après avoir organisé au mois de novembre 2007 la journée "Infrastructures et territoire" qui rassemblait les utilisateurs de ses solutions géospatiales, Autodesk innove aujourd'hui en développant un nouveau concept de séminaires en ligne axé autour des témoignages de ses clients. Cette approche lui permet de construire une relation privilégiée avec ses clients, en leur proposant un événement centré autour de leurs problématiques d'utilisateurs. Ces séminaires en ligne d'une heure environ aborderont ainsi des thèmes tels que l'accès natif aux données SIG, la convergence entre CAO et SIG ou encore la publication et la diffusion des données SIG et CAO.

La communauté urbaine de Nancy ou la mairie de Moissy-Cramayel y apporteront leur expertise d'utilisateurs et répondront aux questions des clients intéressés en compagnie de responsables techniques Autodesk.

► **Pour plus d'informations :** [www.autodesk.fr/geowebstories](http://www.autodesk.fr/geowebstories)



## Agenda des manifestations

■ **Du 18 mars 2008 à Nantes au 15 mai 2008 à Lyon : le tour de France ESRI visite 9 villes**  
[www.esrifrance.fr](http://www.esrifrance.fr)

■ **Le 27 mars 2008 : 4<sup>e</sup> forum de l'AFT**  
à l'ESTP à Cachan  
[www.aftopo.org](http://www.aftopo.org)

■ **Du 8 au 10 avril 2008 :**  
**Géo-événement 2008**  
à Paris, Porte de Versailles  
[www.geo-evenement.org](http://www.geo-evenement.org)

**Rendez-vous sur le stand AFT XYZ E08**

■ **Du 21 au 25 avril 2008 :**  
**Journées des Applications Spatiales organisées par le CNES**  
à Toulouse - [www.cnes.fr](http://www.cnes.fr)

■ **Le 21 et 22 mai 2008 : Construéo, salon du bâtiment performant**  
à Paris, Porte de Versailles -  
[www.salons.groupemoniteur.fr](http://www.salons.groupemoniteur.fr)

■ **Du 27 au 29 mai 2008 : EquiVille**  
à Lyon, Eurexpo -  
[www.salons.online.fr](http://www.salons.online.fr)

■ **Du 14 au 19 juin 2008 :**  
**XXXI<sup>e</sup> assemblée générale de la FIG** à Stockholm  
[www.fig.net/events/2008/fig\\_2008](http://www.fig.net/events/2008/fig_2008)

■ **Du 3 au 11 juillet 2008 :**  
**XXI<sup>e</sup> congrès de l'ISPRS**  
à Pékin - [www.isprs2008-beijing.org](http://www.isprs2008-beijing.org)

■ **Du 17 au 19 septembre 2008 :**  
**Journées de la Topographie de l'INSA de Strasbourg**  
au sein du **Congrès National de l'Ordre des géomètres-experts**  
[www.insa-strasbourg.fr/topographie/](http://www.insa-strasbourg.fr/topographie/)

## ■ Indonésie : le consortium mené par Astrium déploie un nouveau système national de gestion des catastrophes

Le consortium conduit par Astrium, associant Infoterra France et IGN France International, vient de terminer avec succès le déploiement de salles de gestion des catastrophes au sein du Centre National de Gestion des Catastrophes en Indonésie à Jakarta, et de trois Centres Régionaux basés à Jakarta, Padang, et Banda Aceh.

Initié fin 2006, ce projet réalisé pour le compte de l'Etat (Ministère des affaires étrangères et européennes - Ministère de l'intérieur de l'Outre-mer et des collectivités territoriales) représenté par CIVI.POL Conseil, société de conseil et de service du Ministère de l'intérieur, vise à renforcer les capacités de gestion des catastrophes en Indonésie.

### Traiter et échanger les informations pour une meilleure gestion des catastrophes

Ce projet avait pour objectif de mettre en place un système global directement et rapidement opérationnel, permettant à la sécurité civile indonésienne de gérer les catastrophes au niveau national (BARKONAS PBP) et régional (SATORLAK PBP), notamment grâce à l'échange et au traitement des informations relatives à la crise. Ainsi, chaque salle de gestion de crise est équipée de moyens de télécommunications fiabilisés (radio, téléphone, échange de données), et d'un système d'information complet. Ce dernier inclut en particulier un système d'information géographique et d'aide à la décision basé sur le produit RISKFRAME d'Infoterra France, logiciel applicatif dédié à la gestion des risques et des crises. Enfin, les centres ont

également été approvisionnés en bases de données cartographiques (cartes topographiques numérisées). Cet ensemble applicatif permet, en cas de crise, de créer un plan d'intervention, de visualiser sur un fond cartographique la situation et son évolution, ainsi que de gérer et suivre l'ensemble des moyens engagés, pour une meilleure compréhension et une gestion optimale de la situation. Dans la phase de prévention, le système permet aux utilisateurs de gérer et de maintenir les données géographiques opérationnelles, d'étudier des scénarios de crises, et de préparer des plans de secours. Applications et données pourront être facilement mises à jour et enrichies au fur et à mesure de l'évolution des besoins.

### Une organisation industrielle souple, légère et efficace

Pour mener à bien ce projet, Astrium s'est appuyé sur deux sociétés françaises : sa filiale Infoterra – spécialisée en produits et services de géo-information et disposant d'un important savoir-faire et d'outils applicatifs dédiés au domaine de la gestion des risques – et IGN France International (filiale de l'Institut National Géographique français) dont l'expertise dans le domaine de la cartographie de référence est mondialement reconnue. Outre son rôle de coordonnateur global du projet, Astrium a pris en charge les aspects de définition système, les approvisionnements en matériels et logiciels standards ainsi que l'ensemble des travaux d'intégration et de validation des systèmes, que ce soit en France ou sur site.

## ■ Hexagon acquiert le principal fournisseur de systèmes GNSS, NovAtel Inc.

Hexagon AB et NovAtel Inc ont conclu un accord définitif selon lequel Hexagon accepte d'acquérir toutes les actions de NovAtel en circulation.

NovAtel, basée à Calgary au Canada, est le principal fournisseur de composants et de sous systèmes pour les systèmes GNSS (Global Navigation Satellite Systems ou systèmes mondiaux de navigation par satellite). Il met au point des pièces originales comme des récepteurs, des boîtiers, des antennes, et les microprogrammes qui sont intégrés dans les applications de positionnement de haute précision dans le monde entier. Ces applications comprennent la topographie, la cartographie et les Systèmes d'informations géographiques (SIG), le guidage d'engins agricoles de précision, l'automatisation des ports, l'industrie minière, la temporisation et l'industrie maritime. Les récepteurs de référence NovAtel sont également au cœur des réseaux au sol de l'aviation nationale aux États-Unis, au Japon, en Europe, en Chine et en Inde.

Depuis longtemps, NovAtel est partenaire d'une filiale d'Hexagon, Leica Geosystems, spécialisée dans le développement de technologies GNSS de haute précision. NovAtel est l'un des principaux fournisseurs de ces technologies pour Leica Geosystems depuis 2002.

► Pour plus d'informations : [www.hexagon.se](http://www.hexagon.se)

## ■ Leica Geosystems lance la station totale Leica TPS1200+ : un plus en matière de productivité, de précision et d'évolutivité

Avec le nouveau Leica TPS1200+, Leica Geosystems propose la station totale la plus performante jamais conçue. Elle est dotée du distancemètre sans réflecteur le plus précis du marché, qui dispose du plus petit spot laser possible et qui est capable de mesurer des distances supérieures à 1 000 mètres – même sans réflecteurs, et avec une véritable précision "PinPoint". Grâce à la nouvelle lunette qui équipe tous les modèles Leica TPS1200+, l'utilisateur profite également d'une précision optimale au niveau des mesures avec réflecteurs.

### Une vitesse et une productivité accrues

Le nouvel affichage en couleur de l'appareil fournit à l'utilisateur toutes les informations dont il a besoin de manière claire.

De plus, le tachéomètre peut être commandé à distance à partir de la canne avec le prisme. Le TPS1200+ fonctionne avec un capteur de reconnaissance automatique de la cible (ATR) amélioré qui repère et suit le prisme avec plus de précision et de fiabilité que par le passé. Si le verrouillage est interrompu, c'est alors l'inégalable capteur "PowerSearch" qui se verrouille à nouveau rapidement sur le prisme de façon automatique. L'utilisateur peut ainsi mesurer davantage de points sur la même durée qu'auparavant.

### Flexibilité et évolutivité

La philosophie de système évolutif de Leica Geosystems ajoute des fonctionnalités GNSS complètes au TPS1200+. Avec les options SmartStation, SmartRover et SmartPole de Leica, l'utilisateur peut personnaliser son équipement topographique pour des tâches, équipes et budgets spécifiques.

► Pour plus d'informations : [www.leica-geosystems.fr](http://www.leica-geosystems.fr)

## ■ CNAM : La géomatique monte en chaire



Le 30 novembre 2007, Laurent Polidori, Directeur de l'Ecole supérieure des géomètres et topographes (ESGT) a pris ses fonctions de professeur titulaire de la chaire de Géomatique du Conservatoire national des arts et métiers (CNAM) récemment ouverte au sein de son pôle Sciences et techniques industrielles. Sous la présidence de

Mme Anny Cazenave, membre de l'Académie des Sciences, le nouveau professeur a dispensé sa leçon inaugurale "Les origines et les principes de la géomatique" devant une nombreuse assistance. Laurent Polidori a réservé à XYZ la publication de son intervention (c.f. page 12), qu'il en soit remercié.

Il convient tout d'abord de rappeler que, depuis des siècles, les géographes ont conçu des techniques de mesure, de représentation et d'analyse de la surface terrestre. Avec le développement de l'informatique, la mise en œuvre de ces techniques a donné naissance à la géomatique. En ouvrant cette chaire de Géomatique, loin d'introduire une discipline nouvelle, le CNAM perpétue au contraire une longue tradition d'où émergent deux figures :

- Le colonel Aimé Laussedat (1819-1907), professeur de géométrie appliquée aux arts puis directeur du Conservatoire,

considéré comme l'inventeur de la photogrammétrie, - Georges Poivilliers (1892-1968), le dernier professeur titulaire de la chaire de photogrammétrie ;

C'est dans cet environnement scientifique que le CNAM a créé en 1947 l'ESGT destinée à former les ingénieurs de l'aménagement foncier et alors, après l'Institut de topométrie mis en place dès 1939, la deuxième voie de la formation des géomètres-experts. Désormais liée à la chaire de Géomatique, l'ESGT renforce sa place dans le Conservatoire.

La leçon inaugurale a présenté l'historique et les principes des différents domaines de la Géomatique (géodésie, photogrammétrie, télédétection, cartographie et analyse spatiale), ainsi que leurs applications au service du cadastre, des travaux publics et de la constitution de données. Laurent Polidori a aussi montré que sa discipline croise les grandes questions d'environnement et de société au fur et à mesure que la précision s'accroît et l'information géographique se démocratise.

En marge de la manifestation, un accord de rapprochement entre les écoles d'ingénieurs en géomatique, à savoir l'ESGT et l'Ecole nationale des sciences géographiques (ENSG) a été signé entre le CNAM et l'IGN.

L'AFT et XYZ adressent leurs vifs compliments à Laurent Polidori revêtu, pour la circonstance, de la robe et du couvre-chef d'usage au charme solennel.

### **Olivier Reis**

*Ingénieur géomètre-topographe ENSAI Strasbourg  
Diplômé de l'Institut de traducteurs et d'interprètes (ITI) de Strasbourg*

*9, rue des Champs F-57200 SARREGUEMINES  
Téléphone : 03 87 98 57 04 - Télécopie : 03 87 98 57 04 - E-mail : o.reis@infonie.fr*

**Pour toutes vos traductions d'allemand et d'anglais en français en  
topographie - géodésie - photogrammétrie - SIG - cartographie - GPS**

### **Reinhart Stölzel**

*Ingénieur géomètre-topographe  
Interprète diplômé de la Chambre de commerce et d'industrie de Berlin*

*Heinrich-Heine-Strasse 17, D-10179 BERLIN  
Téléphone : 00 49 30 97 00 52 60 - Télécopie : 00 49 30 97 00 52 61 - E-mail : reinhart.stoelzel@eplus-online.de*

**Pour toutes vos traductions de français et d'anglais en allemand en  
topographie - géodésie - SIG - GPS - chemin de fer - routes**

### **Paul Newby**

*Membre de la Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS)  
Diplômé des universités de Cambridge (géographie) et de Londres (photogrammétrie)*

*9 Merrytree Close, West Wellow, Romsey, Hants SO51 6RB GB  
Téléphone : 00 44 1794 322 993 - Télécopie : 00 44 1794 324 354 - E-mail : paulnewby@onetel.net.uk*

**Pour toutes vos traductions de français en anglais en  
topographie - géodésie - GPS - SIG - cartographie - photogrammétrie - télédétection**

***Des topographes traducteurs à votre service***

# 2008 : l'OGÉ fait le point

*Le 28 janvier 2008, au nom de l'Ordre des géomètres-experts (OGÉ), le Président Pierre Bibollet a présenté ses vœux pour l'année nouvelle. Dans son allocution, il a souligné que les géomètres-experts, garants de la propriété, veulent affirmer leur savoir-faire en matière d'aménagement durable des territoires urbains et ruraux et, en les actualisant, faire évoluer leurs pratiques dans le contexte européen dans le souci de mettre leur expertise au service des acteurs publics ou privés avec pour ambition assumée de préserver l'intérêt des citoyens et des consommateurs.*

La profession s'est fixée deux défis pour les années à venir : moderniser la mission de délégation de service public du géomètre-expert et valoriser son intervention dans le champ de l'aménagement durable des territoires.

La modernisation permanente constitue la condition de la reconnaissance et légitimation de la mission des géomètres-experts auprès du public et du consommateur. La profession doit constamment impulser la réflexion et les projets qui mettent à jour et dynamisent sa mission déléguée par l'État, en intégrant notamment les technologies de l'information et de la communication.

Les géomètres-experts doivent mettre en avant et faire connaître, de mieux en mieux, leurs activités et savoir-faire au service du développement et de l'aménagement durable du territoire. C'est pourquoi l'OGÉ a participé activement à la réforme des autorisations d'urbanisme et organisé une formation obligatoire de l'ensemble de ses membres, faisant ainsi de la profession un référent incontournable de la mise en œuvre de cette réforme. Fort de cet

investissement et comme il a contribué au Grenelle de l'environnement, l'OGÉ s'impliquera dans la réécriture du code de l'urbanisme et des procédures d'aménagement souhaitée récemment par le Président de la République et confiée par lui au ministre de Tutelle.

Procédant d'une même démarche, l'ouvrage réalisé par la commission urbanisme de l'Ordre "La forme urbaine et l'enjeu de sa qualité" édité par le Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU)\*, est le fruit de la réflexion approfondie menée par la profession. Dans une perspective de développement durable, il dégage les critères à prendre en compte pour la mise en place d'un urbanisme conciliant mobilisation du foncier et qualité des aménagements. La publication illustre la volonté de l'Ordre de valoriser l'intervention des géomètres-experts dans le champ de l'aménagement du territoire. Ce faisant, selon une approche qualitative et participative de nature à satisfaire les attentes du citoyen en quête d'un cadre de vie toujours meilleur, les géomètres-experts s'inscrivent dans la lutte contre l'étalement urbain par la préservation des paysages et de l'environnement. De même, Projet Urbain Partenaire (PUP), proposé par les géomètres-experts lors du congrès de Saint-Malo

en 2006, se définit comme un véritable instrument d'urbanisme opérationnel destiné à lutter contre la pénurie de foncier. Il facilite l'ouverture à l'urbanisation des terrains constructibles, en permettant à tous les maires de lancer facilement des opérations d'intérêt général en partenariat public/privé (PPP) et de les financer. Il se révèle le prolongement naturel de l'approche développée dans l'ouvrage ci-dessus. Le PUP a fait l'objet d'une présentation au Président de l'Association des Maires de France qui a accueilli positivement cette initiative et reconnu l'utilité d'un tel dispositif pour les décideurs locaux.

Enfin Pierre Bibollet a insisté sur trois leviers de progrès à mobiliser pour ancrer durablement les géomètres-experts dans une réelle perspective d'avenir :

- renforcer la présence de la profession au niveau européen et international pour peser davantage sur les réglementations et les marchés,
- moderniser les structures d'exercice pour faire face à un marché toujours plus concurrentiel,
- accroître la formation initiale et continue pour répondre aux exigences croissantes du métier.

► Pour tous renseignements : [www.geometre-expert.fr](http://www.geometre-expert.fr)

(\*) Voir rubrique Livres page 78.

## ■ OGÉ : Hervé Grélard, Secrétaire général de l'Ordre des géomètres-experts



Hervé Grélard, 37 ans, DEA droit des contrats - contrats internationaux, prend le poste de Secrétaire général de l'Ordre des géomètres-experts après avoir occupé les postes de Directeur adjoint du cabinet du Président du Conseil général de Loire-Atlantique et Directeur de cabinet du Maire de la ville d'Orvault, agglomération nantaise, où il s'est illustré par son engagement en faveur du développement durable.

Cette expérience en collectivités vient en appui des priorités du bureau du Conseil supérieur de l'Ordre, et qui sont entre autres :

- la modernisation de la mission de service public de la profession,
- la contribution du géomètre-expert au développement et à l'aménagement durables des territoires et de la ville,
- l'ouverture de la profession à l'international.



## CIPA 2007

### 21<sup>e</sup> Symposium du comité ISPRS-ICOMOS pour la documentation du patrimoine culturel Athènes (Grèce), 1-6 octobre 2007

#### ■ Pierre GRUSSENMEYER

*Le 21<sup>e</sup> symposium du CIPA, Comité mixte de la Société internationale de photogrammétrie et de télédétection (ISPRS) et du Conseil international des monuments et sites (ICOMOS) a eu lieu à Athènes du 1<sup>er</sup> au 6 octobre 2007.*

*Plus de deux cents participants originaires de vingt-sept pays ont participé à l'événement organisé par le Professeur Andreas Georgopoulos et ses collègues de l'Université technique d'Athènes.*

**L**e Comité international de photogrammétrie architecturale (CIPA), a été fondé en 1968 par le français et Président d'honneur Maurice Carbonnell. Ce comité s'intéresse à la documentation du patrimoine culturel, en cherchant à réunir les fournisseurs et les utilisateurs de données, quelles que soient les techniques mises en œuvre. Lors de la session d'ouverture du congrès présidée par le président du CIPA, Cliff Ogleby, et Ian Dowman (président de l'ISPRS), les participants ont rendu hommage à Peter Waldhäusl (Autriche), membre du comité de 1992 à 2004 et son président entre 1998 et 2002, en le nommant Président d'honneur pour saluer son dévouement envers le CIPA durant la dernière décennie.

Le programme scientifique comprenait 2 sessions plénières, 16 sessions orales (soit un total de 69 exposés) et 2 sessions d'affiches comprenant 97 présentations. Les thèmes des articles étaient consacrés aux techniques actuelles de relevé du patrimoine, à l'acquisition et l'intégration des données laser et photogrammétriques, à différentes expériences de modélisations tridimensionnelles à partir d'images et/ou de nuages de points, aux SIG patrimoniaux, aux applications de la géomatique à l'archéologie et à l'architecture, et à la restauration des monuments de l'acropole d'Athènes.

Une session spéciale était consacrée à la présentation des résultats de l'initiative RecorDIM (2002-2007) relative à l'archivage, la documentation et la gestion de l'information, qui a réuni le CIPA, le Conseil international des monuments et des sites (ICOMOS), la fondation américaine Getty et English Heritage. Cette session était organisée en mémoire de Robin Letellier (à l'origine de ce projet), disparu subitement en 2007.

Au cours de la journée du 4 octobre, les participants ont eu la chance d'effectuer une visite technique du site de l'acropole,



**Un groupe de participants réunis devant le Zappeion Megaron, le centre de conférences d'Athènes.**

suivi d'une excursion dans les environs d'Athènes jusqu'au Cap Sounion.

Une dizaine de représentants français a participé à ce congrès et plusieurs présentations ont été effectuées par des chercheurs de l'ENSG (IGN), de l'INSA de Strasbourg, du Laboratoire des sciences de l'information et des systèmes (LSIS), du Département de recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines (DRASSM-Marseille), de France Telecom et de l'Institut national de recherches en informatique et en automatique (INRIA-Rennes), de l'Ecole Centrale de Paris et du Laboratoire de recherche des monuments historiques (LRMH-Paris).

Les actes du congrès sont publiés dans un volume de 855 pages : Andreas Georgopoulos (ed.) : *AntiCIPAting the future of the cultural past – Proceedings of the International CIPA 2007 Symposium in Athens, Greece. The CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage Vol XXI, 2007, ISSN 0256-1840 and The ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems Vol. XXXVI-5/C53 ISSN 1682-1750.*

Tous les articles du congrès sont gratuitement mis à la disposition du public et téléchargeables à partir du site Internet du CIPA : <http://cipa.icomos.org>

**Le prochain congrès du CIPA (22<sup>e</sup>) sera organisé à Kyoto (Japon) par l'équipe du Professeur Yutaka Takase du 11 au 15 octobre 2009.**

► Pour toute information, contacter : Pierre Grussenmeyer  
membre du comité exécutif et trésorier du CIPA  
[pierre.grussenmeyer@insa-strasbourg.fr](mailto:pierre.grussenmeyer@insa-strasbourg.fr)

En 2007, le Conservatoire national des arts et métiers (CNAM) a créé une chaire de géomatique et l'a confiée à Laurent Polidori, Directeur de l'ESGT. Ce dernier a bien voulu confier à XYZ, pour le plus grand profit de ses lecteurs, le texte *in extenso* de sa leçon inaugurale.

# Les origines et les principes de la géomatique

■ Laurent POLIDORI

Et tout d'abord, qu'est-ce que la géomatique ?

*C'est un terme récent, dans lequel une étymologie simpliste permet de retrouver la géographie et l'informatique, mais comme une vaste communauté scientifique et industrielle s'en est emparée d'une manière un peu désordonnée, je vais m'efforcer d'en proposer une définition. Je dirais que la géomatique est un ensemble de techniques géographiques, souvent anciennes et développées séparément, mais auxquelles une mise en œuvre numérique permet désormais de cohabiter dans un même environnement informatisé.*

Et pour aller plus loin je vous propose un exposé en quatre parties. Je présenterai d'abord les origines et les principes de la géomatique, j'évoquerai ensuite ses axes de recherche puis ses usages. Enfin je tenterai de répondre à une question que vous vous posez tous : pourquoi le CNAM a-t-il ouvert une chaire de géomatique ?

Je commencerai donc par passer en revue les principales branches de la géomatique qui sont autant d'outils au service de la géographie, des branches qui ont pour tronc commun la géométrie.

Et pour justifier l'importance que je donne ici à la géométrie, je rappellerai que la géographie s'efforce notamment de déchiffrer ces écritures que la nature et la société ont tracées à la surface de la Terre (comme la frontière Etats-Unis Mexique ou la déforestation amazonienne parfaitement visibles sur des images de satellites), mais avant de pouvoir lire et comprendre ces écritures il a fallu doter la surface de la Terre d'une géométrie (qui permet de se repérer) et même d'une topologie (qui permet de définir entre les objets géographiques des relations comme l'inclusion ou l'adjacence). Le socle sur lequel la géomatique est construite, c'est donc la géométrie, et je crois que l'histoire de la géométrie permet de comprendre ce qu'est la géomatique aujourd'hui.

■ **Les géomètres grecs de l'Antiquité** (au-delà de ce qu'en ont retenu les collégiens d'aujourd'hui) ont établi ce qu'on pourrait appeler la géométrie du ciel, c'est-à-dire le canevas géométrique dans lequel s'est développée l'astronomie – une astronomie géocentrique à cette époque, qui impose une description extrêmement complexe du mouvement des astres mais qui se projette très simplement à la surface de la Terre avec le système des méridiens et des parallèles, apparu très tôt et que l'on retrouve dans la célèbre carte de Ptolémée. Il est difficile de ne pas citer Euclide dont le pouvoir d'abstraction a libéré en quelque sorte la géométrie du

support matériel qu'était la Terre (support matériel et d'ailleurs étymologique, puisque géométrie signifie "mesure de la Terre").

■ **A la Renaissance**, on assiste au mariage de la géométrie et de l'algèbre, sous l'impulsion de philosophes comme Oresme, évêque de Lisieux au XIV<sup>e</sup> siècle, et bien sûr, Descartes. L'idée, qui nous paraît si simple aujourd'hui, est de remplacer un point par ses coordonnées, un objet par son équation et donc un raisonnement géométrique par un calcul. A partir de là, la géométrie va profiter de toutes les avancées de l'algèbre. En particulier les travaux de Newton sur la gravitation universelle et de Leibniz sur le calcul infinitésimal vont contribuer à la naissance de la géométrie différentielle, qui permet de prédire la trajectoire d'un astre et plus généralement, de décrire toutes sortes de courbes et de surfaces dans l'espace.

■ Par son efficacité et sa richesse, la géométrie différentielle va ébranler les fondements de la géométrie d'Euclide, et susciter au XIX<sup>e</sup> siècle le développement d'une géométrie non euclidienne, en particulier une géométrie sphérique qui permet que dans un triangle la somme des angles soit différente de 180°. Les détracteurs de cette nouvelle géométrie mettront du temps à reconnaître que loin de détruire l'ancienne géométrie, elle l'étend et l'englobe. *La géométrie non-euclidienne*, dit Bachelard, *est constituée en bordure de la géométrie euclidienne, et elle dessine du dehors, avec une lumineuse précision, les limites de l'ancienne pensée.* Cette nouvelle géométrie va favoriser le développement de la relativité qui a besoin de pouvoir courber l'espace, et

pour ce qui nous concerne plus directement, elle va permettre à la géodésie de construire des correspondances entre la surface de la Terre et la surface plane de la carte.

■ Au **XX<sup>e</sup> siècle** on voit se développer une géométrie chaotique, dans laquelle la position d'un point est obtenue par tirage d'une variable aléatoire dont la loi de probabilité, ou le comportement statistique, est une caractéristique, une signature, de l'objet que l'on reconstitue avec ces points. La modélisation des paysages terrestres a donc utilisé des modèles théoriques comme le mouvement brownien ou les surfaces fractales pour rendre compte de la complexité de l'environnement naturel. Je citerai le cas de la côte bretonne qui a inspiré les travaux de Benoît Mandelbrot sur les fractales. Enfin, le développement de l'informatique va donner naissance à une géométrie numérique, avec des possibilités de programmation et de calcul formel, notamment pour résoudre des problèmes qui n'ont pas de solutions exactes mais des solutions itératives ; avec bien sûr de nouvelles possibilités graphiques ; et l'on a vu apparaître une géométrie discrète, dans laquelle les points sont remplacés par des pixels et qui sert de base à la réalité virtuelle – ou pour employer notre jargon, à la photogrammétrie numérique. C'est cette géométrie numérique qui a permis le développement des logiciels de dessin technique et de système d'information géographique.

Toutes ces avancées de la géométrie ont donc alimenté les unes après les autres la boîte à outils disponible aujourd'hui en géomatique.

Les progrès de la géométrie ont directement servi **la géodésie**, qui les a également suscités (rappelons que la géodésie étudie la forme de la Terre et les possibilités de s'y localiser). Je me méfie toujours de la facilité avec laquelle chaque science peut s'auto-proclamer mère de toutes les autres, mais il faut bien reconnaître que toutes les sciences géographiques, dont la géomatique est l'héritière, doivent beaucoup à l'astronomie, sans laquelle la géographie serait restée locale et descriptive, nous vivrions sur une terre plate, et nous n'aurions même pas pu nous donner rendez-vous ce soir puisque nous n'aurions pas de calendrier. C'est l'observation du ciel qui très tôt a permis de se localiser selon le principe que je résumerai ainsi : *"dis-moi ce que tu vois et je te dirai où tu es"*, d'abord par la mesure des latitudes maîtrisée dès l'Antiquité, puis des longitudes à partir du XVIII<sup>e</sup> siècle. Et ce sont donc des astronomes qui ont dimensionné notre planète, depuis Eratosthène qui a procédé dans l'Égypte antique à la première détermination rigoureuse du rayon terrestre, jusqu'à La Condamine et Maupertuis, que l'Académie des Sciences a envoyés autour de 1740, respectivement au Pérou et en Laponie pour y constater que les rayons de courbure sont différents et confirmer ainsi l'aplatissement de la Terre aux pôles.

À la fin du XX<sup>e</sup> siècle, diverses techniques ont été développées pour mesurer la Terre et ses déformations en utilisant des satellites artificiels. Je citerai en particulier :

- la télémétrie laser sur satellite qui exploite des mesures de distance entre des sources laser fixes et des satellites géodésiques ;

- un certain nombre de systèmes de localisation radio dont le plus connu est le GPS ;
- l'interférométrie radar qui consiste à envoyer des ondes radar depuis un satellite et à en traiter les échos pour mettre en évidence des déformations centimétriques de l'écorce terrestre, déformations dont l'amplitude apparaît sous la forme de franges d'interférences ;
- enfin l'altimétrie radar qui détermine la distance entre un satellite parfaitement positionné et la surface de l'océan dont on peut ainsi cartographier la hauteur, ce qui fournit une information précieuse sur le champ de pesanteur terrestre. En effet, l'océan étant fluide, sa surface épouse à peu près les ondulations du champ de pesanteur et matérialise ce qu'on appelle le géoïde, que l'on peut donc observer par des moyens purement géométriques – tandis que sur les terres émergées la détermination d'une hauteur au-dessus du niveau de la mer n'est qu'indirecte : les méthodes géométriques ne suffisent plus et il est plus difficile de se passer de méthodes gravimétriques telles que le niveau à bulle ou le fil à plomb.

Les satellites ont donc remplacé les étoiles mais le principe reste le même, et toutes ces techniques, seules ou combinées, permettent de déterminer avec une précision centimétrique voire millimétrique, des positions et des déformations géophysiques.

Pour relier entre elles des mesures faites en différents points, on a cependant toujours recours à **la topographie**, utilisée par ailleurs pour la description de territoires plus restreints, et qui consiste essentiellement à mesurer des angles et des distances – le problème étant que la mesure de distance est longtemps restée très rudimentaire et viable uniquement sur de courtes distances, tandis que la mesure d'angle progressait régulièrement à mesure que les instruments optiques progressaient. Avec l'invention de la triangulation, on remplace la mesure d'une très grande distance par un grand nombre de mesures angulaires dans une chaîne de triangles, une seule mesure de distance, le côté d'un des triangles, suffisant en principe pour mettre le tout à l'échelle. Lorsque Colbert crée l'Académie des Sciences en 1666, les triangulations vont permettre de rectifier les dimensions du royaume, d'envisager la mesure de l'aplatissement terrestre auquel je faisais allusion précédemment et bientôt de donner le coup d'envoi à la carte de Cassini. On voit donc cohabiter la topographie des arpenteurs, très localisée, souvent sollicitée pour les besoins du cadastre, et la topographie des grands chantiers qui va accompagner la géodésie jusqu'à l'arrivée des satellites.

Un progrès décisif surviendra à la fin du XX<sup>e</sup> siècle avec, d'une part, le positionnement par GPS qui permet de localiser un point indépendamment de ses voisins, et d'autre part, les distancemètres électroniques, qui envoient un rayon laser vers un prisme et déterminent une distance à partir du temps de propagation aller-retour et des caractéristiques de l'atmosphère traversée. On verra finalement les mesures d'angle et de distance cohabiter au sein d'un même instrument qu'on appelle la station totale, et qui est un peu le standard actuel pour la topographie.

■ ■ ■ Il existe dans les caves de l'ESGT au Mans un banc d'étalonnage qui permet justement d'étalonner des distancemètres.

Le même principe peut être appliqué non plus à des miroirs, mais à des surfaces naturelles, et l'écho reçu dépend évidemment des caractéristiques de la surface observée. On utilise alors des scanners qui bombardent la surface observée de tirs laser et qui recueillent de grandes quantités d'échos, chaque écho donnant un point en 3 dimensions. Le nuage de points doit ensuite faire l'objet d'une modélisation, consistant à déterminer une surface qui passe à peu près par tous ces points et à laquelle on puisse donner une signification.

Cette technique peut être mise en œuvre au sol (pour lever des façades ou des intérieurs de bâtiments), ou à bord d'un avion ou d'un hélicoptère pour l'acquisition de modèles de terrain, et il faut signaler qu'à l'heure actuelle, c'est la seule technique qui permette de cartographier le sol à travers une épaisse couverture végétale.

Je dois à présent mentionner l'importance croissante qu'a prise la **photographie aérienne** depuis un siècle, aux côtés de la topographie traditionnelle. Le pionnier est Félix Tournachon, plus connu sous le nom de Nadar, qui dans les années 1860 monte en ballon pour photographier Paris, et qui a très bien compris, à en juger par les brevets qu'il a déposés, l'intérêt de la photographie aérienne pour des finalités tant civiles que militaires. En pratique, il faut attendre l'entre-deux-guerres pour que la photographie aérienne se développe, avec le développement de l'aviation et plus récemment du satellite.

Parallèlement, le développement de chambres photographiques dont on maîtrise la géométrie, va permettre la mise en œuvre de la photogrammétrie.

**La photogrammétrie** est une technique qui consiste à mesurer la surface observée à partir de clichés acquis en configuration stéréoscopique, en utilisant d'une part la vision stéréoscopique pour mettre en correspondance les deux images, et d'autre part une modélisation mathématique de la géométrie de prise de vue.

Le matériel utilisé pour ce qu'on appelle la restitution photogramétrique a connu trois générations. D'abord, les restituteurs analogiques, opérationnels depuis les années 1940, qui reconstituent la géométrie de prise de vue par des moyens optiques et mécaniques. Ensuite, les restituteurs analytiques, qui ont pris le relais avec le développement de l'informatique. Enfin, les restituteurs numériques qui tournent aujourd'hui sur PC.

Au-delà de la mesure du terrain, la photogrammétrie permet de redresser des photographies pour les rendre superposables à des cartes. En effet la photographie présente au départ des déformations qui font qu'elle n'a pas une échelle constante, d'une part à cause du relief, d'autre part à cause de l'inclinaison de l'axe de visée. La connaissance des paramètres de prise de vue, et du relief sous la forme d'un modèle numérique de terrain, permet ainsi de corriger ces déformations et d'obtenir une orthophoto, un produit qui a la radiométrie (ou si vous préférez la couleur) de l'image qui lui a

donné naissance, mais qui a la géométrie d'une carte. Je reviendrai sur les vertus de ce produit.

Dans la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, on a vu se développer aux côtés de la photographie traditionnelle, une multitude de capteurs de **télé-détection**, embarqués sur avion ou satellite, qui permettent de déduire les propriétés d'un objet éloigné à partir de l'énergie électromagnétique qu'il émet ou qu'il réfléchit. La variété de ces capteurs peut être décrite en termes de longueur d'onde. Chaque type de surface a un certain comportement spectral, c'est-à-dire une aptitude à réfléchir ou émettre chaque longueur d'onde, et chaque capteur effectue des mesures dans certaines longueurs d'onde qui seront adaptées à l'étude de certains milieux et pas à d'autres, le but étant à chaque fois de donner une signification géographique au signal. Je cite rapidement les capteurs optiques qui ne font que généraliser la photographie traditionnelle en débordant notamment sur l'infrarouge pour être plus sensibles à la végétation, les capteurs thermiques qui sont sensibles à la température de la surface, enfin les capteurs radar très sensibles à la géométrie du terrain, ce qui les rend très intéressants pour la cartographie, en plus de leurs capacités dites "tout temps" car un radar peut fonctionner de jour comme de nuit et n'est quasiment pas affecté par les conditions météorologiques.

Parmi les capteurs de télé-détection, le géomaticien est évidemment sensible à l'intérêt de ceux qui organisent le signal reçu sous la forme d'une image en deux dimensions, de sorte qu'à la mesure physique qui peut aider à identifier la nature d'un objet, s'ajoute une information géométrique qui nous renseigne sur sa forme et sur ses dimensions. Le traitement d'images vient donc compléter la physique de la mesure.

L'analyse des images impose, comme pour la topographie, une étude des effets de l'atmosphère sur la propagation de la lumière, notamment la diffusion. On sait que la couleur du ciel est un indicateur de sa composition, comme nous le rappelle une multitude de dictons populaires. Quand on regarde la Terre depuis l'espace, donc de haut en bas, on ne voit pas la couleur du ciel mais la couleur de la terre est altérée par l'atmosphère et il convient donc d'étudier les phénomènes atmosphériques pour débarrasser la couleur de leur influence.

En ce qui concerne la résolution des images de satellites, c'est-à-dire le plus petit détail qu'on puisse séparer de son voisin, elle est longtemps restée cantonnée entre 10 et 30 m, mais depuis quelques années, des résolutions de l'ordre du mètre qui auparavant étaient réservées aux satellites militaires, ont fait leur apparition dans le domaine civil et les images acquises par satellites sont devenues comparables à celles acquises par avion. D'une image acquise par satellite avec une résolution métrique, il est très difficile de savoir si elle est acquise par satellite ou par avion, cela devient transparent pour l'utilisateur. Une seule différence subsiste quand même : la possibilité d'accéder au produit en un temps donné reste tributaire de contraintes orbitales.

Une autre branche importante de la géomatique est la **géo-statistique**. Développée au départ pour les besoins de la pros-

peption minière, c'est un peu l'art de décrire des phénomènes spatialement continus à partir de mesures ponctuelles. Elle permet de caractériser la variabilité de phénomènes géographiques au moyen d'indicateurs, qui distinguent un phénomène très régulier donc prévisible, d'un phénomène irrégulier donc imprévisible. On fait de la géostatistique comme on fait de la prose, et quand vous écoutez les informations, elle est sous-jacente quand on vous parle de la météo, des embouteillages ou du résultat des élections, et l'on essaie à chaque fois de donner une signification macroscopique à des variables géographiques qui sont localement extrêmement chaotiques. Pour revenir à la cartographie, la géostatistique fournit des critères pour adopter une stratégie d'échantillonnage, c'est-à-dire pour sélectionner le meilleur ensemble de points permettant de décrire une surface, ou inversement, pour reconstituer une surface continue à partir d'un semis de points, en obéissant d'une part à ces mesures ponctuelles dont on n'a pas le droit de trop s'écarter, et d'autre part à des règles générales qui gouvernent l'organisation spatiale du phénomène – et si je prends l'exemple du relief terrestre, ces règles nous disent notamment que les rivières descendent, ou que les pentes abruptes sont rares en raison de leur instabilité.

Enfin, parmi les branches de la géomatique, celle qui va le plus loin vers l'utilisateur, qui est un peu la partie émergée de l'iceberg, c'est le **système d'information géographique**. Un SIG est constitué, pour simplifier, d'une base de données géoréférencée, d'un langage qui interroge les données, et d'un certain nombre d'accessoires en particulier graphiques, qui ont repris les principes sémiologiques de la cartographie classique en termes de communication, avec bien sûr, infiniment plus de possibilités, notamment la possibilité, pour chaque utilisateur, d'imposer ses propres préférences. Dans cette base de données, on va voir cohabiter des données vecteur (faites de points, de lignes et de polygones), et des données raster (faites de pixels, qui peuvent être typiquement des photographies ou des cartes scannées), le tout étant superposable point à point, comme ce plan cadastral superposé à une orthophoto. Je précise que la notion de superposabilité n'a de sens que dans un monde analogique, c'est-à-dire sur le papier ou à l'écran, et que dans le monde numérique elle n'est que virtuelle. Je veux seulement pouvoir récupérer toutes les informations relatives à un même point, quelle que soit la manière dont elles sont stockées.

Cet outil a eu rapidement un immense succès auprès des gestionnaires du territoire notamment les collectivités. Il a donc joué un rôle très important dans un contexte de décentralisation. Cependant, la chronologie de son développement n'a pas été optimale, car les SIG ont été livrés à d'innombrables utilisateurs avant d'avoir atteint une totale simplicité d'usage, et l'on a vu des utilisateurs de ces systèmes être détournés vers des préoccupations informatiques qu'ils n'avaient pas soupçonnées, qui font qu'ils ont souvent géré leurs données au lieu de gérer leur territoire.

Enfin, je voulais relever un paradoxe : de toutes les techniques que j'ai citées, le SIG est la seule qui soit postérieure à la révo-



**Superposition d'un plan cadastral et d'une orthophoto dans un SIG.**

lution numérique, mais paradoxalement, elle semble avoir du mal à se débarrasser des principes de la cartographie papier. J'en citerai deux symptômes.

- Les SIG imposent souvent une conception statique du territoire, alors que les gestionnaires de l'environnement ont besoin de se projeter dans le futur pour évaluer l'impact à venir des changements qui s'opèrent aujourd'hui. La superposabilité des différentes couches d'information devrait être conçue non pas en 2 ou 3 dimensions, mais en 4 dimensions, si l'on veut pouvoir prédire des concomitances non seulement spatiales mais aussi temporelles.
- Deuxième symptôme : les SIG affectionnent les paysages structurés, dans lesquels les parcelles ont des limites discontinues et des contenus homogènes. C'est très commode pour la programmation qui manipule des objets, chaque parcelle étant en effet un objet avec des attributs et des relations topologiques avec ses voisins, mais c'est très mal adapté pour beaucoup de paysages naturels. On peut dire, là encore, que le SIG transpose sous forme numérique la conception géométrique qui a toujours prévalu dans les cartes papier.

Ayant survolé les principaux domaines techniques qui constituent ce qu'on appelle aujourd'hui la géomatique, je voudrais à ce stade ouvrir une parenthèse, et signaler une propriété extrêmement intéressante de la surface terrestre que la géomatique utilise toujours, au moins de manière implicite. C'est que la Terre, que l'on pourrait considérer comme un objet en 3D, est en réalité un objet en 2D1/2. Ce qui signifie qu'à toute

■ ■ ■ position horizontale de coordonnées (x, y) correspond une seule valeur de l'altitude z. La surface terrestre a donc cette vertu du bas-relief qui regardé de face ne présente aucune partie cachée. C'est vrai pour le relief naturel, à l'exception de rares surplombs. Le milieu urbain également fait exception, et l'on est bien content s'il pleut de pouvoir s'abriter sous un porche.

Cette propriété est due à la masse gigantesque de la Terre qui, à la différence des petits astéroïdes, attire toute chose vers son centre avec une force à laquelle les matériaux ne résistent pas longtemps. C'est donc la gravité qui confère à la Terre cette forme sphérique et n'a de cesse de l'entretenir, aidée en cela par les phénomènes d'érosion.

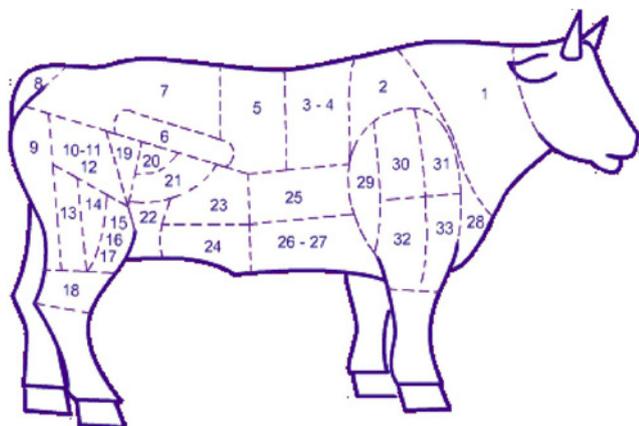
Cette propriété est très intéressante, car elle permet de séparer la troisième dimension, qui fait l'objet du nivellement, des deux premières. Et ce sont ces deux coordonnées dites géographiques (parmi lesquelles la rotation de la Terre permet en outre de distinguer spontanément une latitude et une longitude), que l'on a appris depuis plusieurs siècles à associer aux coordonnées planes de la carte, en les projetant sur une surface plane ou du moins que l'on pourra rendre plane sans déformation, ni déchirure.

Cette vertu de la Terre se retrouve dans d'autres objets, et de même que la Terre présente une symétrie sphérique, le bœuf, dont la carte est exposée chez votre boucher, présente une symétrie plane. Il a un avant et un arrière, et une forme convexe et symétrique qui permet, par une projection simple, de représenter la totalité de sa surface sur une feuille de papier en deux dimensions.

Je referme cette parenthèse pour évoquer à présent les thèmes qui font l'objet de recherches en géomatique.

## La recherche en géomatique

Je rappelle qu'à la géographie qui vise à comprendre les phénomènes qui sont à l'œuvre à la surface de la Terre, la géomatique, que je viens de vous présenter sous un angle technique, rajoute un outillage qui est sans cesse perfectionné, faisant l'objet de recherches technologiques. La géomatique, même si elle est une facette de la géographie, relève donc de ce que la nomenclature en vigueur appelle les sciences pour l'ingé-



Exemple d'un objet en 2D 1/2 : le bœuf

nieur. Mais alors, quel genre de recherche faisons-nous ? Il me semble que la question de la limite entre recherche technologique et fondamentale est un peu mystificatrice et pour tout dire néfaste. C'est cette question qui a valu à Galilée les ennuis que nous savons, car s'il avait le droit de faire de la recherche technologique en perfectionnant sa lunette, il n'était pas question de déchiffrer les intentions du Créateur. Pour la géomatique qui s'intéresse d'abord à l'outil je revendique donc, autant que de besoin, un droit d'incursion dans le champ de l'objet d'étude, car on peut difficilement mettre en œuvre une surveillance ou une modélisation d'un environnement que l'on est pas, déjà, en train d'étudier.

Cette vision schématique me permet de mentionner des pistes de recherche de trois types différents.

1. Des recherches sur l'outil, qui visent à tirer parti d'évolutions technologiques dans le domaine des satellites, de l'informatique, de l'optique, de l'électronique etc. par des ajustements incessants des méthodes géomatiques. Ces travaux sont souvent stimulés par la volonté d'automatiser des processus de mesure ou de cartographie, et ils peuvent donner lieu, typiquement, au développement d'instruments robotisés ou de logiciels de traitement.
2. Des travaux dans lesquels les méthodes géomatiques sont mises au service de programmes de recherche en sciences de la Terre ou de l'environnement, des programmes qui visent généralement à mettre en évidence des phénomènes géophysiques, biologiques ou sociaux. Dans ce cas le rôle de la géomatique est non seulement de fournir des données, mais de contribuer à l'élaboration de modèles mathématiques où cohabitent les influences de l'instrument et du milieu observé sur la mesure obtenue. La difficulté consiste alors à débarrasser le signal qu'on prétend décrypter, des traces que le système de mesure aurait pu y laisser.
3. Je voudrais insister sur les recherches qui se situent à l'interface et qui visent, en quelque sorte, à fluidifier cette boucle vertueuse par laquelle la connaissance de l'environnement et les performances des outils s'alimentent mutuellement.

Je voudrais en donner deux exemples :

Premier exemple : l'observation de grandeurs non observables. Cartographier le sol quand on ne voit que la canopée forestière ; cartographier le fond de la mer quand on ne voit que la surface ; cartographier la densité de population quand on ne voit que la densité des constructions ; c'est possible dans une certaine mesure grâce à une judicieuse collaboration entre télédétection et géostatistique, utilisant, d'une part, la mesure abondante d'une grandeur observable (en l'occurrence par télédétection), d'autre part un lien présumé entre les deux grandeurs, et enfin une connaissance partielle de la grandeur non observable sous la forme de quelques valeurs et d'un comportement théorique.

Deuxième exemple : un problème récurrent, transversal à toutes les branches de la géomatique, le problème du changement d'échelle. Quelle échelle d'observation choisir pour détecter un phénomène ? Quelle échelle d'affichage pour le



**A gauche un lotissement ou des maisons (cliché IGN)  
A droite un portrait d'homme ou un panier de légumes  
(peinture de Giuseppe Arcimboldo)**

rendre compréhensible ? Comment faire un zoom dans une image ? L'échelle d'observation a-t-elle un impact sur ce que l'on voit ? Lorsqu'on nous parle d'un changement global, n'est-ce pas la conclusion d'une série d'observations qui s'étalent sur plusieurs décennies avec des instruments sans cesse plus résolus ? Alors, comment savoir si ce changement d'échelle n'a pas influencé nos conclusions ?

Comment transférer d'une échelle à l'autre le sens de la carte ? C'est le problème classique de la généralisation cartographique qui vise à automatiser la réduction d'échelle d'une carte. On imagine parfois qu'on voit mieux en se rapprochant. Je crois plutôt qu'on ne voit pas la même chose. Dans cette photographie aérienne, vous voyez des maisons si vous êtes au premier rang, et un lotissement si vous êtes au dernier rang. De même que dans cette peinture d'Arcimboldo, ceux du dernier rang voient le portrait d'un homme, tandis qu'au premier rang, nous reconnaissons un panier de légumes. Vous voyez donc que l'on donne spontanément au paysage des noms qui dépendent de l'échelle, et que le problème du changement d'échelle est donc, également, un problème linguistique. La géographie classique, descriptive, dotée d'un riche vocabulaire, n'a pas trop de mal à naviguer d'une échelle à l'autre, et elle peut inspirer la cartographie qui doit, quant à elle, renouveler ses symboles à chaque changement d'échelle.

Je ferai une dernière observation sur la recherche en géomatique, c'est que cette discipline est un formidable moteur pour l'interdisciplinarité après laquelle courent tous les chercheurs. Lorsqu'on s'intéresse par exemple, à des phénomènes géophysiques comme des déformations annonciatrices de séismes ou d'éruptions volcaniques, ou l'élévation du niveau moyen des océans, il est clair qu'entre la mise en évidence de ces phénomènes, leur modélisation, leur cartographie, l'étude de leur impact socio-économique et leur communication à l'adresse du grand public, la géomatique va intervenir à toutes les étapes, faisant le lien entre la physique du globe et les sciences humaines.

Vous voyez donc à partir de ces quelques exemples que la géomatique est un domaine extrêmement fécond en matière

de recherche, mais qu'aucun développement technologique en la matière ne pourrait se passer des lumières de la géographie classique.  
Voyons à présent quels sont les usages de la géomatique.

## Les usages de la géomatique

Historiquement, les techniques géographiques sont en grande partie tournées vers des usages militaires, des levés de fortifications à la célèbre carte d'état major – et je rappelle que l'IGN n'est civil que depuis 1941 et que dans un certain nombre de pays la cartographie officielle incombe encore à la défense.

Je citerai d'autres usages traditionnels comme le cadastre, la cartographie géologique et minière, et l'aide à la navigation ou à la circulation routière. Dans tous ces domaines, on a vu cohabiter un usage professionnel et un usage grand public, comme nous le rappelle le cadastre que l'on trouve dans toutes les mairies, et la carte routière que l'on trouve dans toutes les boîtes à gants. Je rappelle par ailleurs que tous ces usages ont récemment connu le transfert de la cartographie papier vers des supports numériques. En particulier, le cadastre sera avant la fin de cette année accessible via internet à tout citoyen, ou plus exactement à tout internaute.

La photographie aérienne a sans doute contribué à diversifier les domaines d'utilisation de l'information géographique, puisqu'une même image nous montre le relief, l'eau, la végétation, les infrastructures et bien d'autres choses, et la géomatique avec toutes ses fonctions techniques que je citais tout à l'heure, et venue se mettre au service de l'agriculture, de l'urbanisme, de l'écologie, de la gestion des risques et de nombreux secteurs professionnels qu'il serait trop long d'énumérer.

Pour répondre à des besoins aussi variés on a vu se constituer des bases de données, qui sont à la fois des normes et des produits. La constitution et la gestion de telles bases de données incombe assez naturellement aux pouvoirs publics. En France, le gouvernement a confié à l'IGN la réalisation d'un certain nombre de bases de données qui héritent peu ou prou des contenus des cartes papier existantes. A une échelle plus locale ou dans des domaines plus spécifiques, on voit des collectivités, des gestionnaires de réseaux, des coopératives d'exploitants agricoles ou forestiers, constituer des bases de données géographiques qui n'ont aucune raison de suivre toutes les mêmes spécifications. Il existe alors une demande pour une aide à la maîtrise d'ouvrage, qui fait en quelque sorte l'interface entre des ressources techniques et les besoins d'un gestionnaire. C'est un peu un nouveau métier qui se développe.

Sur les usages je n'en dirai guère plus, si ce n'est pour signaler deux grandes tendances.

La première tendance est que la géomatique s'ouvre de plus en plus aux grandes questions d'environnement et de société, et vous trouverez rarement un sujet d'actualité où elle n'ait pas son mot à dire. Le Tour de France et le Paris-Dakar certes, mais aussi la grippe aviaire, les OGM, la crise du Darfour ou une

■ ■ ■ marée noire. La misère et la maladie ont des stratégies géographiques, des stratégies de champ de bataille, et la géomatique peut nous aider à les comprendre pour mieux les combattre, surtout si notre intention de les combattre est sincère. La seconde tendance est que la géomatique a récemment fait irruption dans la vie des citoyens, donnant lieu à un usage populaire de l'information géographique. Cela ne va pas sans quelques contraintes liées notamment à la protection de la vie privée, mais nous pouvons constater que l'information géographique se démocratise dans le sens plein de ce terme. N'oublions pas que la carte est classifiée dans les régimes totalitaires. Le levier de cette évolution est la géomatique en tant qu'outil, et sa conséquence est une meilleure connaissance du territoire par ses habitants.

Par exemple, la collaboration du GPS et du SIG permet aujourd'hui de guider les automobilistes avec une assez grande fiabilité et pour un prix modique. Par ailleurs, tout est prêt techniquement pour que tout citoyen ait accès à une information géographique de qualité raisonnable en tout point du globe – du moins une information statique et en lecture seule. Les obstacles éventuels à cette consultation générale sont d'ordre économique et juridique plutôt que technique, et les initiatives qui réussissent sont celles qui ont eu les moyens de dépasser ces obstacles. La première initiative de grande envergure, Google Earth, date d'il y a deux ans. D'autres initiatives ont suivi, comme le Géoportail de l'IGN.

Enfin, l'orthophoto qui tend à supplanter la carte traditionnelle pour des raisons économiques, puisque sa fabrication est moins coûteuse au km<sup>2</sup>, présente également une vertu importante pour le grand public.

La carte, chargée de symboles, est conçue conformément à la perception qu'a le cartographe du territoire, tandis que l'orthophoto est compatible avec toutes les perceptions. Elle ne peut pas mentir, et cette absence de suspicion en fait un document très intéressant pour les déclarations agricoles, pour les enquêtes publiques ou toute autre confrontation entre le citoyen et l'administration portant sur l'environnement.

C'est la seule couche d'information dans une base de données géographiques, qui puisse être lue par une personne dépourvue de toute culture technique, par une personne analphabète, par un enfant. Les Indiens d'Amazonie, qui ne reconnaissent pas les limites administratives figurant sur la cartographie officielle, retrouvent dans les images de satellites les limites naturelles qu'ils connaissent, et certains envisagent d'utiliser ces données pour défendre leurs droits territoriaux. L'orthophoto est donc un moteur majeur de la démocratisation de l'information géographique.

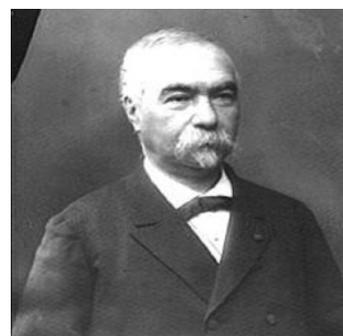
Enfin, dernière question : pourquoi une chaire de géomatique au CNAM ?

## La géomatique au CNAM

Il se trouve que malgré son intitulé contemporain, cette chaire plonge ses racines très profondément dans l'histoire du Conservatoire.

On constate d'abord, au vu de ce que je viens d'exposer, que les sciences géographiques prennent naturellement leur place parmi les arts dont l'abbé Grégoire prétend éclairer la nation lorsqu'il crée le Conservatoire en 1794. Cette période est l'aboutissement du siècle des Lumières au cours duquel on a déterminé la forme aplatie de la Terre et appris à mesurer les longitudes, quelques années avant la création du cadastre napoléonien dont nous célébrons en cette fin 2007 le bicentenaire. C'est aussi en cette période révolutionnaire que les astronomes Delambre et Méchain transportent leurs instruments le long du méridien de Paris entre Dunkerque et Barcelone pour un projet éminemment humaniste qui consiste à définir une unité de longueur universelle, le mètre, comme une fraction du méridien terrestre. C'est une justification que je construis avec 200 ans de retard, mais elle n'aura de cesse de se confirmer.

Dans les années 1850 un officier de l'armée française, Aimé Laussedat, a l'idée d'utiliser des photographies de paysages non seulement pour observer le terrain mais aussi pour le mesurer. Il met ainsi au point une technique qui s'appellera plus tard la **photogrammétrie**.



**Aimé Laussedat (1819-1907)**

Laussedat est professeur au CNAM en 1873, titulaire de la chaire de géométrie appliquée aux arts où il est souvent question de topographie, et celui que l'on peut considérer comme l'inventeur de la photogrammétrie sera même directeur du Conservatoire de 1881 à 1900. Il disparaît en 1907 sans avoir connu la photogrammétrie aérienne qui va se développer entre les deux guerres, et dans les années 1930 c'est à nouveau un directeur du CNAM qui va jouer un rôle majeur dans le développement de ces techniques et dans leur transfert de la recherche vers l'industrie, Louis Raguey. Passionné par les sciences géographiques, il participe lui-même à tous les congrès de photogrammétrie dont il rend compte au Conseil de Perfectionnement, et en 1937, il crée une chaire de photogrammétrie et recrute l'hydrographe Henri Roussilhe.

Pour équiper un atelier de photogrammétrie, Roussilhe va demander des sommes colossales que le Conservatoire n'aura pas les moyens de lui offrir. Je rappelle pour rassurer la direction du CNAM que la géomatique utilise aujourd'hui des PC. Roussilhe arrive néanmoins à s'équiper grâce des soutiens extérieurs, notamment le Ministère de l'air et la profession des géomètres-experts qui n'est pas encore un Ordre. Et justement, c'est encore Louis Raguey qui sera en 1946 l'artisan de la création de l'Ordre des Géomètres-Experts, une reconnaissance que la profession réclame depuis un siècle.

Il existe alors un diplôme de géomètre-expert depuis 1929, mais la profession a besoin d'augmenter la cadence de la formation. Le CNAM crée d'abord un Institut de Topométrie en



**Le premier Conseil Supérieur de l'OGE en 1946 (au premier plan à gauche, Louis Ragey, directeur du CNAM, commissaire du gouvernement auprès de l'Ordre).**

1939, avec des cours du soir pour les parisiens et des cours par correspondance pour les provinciaux, mais cet institut est loin de couvrir les besoins de la profession. A la fin de la guerre, le Comité Central Interministériel des Travaux Géographiques, qui est chargé de normaliser les travaux géographiques entrepris par les services publics (c'est donc l'ancêtre du CNIG) reconnaît d'une part le manque de géomètres face aux besoins de la reconstruction et de l'agriculture, et d'autre part la nécessité d'utiliser des méthodes plus précises et plus rapides. C'est une allusion claire à la photogrammétrie, et c'est donc à Louis Ragey, directeur du CNAM, qu'est confiée en 1946 la mission de créer l'ESGT, qui reste aujourd'hui encore la principale voie d'accès à la profession de géomètre-expert.

L'Ordre des Géomètres-Experts et l'ESGT sont donc nés la même année, et du même père.

En 1940 le général Louis Hurault parvient en quelques mois à dissoudre le Service Géographique de l'Armée, et à créer l'IGN dont il sera le premier directeur. Les statuts de l'IGN qui sont signés en avril 1941 mettent en place l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG). Dès sa création en 1946, l'ESGT pourra bénéficier de l'équipement technique de l'ENSG, et soixante ans plus tard, les deux écoles envisagent une collaboration plus rapprochée encore.

Après la guerre, la chaire de photogrammétrie, laissée vacante par Roussilhe malade, accueille un nouveau professeur titulaire, Georges Poivilliers, inventeur d'instruments qui seront utilisés dans le monde entier pendant un demi-siècle, Poivilliers qui sera membre puis président de l'Académie des Sciences. C'est donc dans un contexte intellectuel extrêmement propice que l'Institut de Topométrie puis l'ESGT sont créés.

Aujourd'hui, la chaire de géomatique qui vient d'être créée et qui est domiciliée dans les locaux de l'ESGT au Mans, vient prendre sa place dans cette histoire. Depuis l'époque de

Poivilliers, on a vu entrer en scène le satellite et l'ordinateur. Plus récemment, le GPS, la photographie numérique et une informatique légère et bon marché viennent bousculer la manière de travailler et la structuration du marché de l'emploi. Compte tenu de ses missions et de ses relations avec les milieux professionnels, le CNAM se doit, au travers de sa chaire de géomatique, d'évaluer ces impacts et de proposer des formations adaptées, tenant compte à la fois des besoins immédiats des professionnels et des grands enjeux écologiques et sociaux des prochaines années. L'ESGT se consacrant à la formation d'ingénieurs, la chaire de géomatique se consacra à d'autres diplômes, dans le domaine de la géomatique appliquée notamment à l'aménagement foncier.

Malgré une implantation provinciale, un rapprochement avec l'IGN est en train de se réaliser par le biais des formations d'ingénieur. Un autre rapprochement devra être entretenu, avec la géographie enseignée à l'université, souvent peu outillée mais sans laquelle la géomatique se limiterait à la sécheresse d'une série de mesures.

Quel est l'avenir de la géomatique ? Comme vous, je l'ignore. Je propose modestement de poursuivre l'œuvre de mes prédécesseurs en inculquant aux futurs géomètres les fondements théoriques qui leur permettront de faire face aux mutations technologiques à venir, en faisant fructifier l'héritage historique que je viens d'évoquer succinctement, et en rappelant aux apprentis que la technique ne résout pas tout, et qu'en matière d'aménagement du territoire, le meilleur choix peut aussi être inspiré par le respect de la nature et la convivialité entre les hommes. On peut ainsi espérer que ces géomètres qui auront dessiné de nouveaux paysages sauront, le moment venu, poser leurs outils, comme le sculpteur légendaire Pygmalion avait posé ses outils pour se délecter de son œuvre. ●

## Remerciements

Je voudrais tout d'abord exprimer ma reconnaissance à la direction du Conservatoire National des Arts et Métiers et aux membres de son Conseil de Perfectionnement, pour le témoignage de confiance qu'ils m'ont apporté en me confiant la direction de cette nouvelle chaire de géomatique et de l'École Supérieure des Géomètres et Topographes qui lui est désormais associée. Je remercie également Mme Anny Cazenave, qui m'apporte un parrainage précieux et dont les travaux de recherche sur les applications géophysiques des technologies spatiales, servent un peu de point de mire à la jeune équipe que j'ai maintenant la charge d'animer.

## Contact

**Laurent POLIDORI**

Professeur Titulaire de la Chaire de Géomatique du CNAM

Directeur de l'ESGT

laurent.polidori@esgt.cnam.fr

# L'Ecole Chez Soi s'engage dans "VILLAVENIR"

*"VILLAVENIR" est le nom, on ne peut plus explicite, donné à l'opération de sensibilisation au développement durable que crée la FFB (Fédération Française du Bâtiment) Nord Pas-de-Calais, de janvier 2008 à juin 2009. L'Ecole Chez Soi, partenaire officiel de l'événement, attachée à ces valeurs d'éco-construction marque son implication en tant qu'unique acteur de la formation à distance dans ce secteur.*

**L**e chantier baptisé "VILLAVENIR" est présenté sous forme d'exposition pour accueillir les visiteurs professionnels et le grand public, les jeunes et les familles. Le projet est une première en France : au sein d'un même site à Loos en Gohelle (agglomération de Lens) vont être construites des maisons individuelles à forte performance énergétique issues des dernières techniques de développement durable. L'objectif de l'événement est de sensibiliser et de changer les habi-

tudes des acteurs de demain. Des sociétés attachées aux valeurs de développement durable s'associent à la manifestation en tant que partenaires officiels.

Parmi elles, l'Ecole Chez Soi, unique organisme de formation à distance spécialisé dans les métiers de la construction et du cadre de vie, est consciente de l'enjeu que représente la formation à ces méthodes du futur. Par sa participation, elle tend à sensibiliser dès maintenant ses élèves au sujet et orienter les acteurs de demain vers la formation au développement durable. Au-delà de ce partenariat d'image, l'Ecole compte notamment faire découvrir à ses élèves l'évolution de la construction à travers la réalisation de films et interviews de conducteurs de travaux sur ce chantier. L'objectif est de "rendre accessible le concept d'éco-construction qui est simplement un développement nouveau de la pédagogie" nous explique Laetitia Bourgois, responsable du service pédagogique de l'Ecole Chez Soi.

Être présent autour de ce projet, et être acteur dans l'éducation de ces nouvelles méthodes de travail, tel est le message explicité par ce partenariat. Durant le chantier, l'organisme de



formation à distance fera participer ses élèves aux demi-journées qui seront organisées sur le site de "VILLAVENIR" pour rencontrer et échanger avec les experts sur le terrain, puis en leur permettant de visualiser sur le site de l'Ecole via leur login les séquences les plus significatives. C'est aussi l'occasion pour ce leader de l'enseignement à distance aux métiers de la construction de sensibiliser les entreprises sur l'importance de la formation des salariés à ce nouveau mode de construction.

Des rencontres avec des entreprises de BTP locales seront organisées pour proposer des modules de formation intégrant ces nouvelles normes. Au fur et à mesure, l'Ecole intégrera dans ses cours des chapitres complémentaires traitant du développement durable. Se former à distance à cette problématique est désormais le défi que l'Ecole Chez Soi se lance. ●

► Plus d'informations sur l'Ecole Chez Soi sur [www.ecolechezsoi.net](http://www.ecolechezsoi.net)

Photos : © Jean Daniel Roche



Laetitia Bourgois (responsable pédagogique de l'Ecole Chez Soi), et Jean-François Gorre (responsable du service enseignement emploi formation de la FFB Nord Pas-de-Calais) devant la maquette du projet "VILLAVENIR".



# 4<sup>e</sup> Forum de la TOPOGRAPHIE organisé par L'AFT et L'ESTP

le jeudi 27 mars 2008 à partir de 9 h  
à l'ESTP - 28, av. du Président-Wilson - 94234 CACHAN

L'éditorial a largement présenté l'esprit et le contenu technique du 4<sup>e</sup> Forum de l'AFT. Pour en parfaire la réussite, l'association a tenu à le préparer en dédiant aux SIG, à titre principal, le présent numéro d'XYZ. Il doit sensibiliser les lecteurs et participants au thème qui sera traité le 27 mars 2008 à l'ESTP de Cachan. Ce dossier spécifique illustre successivement le panorama de l'existant et son contexte, la théorie qui fonde l'insertion de la troisième dimension, la méthodologie qui se dégage et s'impose dans la mise en œuvre et les applications déjà opérationnelles.

Le 4<sup>e</sup> Forum propose trois conférences. Dans un premier temps, sous le titre "La 3D dans les SIG : nouvelle dimension émergente" Mathieu Koehl, maître de conférences à l'INSA de Strasbourg, présentera une vue d'ensemble des SIG d'aujourd'hui et le cadre de la 3D généralisée. Ensuite, Patrick Leboeuf, chef du service Information en ligne de l'IGN, exposera, sous le titre "La 3D du Géoportail : Intérêts et perspectives", toute la valeur ajoutée que l'on peut attendre des nouveaux outils non sans avoir balayé au préalable les différents référentiels présents en 3D. Enfin Franck Perdrizet, chef du service municipal d'informations géographiques de la ville de Montpellier fera connaître le projet SIGMA mis en œuvre dans l'agglomération de la préfecture de l'Hérault. SIGMA met en place un ensemble de solutions innovantes permettant la visualisation du territoire en 2D, en 3D jusqu'à introduire la quatrième dimension, le temps.

La journée d'études est complétée par une exposition rassemblant de nombreux professionnels qui offrent matériels et solutions informatiques. Leur participation permet la réalisation du forum, qu'ils en soient remerciés. Au fil des stands, les participants rencontreront ATLOG, ATM3D, BIONACTIS, CADDEN, CORRELANE, FARO, GEOMEDIA, GEOSYSTEMS FRANCE, JSINFO, LEICA, MAURY, SOKKIA, SPACEYES, STAR APIC, TECHNODIGIT, TOPCON et TRIMBLE. L'AFT donnera à ceux qui le désirent la possibilité d'intervenir à la tribune pour faire connaître, de façon concise, l'avancement de leurs produits et solutions en matière de 3D. La présence de l'Ordre des géomètres, de l'AFIGÉO et de GEOREZO élargit le salon et permettra, notamment au public étudiant, de faire mieux connaissance avec la profession.

En fin d'après-midi, un cocktail réunira les participants pour un moment convivial.

**Rendez-vous au 4<sup>e</sup> Forum. Inscriptions par Internet à l'adresse "[www.aftopo.org](http://www.aftopo.org)"**

# 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,



© P. MULLER (2006).

Figure 2. Exemple de banlieue californienne.



© P. MULLER (2006).

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

- 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



► 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.

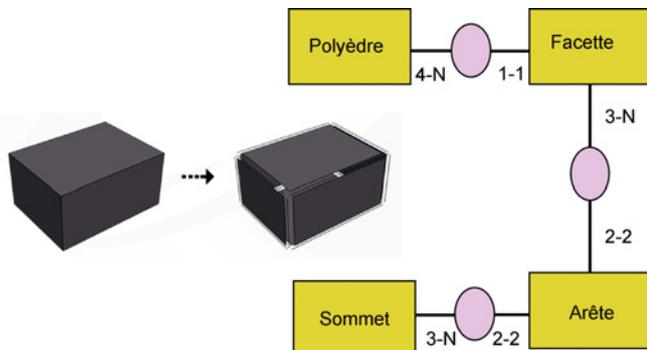


Figure 4. Modèle simplifié (entité-association) de bâtiments sous forme de polyèdres.

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 CityGML<sup>1</sup>

Lancée par un groupe d'Allemands (Geodata Infrastructure North-Rhine Westphalia<sup>2</sup>), 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 (OGC<sup>3</sup>) 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-Tool<sup>4</sup> et Aristoteles<sup>5</sup>.

(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>

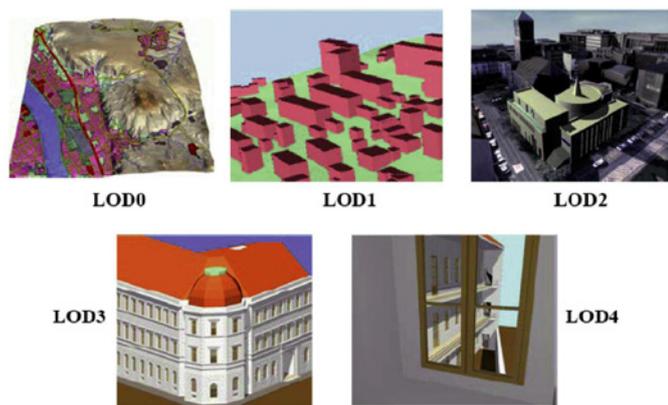


Figure 6. Exemple de niveaux de détails (LoD) proposés par la norme CityGML.

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 Earth<sup>6</sup> qui a été téléchargé 250 millions de fois. Les utilisateurs de Google Earth ont apporté leur contribution (images, modèles 3D, ...) au logiciel<sup>7</sup>. 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/>

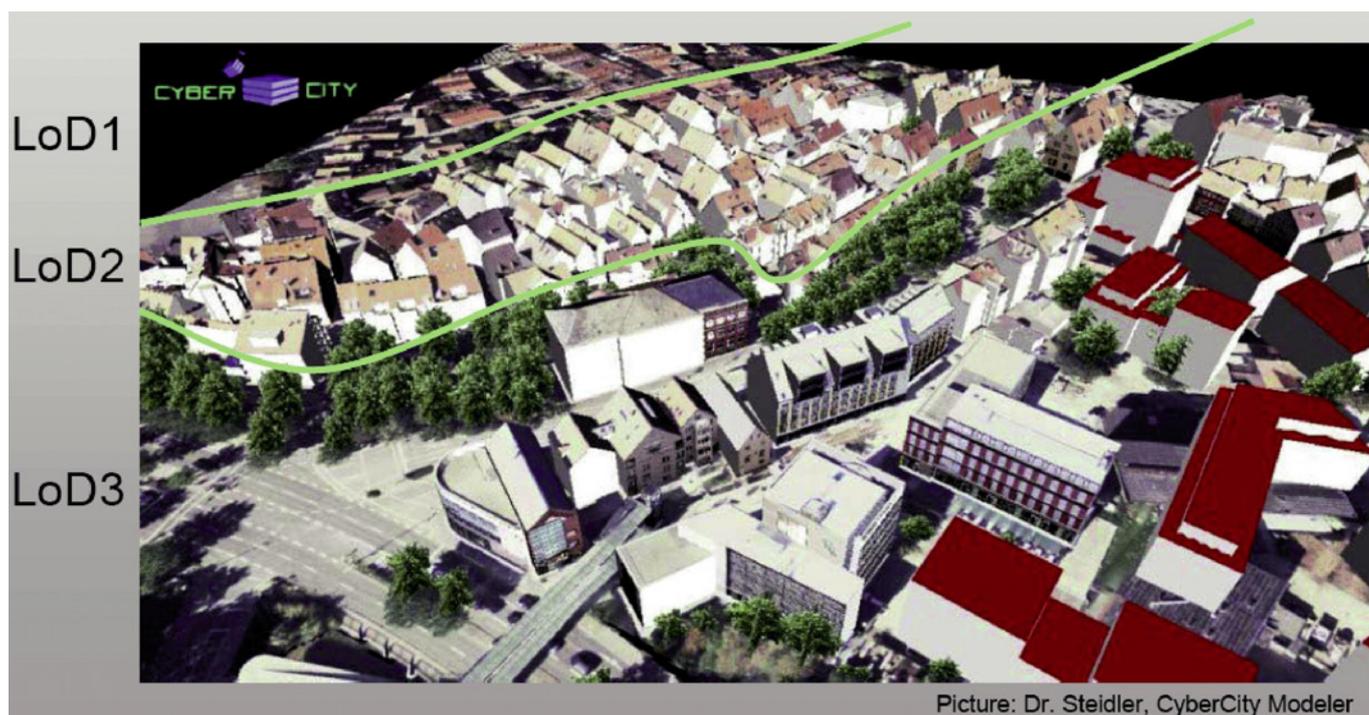
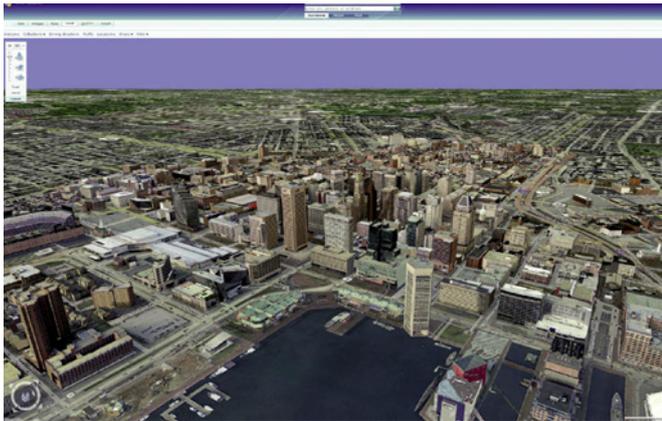


Figure 7. Intégration de différents niveaux de détails selon la distance.



**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 Vexcel<sup>8</sup> 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 Earth<sup>9</sup> 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<sup>e</sup> 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'UDMS<sup>10</sup> 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., Waldaeusl, 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. Zlatanova, 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 IAST<sup>1</sup>, 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<sup>e</sup> 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 IHM<sup>2</sup>, 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 HBDS<sup>3</sup>. Celui-ci repose sur six TAD<sup>4</sup> 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 "légo" 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 "sommets", "arc", "domaine", "point annexe", "point complémentaire"), ainsi que diverses hyperclasses : CL, MPA, MPC, MS (pour "composant linéaire", "mobilier de point annexe", "mobilier de point complémentaire", "mobilier de sommet"). Les diverses hyperclasses de mobilier sont elles-mêmes regroupées au sein d'une hyperclasse commune,

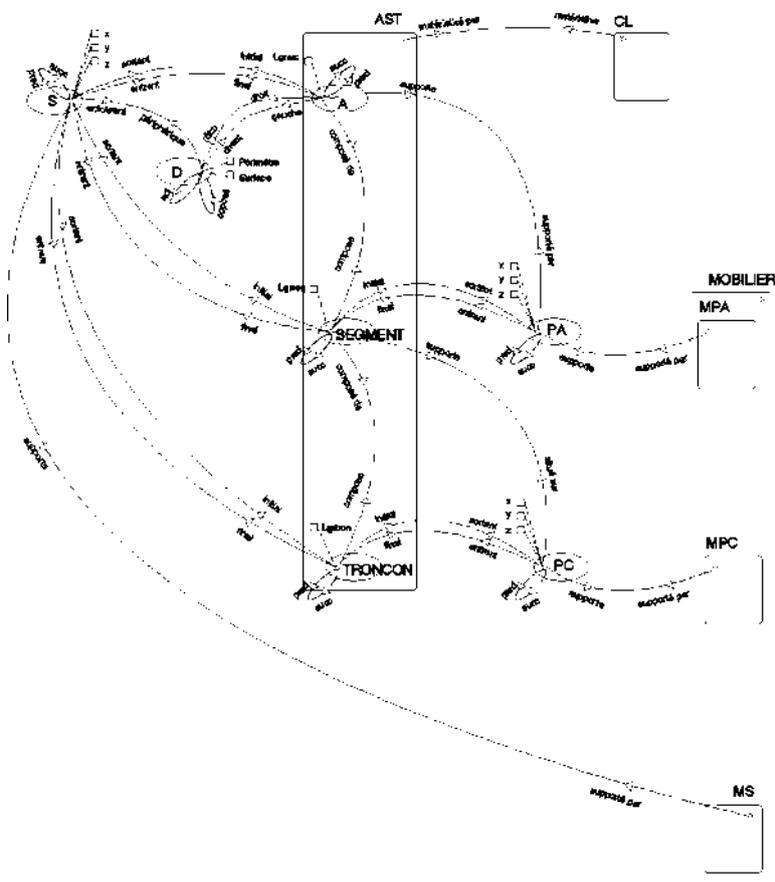


Figure 1. Le prototype réseau.

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<sup>5</sup>, 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).

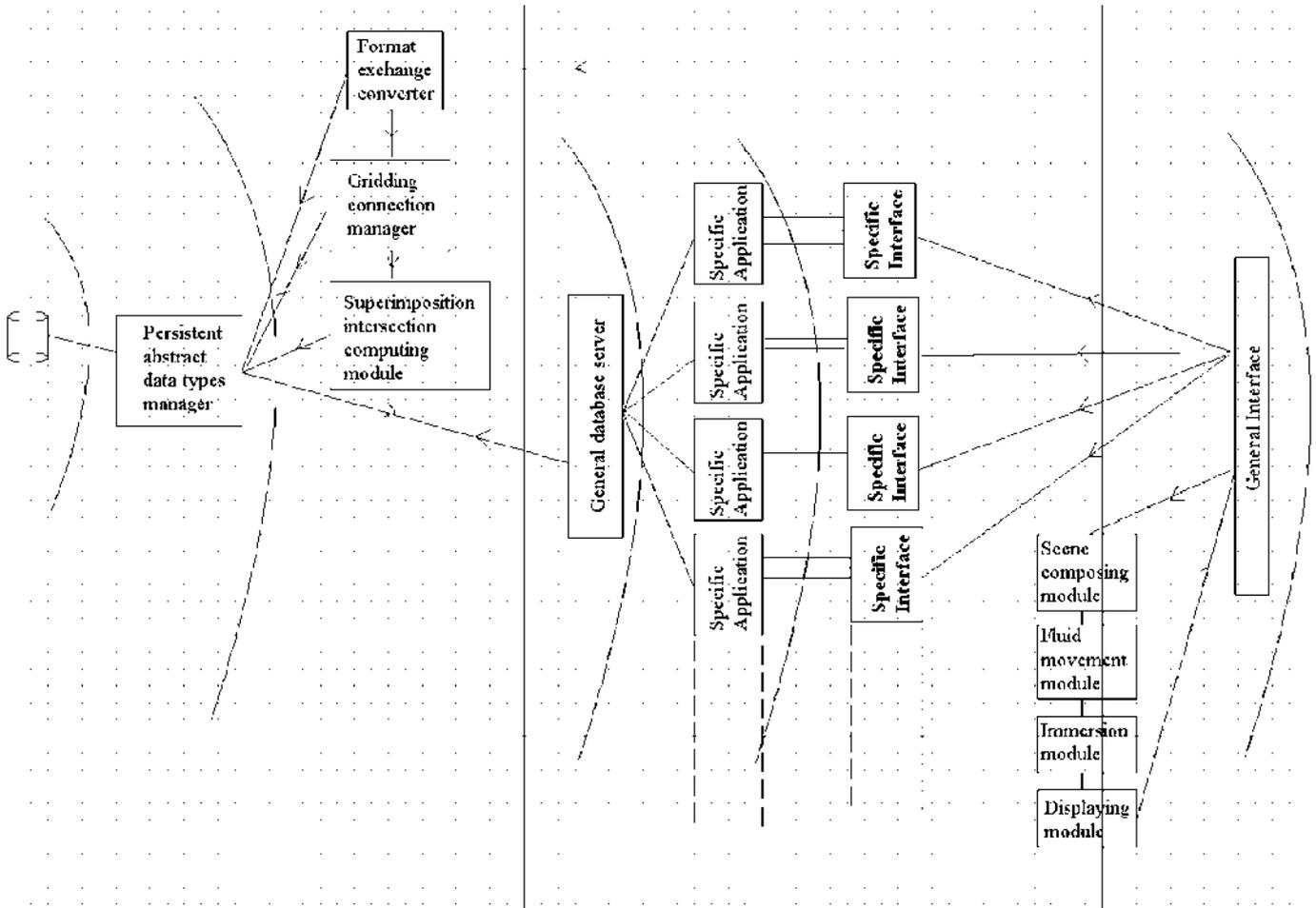


Figure 2. Architecture logicielle sommaire du projet (in Bouillé, Conf. Hong-Kong).

- ▶ - 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.

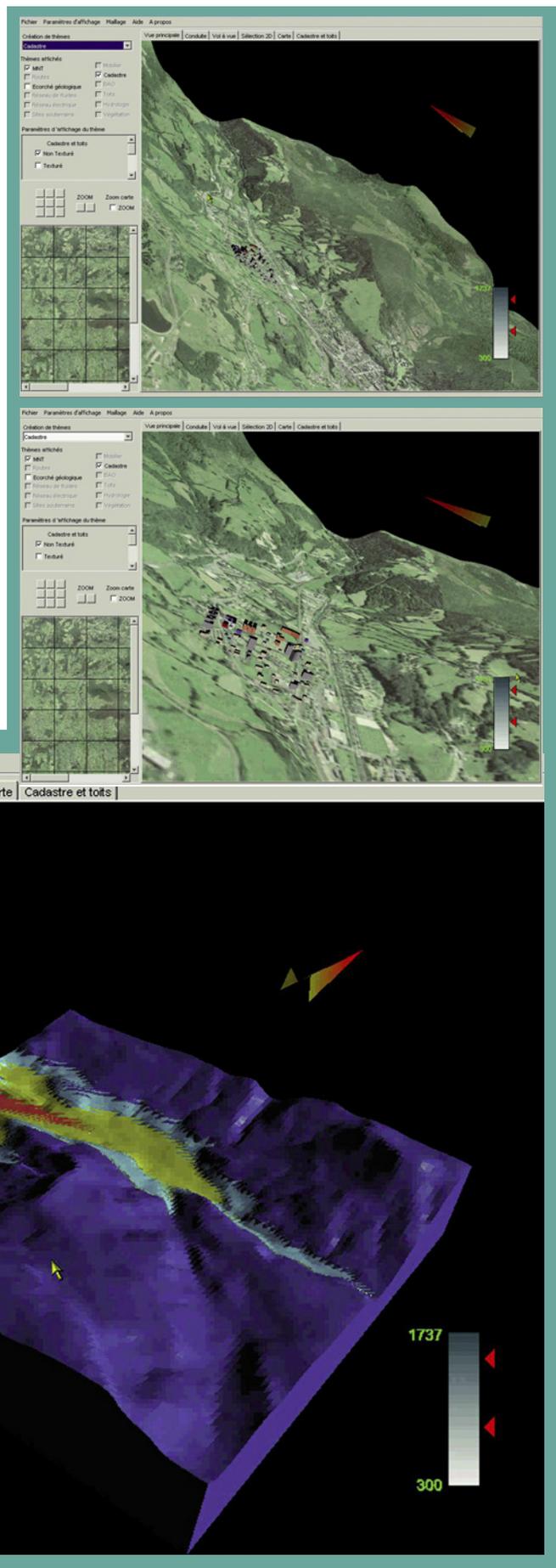
Ces algorithmes doivent pouvoir être enchaînés à l'étape de la programmation sans que l'on découvre alors, beaucoup trop tard, des incompatibilités.

## 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.



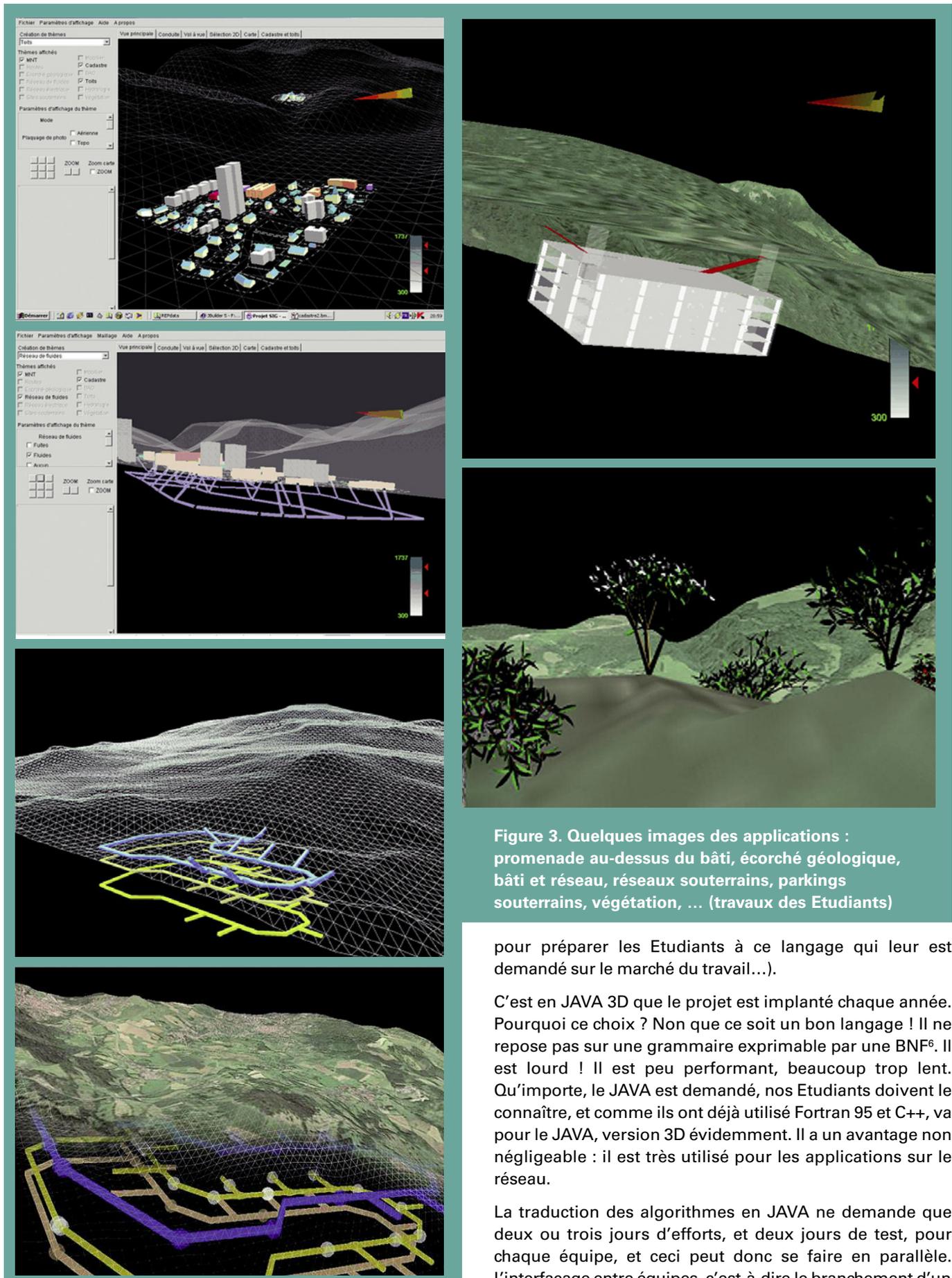


Figure 3. Quelques images des applications : promenade au-dessus du bâti, écorché géologique, bâti et réseau, réseaux souterrains, parkings souterrains, végétation, ... (travaux des Etudiants)

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 BNF<sup>6</sup>. 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

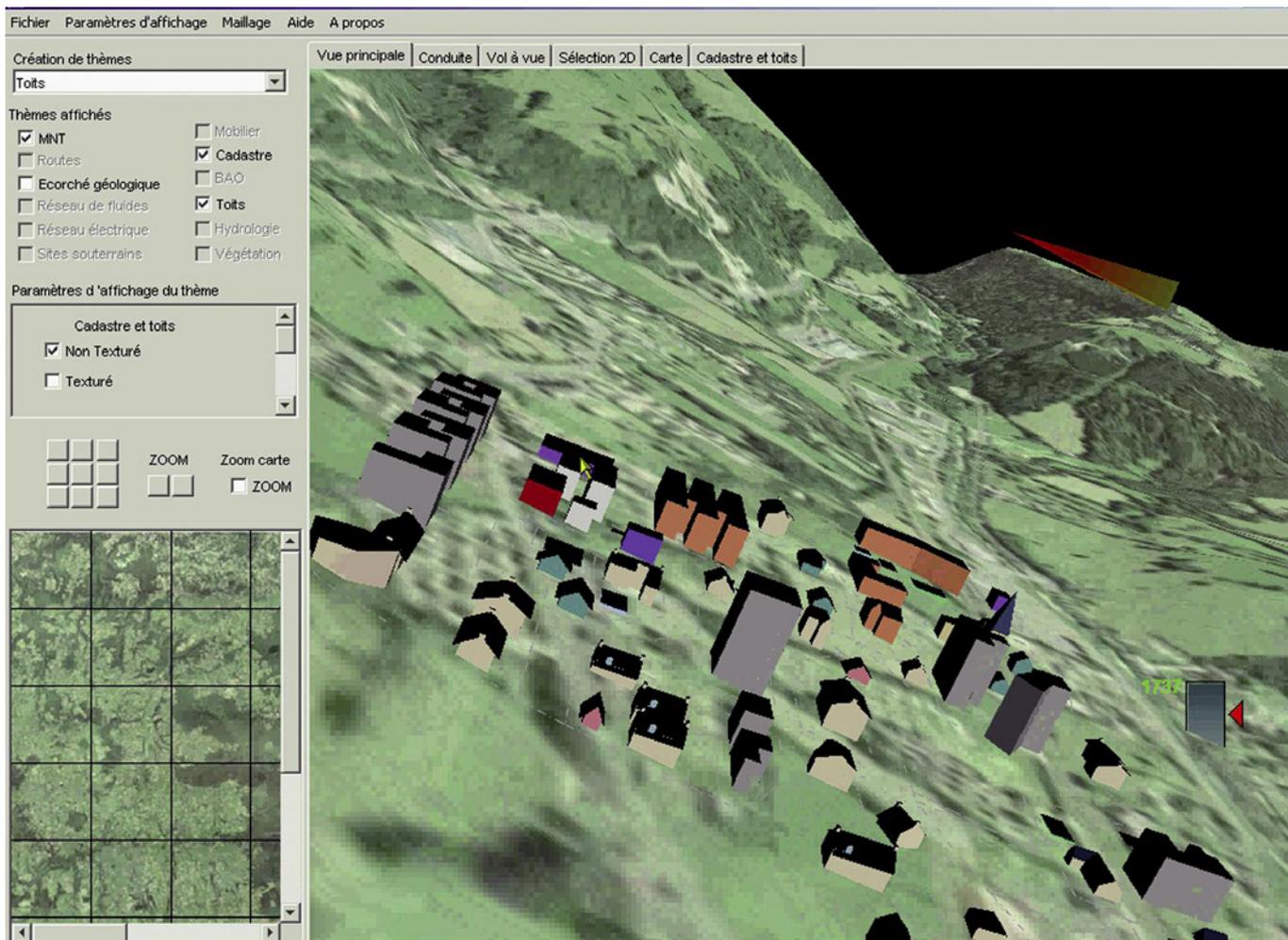


Figure 4. Plongée vers des immeubles pour un rase-motte (travaux des Eudiants).

“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

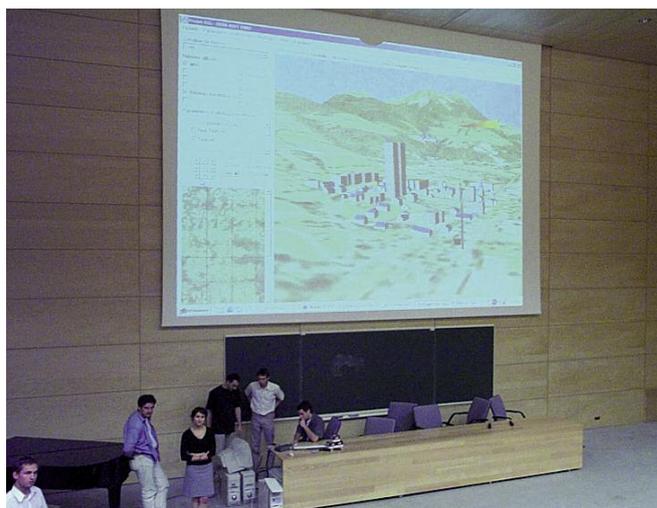


Figure 5. Projection sur grand écran le jour “j” (Photo M. Olivier Bouiri, IGN, avec son aimable autorisation).

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’acquérir 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’adjoindre 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 SES<sup>7</sup>, 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

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

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.*

# 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 info-graphiques 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 Prospero 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.

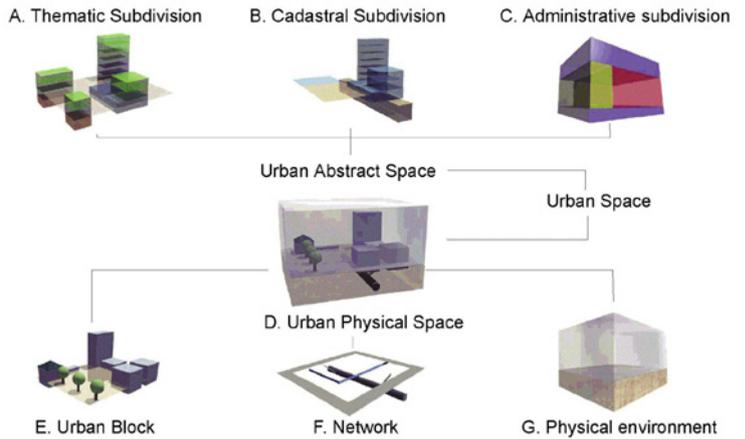


Figure 1. Exemples d'objets physiques et fictifs composant l'espace urbain (Billen 2000).

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

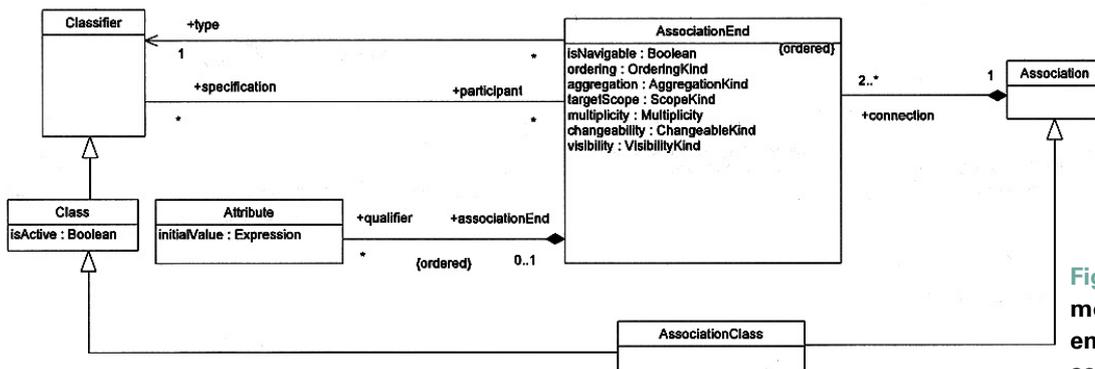


Figure 2. Extrait du méta-modèle UML : les liens entre classes et associations (OMG 2005).

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.

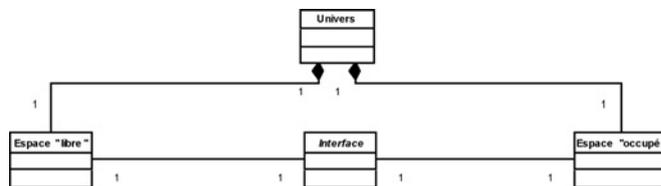


Figure 3. Premier niveau d'abstraction de l'ontologie proposée.

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

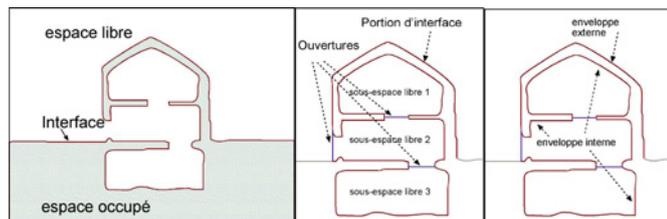


Figure 4. Illustrations des niveaux d'abstraction de l'ontologie proposée (coupe transversale dans un bâtiment).

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-

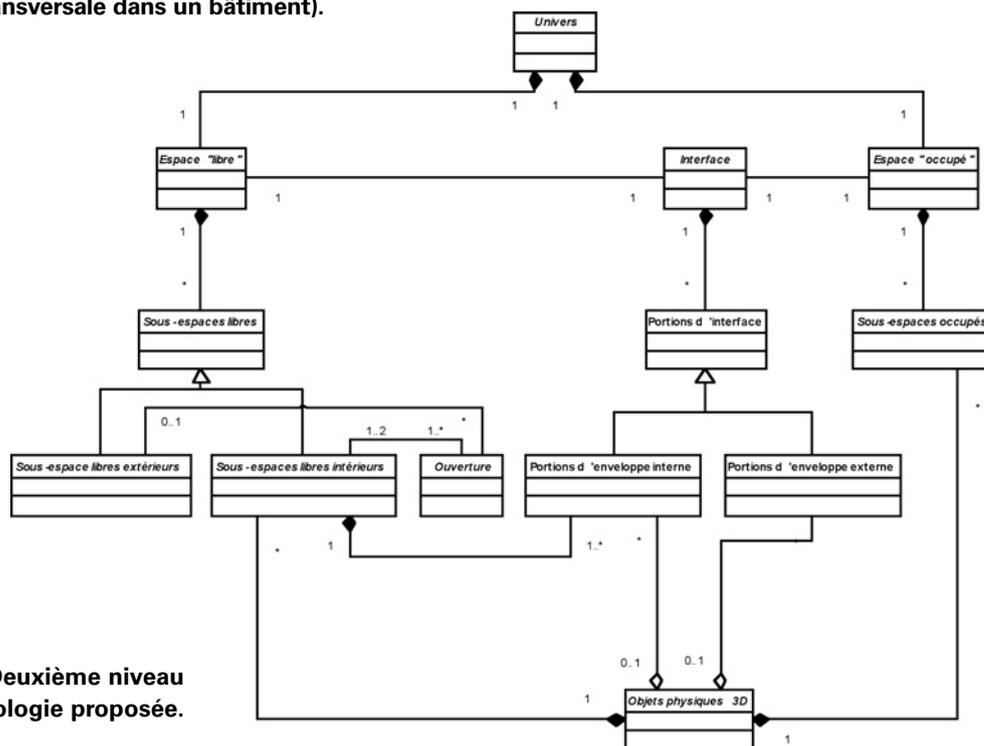
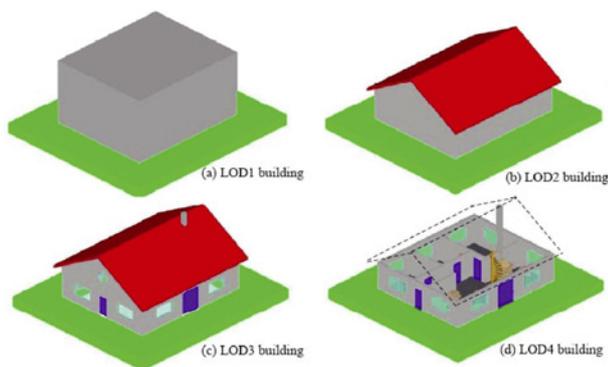
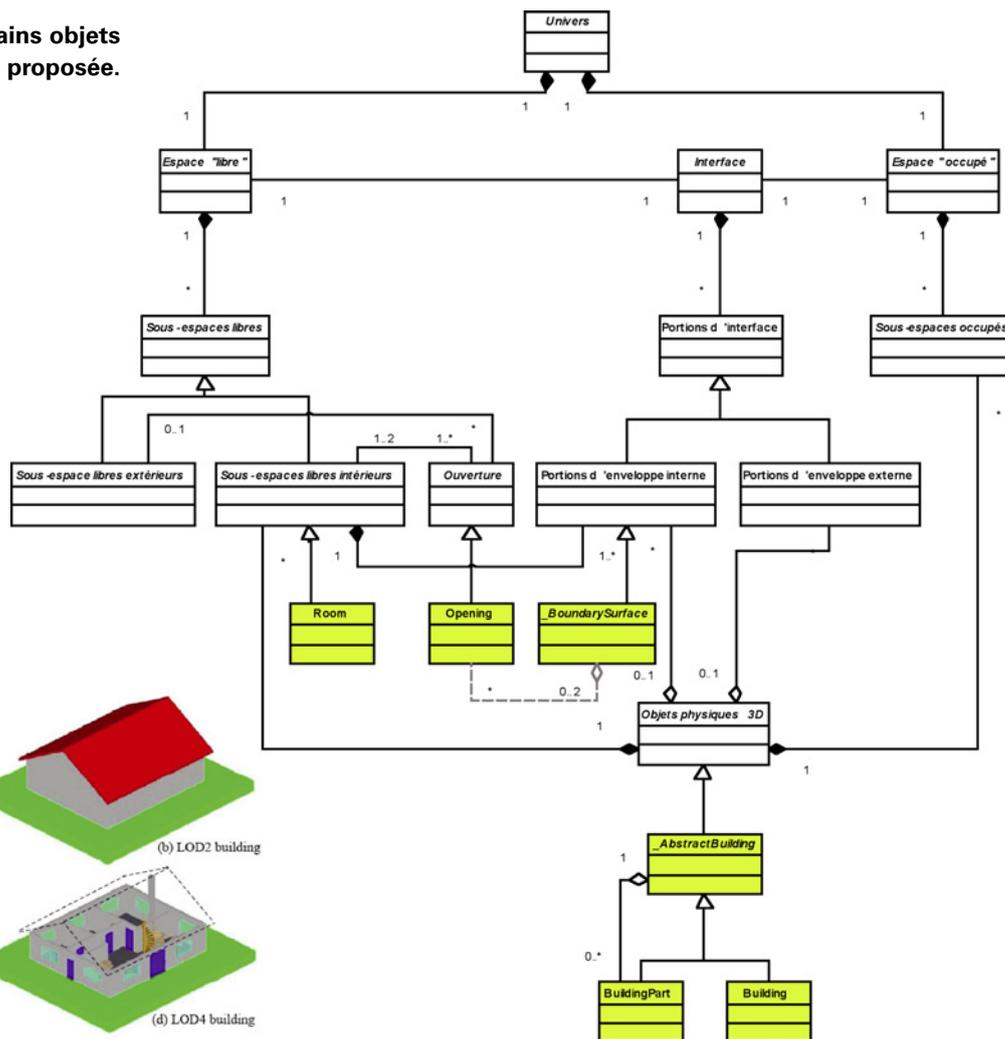


Figure 5. Deuxième niveau d'abstraction de l'ontologie proposée.

**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).

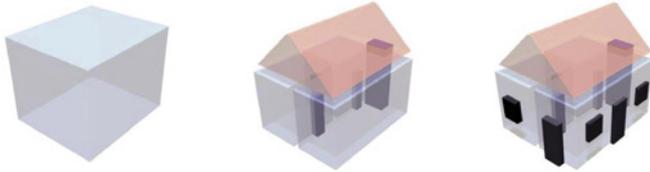
- Niveau 1 (LoD 1) : modélise les bâtiments comme des blocs avec des toits plats. Les modèles sont généralisés et aucune texture n'est appliquée. Qualité de positionnement en deçà de 5 m.
- Niveau 2 (LoD 2) : des modèles de toits (paramétriques) et des textures (photoréalistes ou synthétiques) sont ajoutées.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

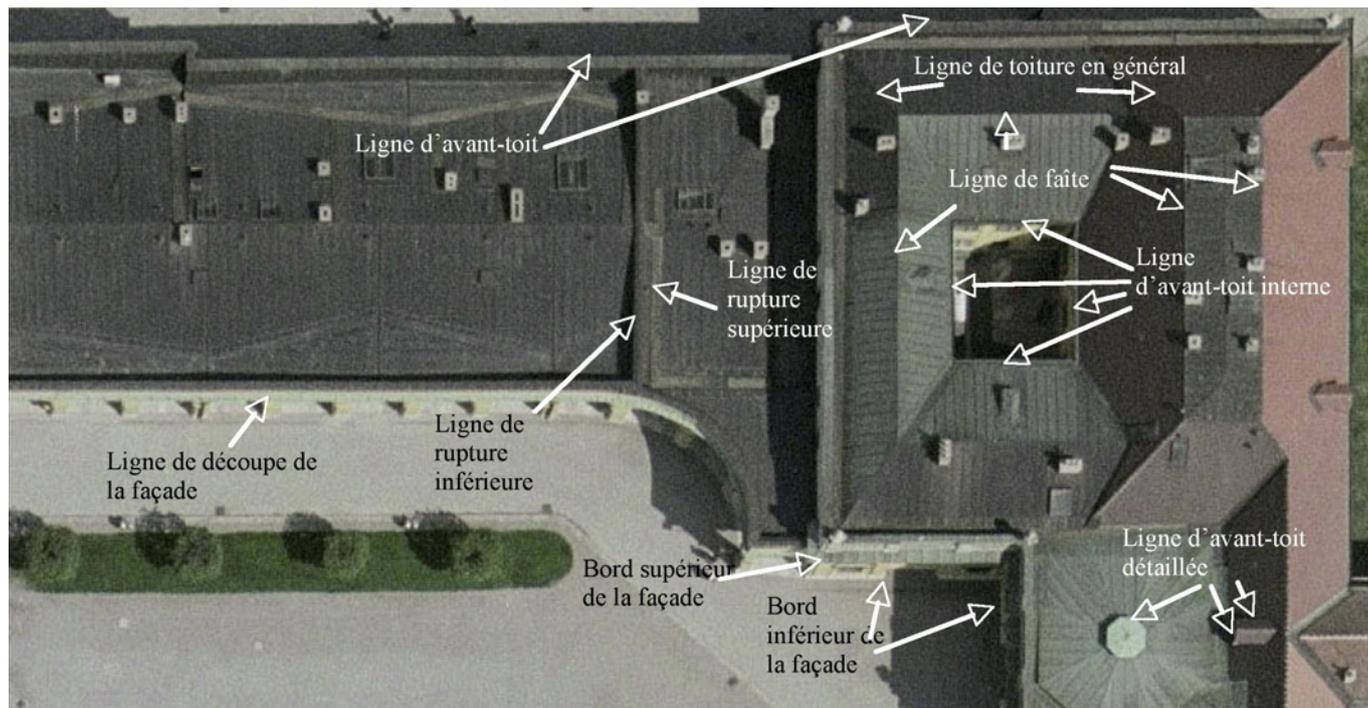


Figure 1. Les différents types de lignes de structure utilisés lors de la modélisation.

### ► 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".

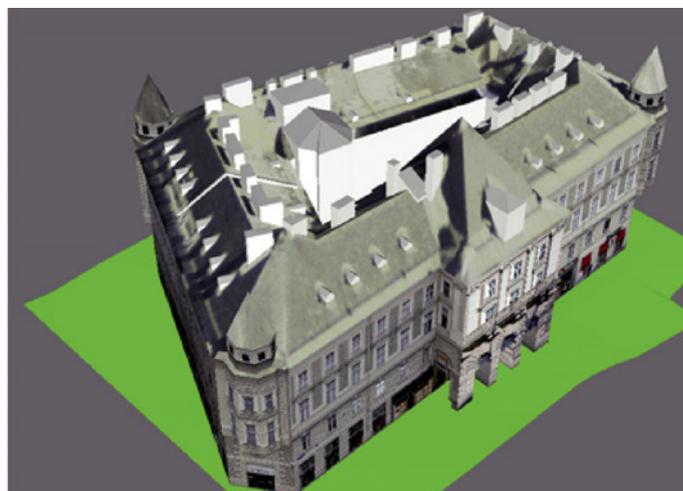
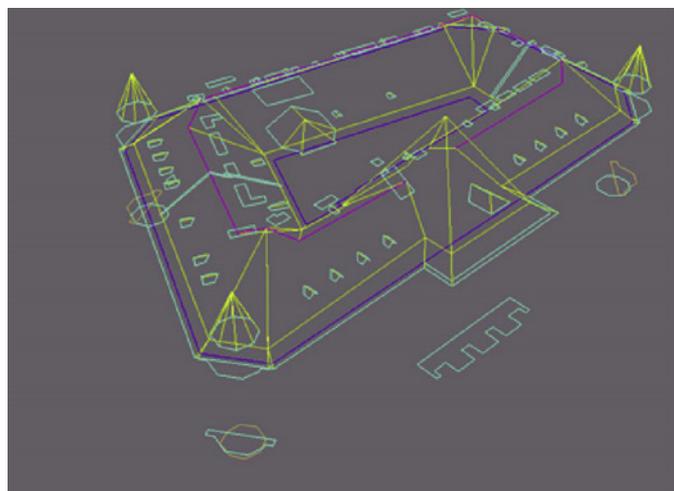
### ■ Éléments de détail

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.

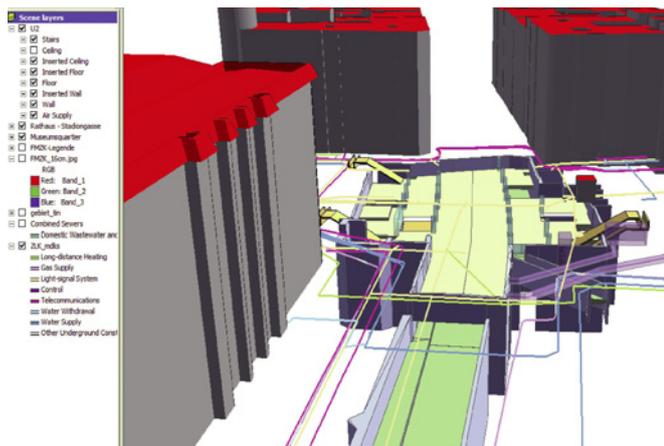
### ■ Modélisation

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 structurelles 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 structurelles 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.

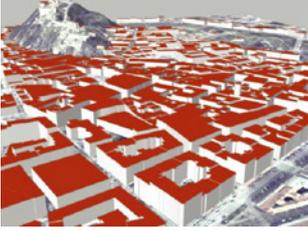
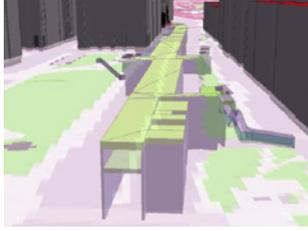
En revanche, les données de laser 3D, qu'elles proviennent du LIDAR ou de la lasergrammétrie terrestre, peuvent représenter un précieux complément du modèle 3D urbain. Les données laser saisies avec une densité de l'ordre de 4 points par m<sup>2</sup> ou plus, conviennent en effet parfaitement à la représentation 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 structurelles 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 texturé	Métro, ponts
			
<b>Sources de données :</b> Photogrammétrie LIDAR	Photogrammétrie à grande échelle	Photos de façades et lasergrammétrie terrestre pour des bâtiments complexes	Plans de construction ou données de relevés topographiques
<b>Utilisations :</b> 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).

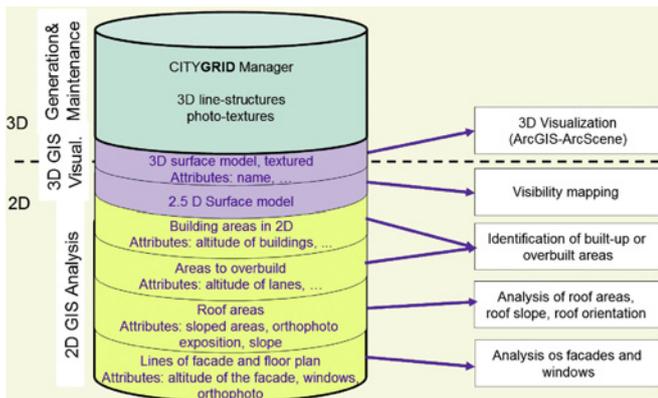


Figure 5 : Interface SIG.

### 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 :**

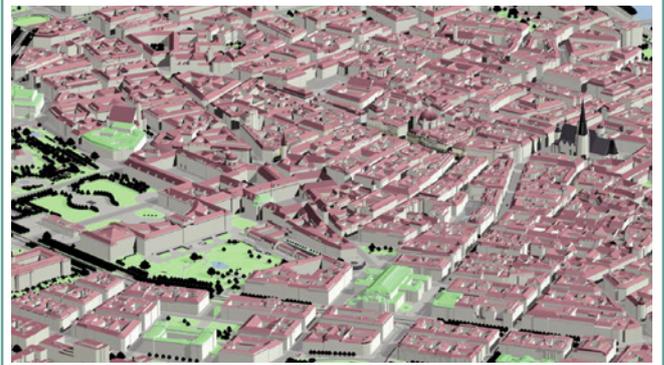


Tableau 1. Caractéristiques du modèle 3D urbain de la ville de Vienne (Autriche).

## 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.

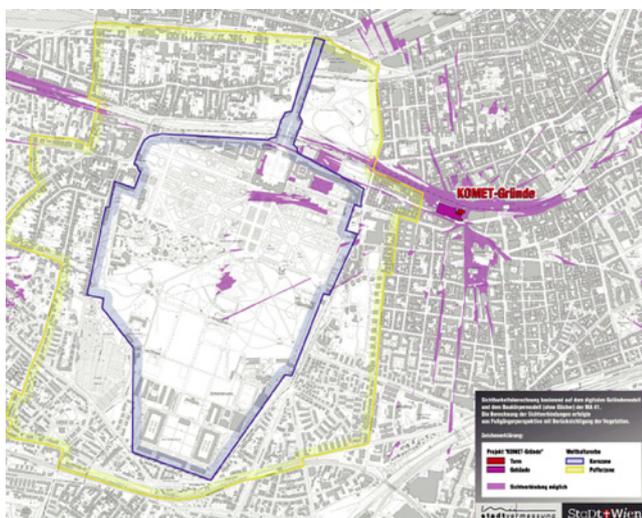


Tableau 2. Etude de visibilité.

### ■ 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).

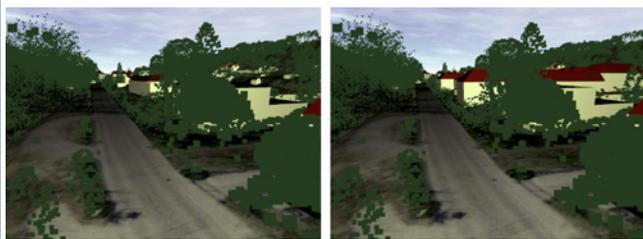
**Données disponibles :** Modèle 3D urbain dans l'environnement du projet, à un niveau de détail de représentation LoD 2 ou supérieur ; le cas échéant, données LIDAR pour la représentation de la végétation et du plan d'avant-projet sommaire.

**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 modéleur 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.

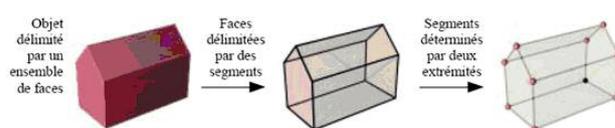


Figure 1. Décomposition en BR.

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 modéleurs 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 S1 et S2, deux simplexes du complexe simplicial, alors l'intersection de S1 et de S2 est soit vide, soit égale à un simplexe 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 photogrammétrique 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 photogrammétrique 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

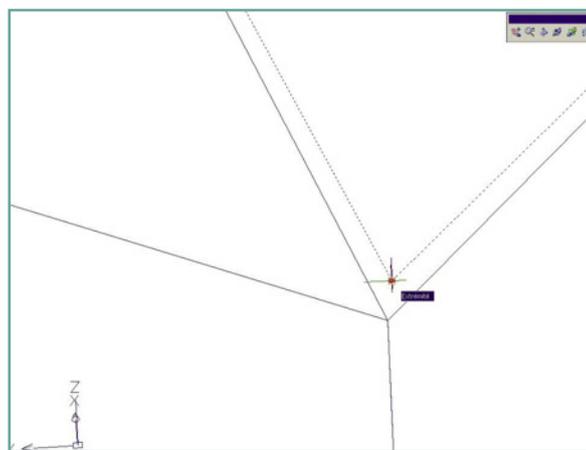
Chaque type est restitué sous forme de contours ou de segments. Ainsi, distinguons-nous parmi les premiers éléments des "contours de toits terrasses – plats", des contours de "trous de toits terrasses – plats", des "contours d'éléments sur toits", des "contours de toits multipans", des "contours de chien-assis" 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].

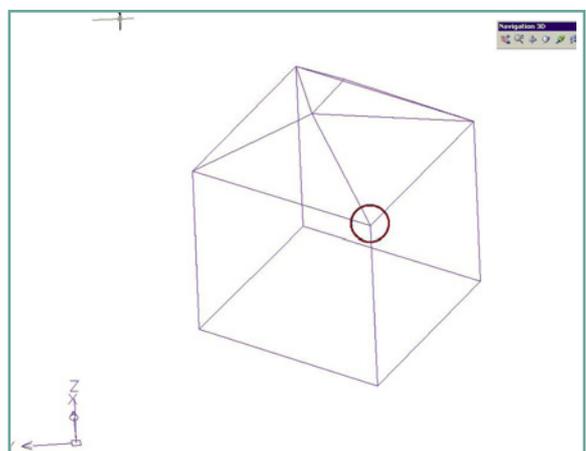
#### Caractéristiques des données de la Ville du Havre

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

Figures 2.



a) Exemple de mauvais accrochage.



b) Exemple de bon accrochage.

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'Élevations (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

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 km<sup>2</sup> 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 façades 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 km<sup>2</sup>. 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/m<sup>2</sup> 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-fleurî" 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 Guéroul (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.*

# Estimation automatique de l'orientation relative en imagerie terrestre

■ Mahzad KALANTARI - Franck JUNG

*Le calcul des paramètres extrinsèques d'une caméra à partir de plusieurs vues avec l'aide des points d'intérêt est la base de toutes les applications photogrammétriques ou de vision par ordinateur. Le défaut majeur de l'approche photogrammétrique, basée sur la condition de colinéarité, est dû à la non-linéarité du problème, et donc des valeurs approchées sont nécessaires. Dans les applications terrestres, ces valeurs initiales sont inconnues, et pour cette raison la communauté scientifique de vision par ordinateur est intéressée depuis longtemps au calcul de ces paramètres extrinsèques en utilisant des équations linéaires, basées sur la condition classique de coplanarité, enlevant le besoin de valeurs approchées. Dans un cas où les paramètres internes de la caméra sont connus, le calcul des paramètres extrinsèques utilise généralement la matrice dite essentielle. Beaucoup d'approches ont été employées pour résoudre cette matrice. Les plus connues sont les algorithmes dits des 8, 7 ou 6 points. Mais la condition de coplanarité a seulement 5 degrés de liberté. Nister a proposé une résolution polynomiale de la matrice essentielle demandant seulement 5 points, mais cette approche semble ne pas bien fonctionner avec des points coplanaires. Dans cet article nous présentons une nouvelle méthode de résolution directe de la rotation et la translation à partir de 5 points. Notre méthode n'utilise pas la matrice essentielle, elle exige une résolution polynomiale, en utilisant les bases de Gröbner, et se comporte correctement avec les points coplanaires. Cette méthode est également satisfaisante pour des images panoramiques, ce qui est un avantage comparatif important.*

## ■ mots-clés

Photogrammétrie,  
vision par ordinateur,  
bases de Gröbner,  
orientation relative

**L**e calcul des paramètres externes (décrivant l'orientation relative des prises de vues successives) de la caméra à partir de plusieurs vues à l'aide des points d'intérêts est la base de pratiquement toutes les applications aussi bien du domaine de la photogrammétrie, que de celui de la vision par ordinateur. Bien que le problème soit le même pour ces deux communautés, chacune a proposé une approche différente afin de calculer la position et l'attitude des caméras au moment des acquisitions de prises de vues.

L'inconvénient majeur de l'approche photogrammétrique, basée sur la condition de colinéarité, est dû à la non-linéarité du problème, et qui dit non-linéaire dit nécessité de disposer de valeurs approchées autour desquelles

on opère une linéarisation. Dans le cas de la photogrammétrie aérienne, les valeurs initiales sont très simples à estimer. En plus, l'avion ne subit que de faibles variations de rotation, et un ensemble de points d'appui peut toujours être obtenu.

En applications terrestres le calcul des valeurs initiales devient plus compliqué, c'est pour cela que la communauté de vision par ordinateur depuis plusieurs années s'est intéressée au calcul des paramètres extrinsèques de la caméra à l'aide d'équations linéaires. Le modèle employé est alors basé sur la condition de coplanarité, ce qui enlève le besoin d'avoir des valeurs approchées. Au cas où les paramètres internes de la caméra sont connus, le calcul des paramètres extrinsèques se

fait avec l'aide de la matrice dite "essentielle", le but devient alors de définir les composantes de cette matrice. C'est H. Longuet-Higgins [10] qui publia la première fois en 1981 cette notion de matrice essentielle. La contrainte de coplanarité a été longuement exploitée depuis lors par la communauté de vision par ordinateur, car en utilisant la matrice essentielle (E) la condition de coplanarité devient linéaire. La matrice essentielle suppose que la calibration de la caméra soit disponible.

Résoudre l'orientation relative revient donc à estimer les 9 éléments de la matrice essentielle. 8 points donc suffisent pour résoudre le système, car la dernière composante de cette matrice peut être prise égale à 1 vu que l'estimation se fait à une échelle près. Cette

■■■ résolution, bien qu'efficace en termes de calcul, ajoute 3 degrés de liberté à l'orientation relative qui à la base ne nécessite que 5 paramètres, comme on le verra ci-après. Un autre inconvénient majeur est qu'elle ne peut fonctionner si tous les points homologues sont coplanaires dans l'espace objet, ce qui peut très bien arriver par exemple sur des façades. Il y a eu donc beaucoup d'efforts au sein de la communauté de vision par ordinateur [7] pour réduire le degré de liberté de la matrice essentielle et réduire au minimum le nombre de points homologues requis. D'ailleurs, les différentes méthodes de résolution de la matrice essentielle ont pour nom ce nombre de points homologues minimum. Il y a donc eu les méthodes des 8, 7, 6 et plus récemment 5 points. Nous ne nous intéressons par la suite qu'aux méthodes de 5 points, qui représentent un minimum absolu.

J. Philip, en 1996 [13] a donné une première résolution avec 5 points. Il s'était basé sur les équations de Kuppra datant de 1913 [9]. en 2004, D. Nister[12] a poursuivi les travaux de Philip et a donné une solution numérique stable. D. Stewenius [17] a repris les mêmes équations que Nister, et donné une résolution algébrique avec l'aide des bases de Gröbner. Toutes les résolutions citées précédemment cherchent à estimer d'une façon ou d'une autre la matrice essentielle. La méthode proposée dans cet article cherche à estimer directement la rotation et la translation sans passer par la résolution de la matrice essentielle, ce qui fait sa grande différence avec les autres méthodes de résolution à 5 points. En effet aujourd'hui, et grâce aux moyens de calculs qui existent, cet article montre qu'avec une résolution polynomiale directe, il est tout à fait possible de donner une solution aux équations de coplanarité. Cette méthode peut aussi traiter des cas avec de faibles translations entre les images successives, elle peut donc être ainsi utilisée pour des images panoramiques. C'est son avantage principal par rapport aux autres méthodes. Par ailleurs, elle parvient aussi à fournir un résultat satisfaisant même si tous les points entrant dans le calcul sont coplanaires.

## Présentation de la nouvelle méthode d'estimation de l'orientation relative

### ■ Géométrie de l'orientation relative

Avant de poursuivre il est important de préciser que la calibration de la caméra, c'est-à-dire l'ensemble des paramètres dits intrinsèques ( focale, et point principal d'autocollimation) ainsi que la distorsion, est supposée définie préalablement. L'étape de l'orientation relative consiste à retrouver, comme son nom l'indique, la position entre deux caméras (avec un recouvrement stéréoscopique) au moment de la prise de vues. En général la position de la première caméra est prise comme origine du système terrain  $S_1$  (Figure 1) et donc la position de la deuxième caméra est calculée par rapport à la première. Afin de formaliser cette géométrie, plusieurs méthodes existent.

Une façon de modéliser l'orientation relative est connue sous le nom de condition de coplanarité. Cette contrainte a été beaucoup utilisée par la communauté de vision par ordinateur depuis trois décennies. Comme on le voit mieux sur la figure 1, la condition de coplanarité entre deux images exprime le fait que le vecteur de visée depuis le premier sommet de prise de vue  $\vec{V}_1$ , le vecteur de visée depuis le deuxième sommet de prise de vue (et exprimé dans le référentiel du premier)  $\vec{V}_2$ , ainsi que le vecteur de la translation (entre les deux sommets de prises de vues)  $\vec{T}$  se trouvent dans le même plan, qui est appelé le plan épipolaire.

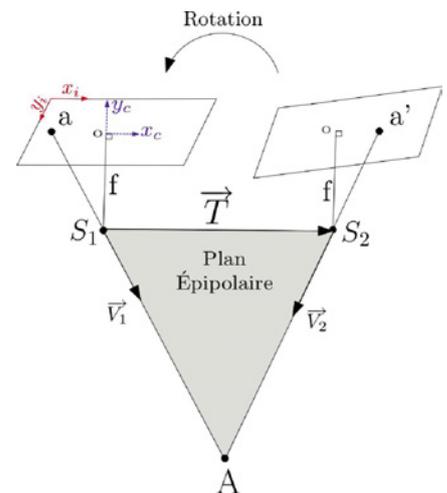
On peut traduire cette condition par un produit mixte nul entre ces 3 vecteurs. En d'autres termes : l'équation (1)

$$\vec{V}_1^t \cdot (\vec{R}\vec{V}_2 \wedge \vec{T}) = 0$$

En exprimant le produit vectoriel de manière algébrique (la translation étant exprimée sous forme d'axeateur), l'équation (1) peut être simplifiée dans sa forme matricielle : l'équation (2)

$$\begin{bmatrix} x_{a1} & y_{a1} & f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & Tz & -Ty \\ -Tz & 0 & Tx \\ Ty & -Tx & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{a2} \\ y_{a2} \\ f \end{bmatrix} = 0$$

Il existe plusieurs manières de représenter la rotation, et pendant long-



**Figure 1** : La matrice rotation de la seconde caméra par rapport à la première est appelée R, et le vecteur de translation T est la base qui relie les centres optiques des caméras ( $S_1$  et  $S_2$ ). O est le point principal d'autocollimation (ppa). Les images du point terrain A sur les 2 images sont a et a'.

temps en photogrammétrie analogique et analytique, les angles d'Euler ( $\omega, \varphi, \kappa$ ) ont été employés. Avec la photogrammétrie numérique il est plus judicieux d'employer une représentation vecteur et angle [8], ou encore les quaternions.

La manipulation numérique de la matrice rotation est beaucoup plus simple avec les quaternions. La représentation d'une matrice de rotation à l'aide du quaternion  $Q = a + b i + c j + d k$  (où a, b, c, d sont des nombres réels) se fait de la manière suivante : l'équation (3)

$$\begin{bmatrix} 1 - 2c^2 - 2d^2 & 2bc - 2da & 2bd + 2ca \\ 2bc + 2da & 1 - 2b^2 - 2d^2 & 2cd - 2ba \\ 2bd - 2ca & 2cd + 2ba & 1 - 2b^2 - 2c^2 \end{bmatrix}$$

avec la condition que la norme de Q, c'est-à-dire  $(a^2 + b^2 + c^2 + d^2)^{1/2}$ , doit être égale à 1.

En remplaçant la matrice de rotation dans l'équation (2), on aboutit à un polynôme de degré 3. Il est clair que dans les inconnues on trouve les éléments du quaternion (a, b, c, d) et la translation ( $T_x, T_y, T_z$ ) ce qui en tout fait 7 inconnues. Chaque couple de points donne un polynôme. Comme cela a été vu, une contrainte de norme unitaire sur le quaternion doit impérativement être rajoutée. En orientation relative, l'échelle ne peut être estimée ce qui

implique que le vecteur de translation n'a que 2 degrés de liberté. Il est tout à fait possible de contraindre un des éléments du vecteur de la translation, par exemple rajouter comme contrainte que  $T_x$  soit égal à 1. Mais ce choix ne s'avère pas judicieux surtout en photogrammétrie terrestre où il peut y avoir des angles forts de rotation sur les axes Y et Z, ce qui par ailleurs n'était pas le cas en photogrammétrie aérienne. Dans cette optique, la seule contrainte qui semble adaptée à rajouter aux systèmes d'équations est la contrainte de vecteur unitaire pour la translation. Avec cette contrainte il est démontré qu'il est tout à fait possible de gérer la stéréo avant-arrière (translation en Z) ainsi que les faibles translations, cas des images panoramiques par exemple.

En résumé, nous avons fabriqué cinq équations d'observations, et rajouté deux contraintes. Les racines de ce système sont les paramètres d'orientation relative, à savoir les quatre paramètres du quaternion (a, b, c, d) et les trois paramètres de la translation ( $T_x, T_y, T_z$ ).

### ■ Résolution des systèmes polynomiaux à l'aide des bases de Gröbner

La résolution d'un système polynomial consiste à trouver les zéros d'un système non linéaire polynomial du type  $f(x) = 0$  avec  $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)$ , où  $f_i$  est un polynôme à l variables  $x = (x_1, x_2, \dots, x_l)$  [1][2]

En photogrammétrie, de nombreux systèmes d'équation sont polynomiaux, dont les équations exprimant la condition de coplanarité, ou celle de colinéarité. Une des méthodes les plus connues et employées pour résoudre les systèmes polynomiaux est la résolution analytique qui exploite  $f$  ainsi que ses dérivées, p. ex. la méthode de Newton qui est itérative, ou encore la minimisation locale de  $f$ . L'inconvénient majeur de ces méthodes est du au fait qu'elles nécessitent des solutions approchées servant de valeurs initiales, parfois difficiles à trouver. Une autre façon de trouver les solutions d'un système polynomial est d'avoir recours à une résolution algébrique.

Les techniques algébriques subdivisent

le problème de la résolution en deux étapes : la première consiste à transformer le système en un ou plusieurs systèmes équivalents mais mieux adaptés et qui constituent ce que l'on peut appeler une solution algébrique. La deuxième étape consiste, dans le cas où  $K$  est un sous-corps des complexes, à calculer les valeurs numériques des solutions à partir de la solution algébrique. Le calcul de la solution algébrique se décompose elle-même généralement en plusieurs étapes. La première est le plus souvent le calcul d'une base de Gröbner ; aussi de nombreux chercheurs ont assimilé pendant plusieurs années le calcul des bases de Gröbner à la résolution des systèmes polynomiaux [4].

Généralisant la division euclidienne, le calcul de PGCD et l'élimination de Gauss, les bases de Gröbner furent développées initialement par B. Buchberger dans les années 1960 [1] [15].

La solution algébrique [16] peut prendre diverses formes, chacune ayant ses avantages et ses inconvénients. La forme la mieux adaptée au calcul des solutions numériques est la RUR (Représentation Univariée Rationnelle) qui consiste en une équation en une variable  $f(t) = 0$  (ou  $t$  est souvent une variable auxiliaire) et en l'expression des autres variables comme fractions rationnelles en  $t$  (quotients de deux polynômes). À partir de la RUR, le calcul des valeurs numériques des solutions revient à calculer les racines d'un polynôme univarié (à une seule variable). Ce n'est toutefois pas aussi simple qu'il n'y paraît car c'est généralement un polynôme de degré élevé ayant de très grands coefficients [14].

### Les étapes de l'algorithme

Rappelons ici qu'une phase critique qui intervient au cours des opérations permettant l'orientation relative de deux images est celle qui consiste à identifier, sur deux photographies différentes, les deux points qui sont les images d'un même point du terrain. Pour cette partie du travail, il n'est pas besoin que ce point terrain dispose de coordonnées connues, par contre il est indispensable

que l'on puisse garantir qu'un point pris dans une image est bien homologue d'un point pris dans l'autre, c'est-à-dire que ces deux images correspondent à un même point du terrain. Pour automatiser cette phase, on commence par extraire de chaque image des points faciles à pointer, et logiquement, si ces points ont été bien choisis, on parvient ensuite à mettre en correspondance la plupart des points d'une image avec ceux de l'autre dans la zone vue en stéréoscopie : on appelle ces points les points d'intérêt. Bien évidemment il est important d'éviter les points mal définis (p. ex. pris le long d'une bordure), ceux qui n'ont pas de définition géométrique stable (p. ex. bordure d'une ombre, intersection de lignes qui ne sont pas dans un même plan), etc. L'automatisation de l'extraction des points d'intérêt est directement liée à l'emploi d'images numériques, et l'un des premiers outils utilisés a été publié par C. Harris en 1986 [6] : son détecteur est basé sur l'extraction automatique de coins, et si assez rapidement ses insuffisances ont été connues, sa simplicité d'implémentation en a fait un outil très employé. Néanmoins, il a fallu attendre les résultats de deux décennies de recherche pour disposer d'une méthode réellement plus fiable, la méthode SIFT.

La méthode SIFT de Lowe, 2004 (*Scale Invariant Feature Transform*) [11] permet d'obtenir des points d'intérêt dont la détermination est très peu sensible à des changements, même importants, de facteurs d'échelle et d'orientation, et aussi assez peu sensibles aux variations locales de radiométrie (différences d'éclairage, différences de point de vue, etc.), toutes sortes de situations rencontrées très fréquemment en vision par ordinateur et où le détecteur de Harris est souvent tenu en échec. Elle est basée, entre autres, sur la considération suivante : dans une image, appliquer un changement d'échelle à un détail dont la répartition de densités radiométriques présente une forme gaussienne fournit un détail identique, à un facteur d'échelle radiométrique près.

Le traitement SIFT commence, pour chaque image, par une convolution suc-

■ ■ ■ cessive avec des imagerie de gausiennes de tailles progressivement croissantes. Puis une soustraction entre ces images convoluées successives est effectuée, permettant d'identifier un premier ensemble de points candidats, déjà a priori très peu sensibles aux changements d'orientation et d'échelle. Un premier filtrage est alors effectué pour éliminer les candidats ayant un contraste faible, ou qui sont mal localisables car situés sur un linéament.

L'étape suivante consiste, pour chacun de ces candidats, à identifier une ou plusieurs directions particulières au sein des gradients effectués dans toutes les directions autour du point. On construit alors, en utilisant ces directions comme références, un descripteur des gradients de l'environnement immédiat du point, sorte de carte d'identité du point en généralement 128 valeurs numériques, extrêmement peu sensible à l'orientation et à l'échelle du voisinage, ainsi qu'aux différences d'éclairément comme on le comprend aisément.

Chaque point candidat ainsi équipé peut alors participer à une grande opération de mise en correspondance avec les candidats issus de l'autre image, avec tout l'outillage mathématique que l'on peut envisager actuellement pour que l'opération aille vite et soit fiable (QuadTree, RanSac [5], etc.), mais la base de cette rapidité tient au travail de

tri et d'orientation qui a été fait en amont. Sur des images de taille réduite (500 x 500 pixels), on peut généralement identifier plusieurs milliers de points d'intérêt, ce nombre dépend du réglage plus ou moins critique de nombreux paramètres, à toutes les étapes du calcul. Il est clair qu'avec un nombre aussi important de points trouvés, la mise en correspondance peut être aisément assortie de critères de qualité très stricts, et que même ainsi, il reste couramment plusieurs centaines de points d'intérêt correctement extraits.

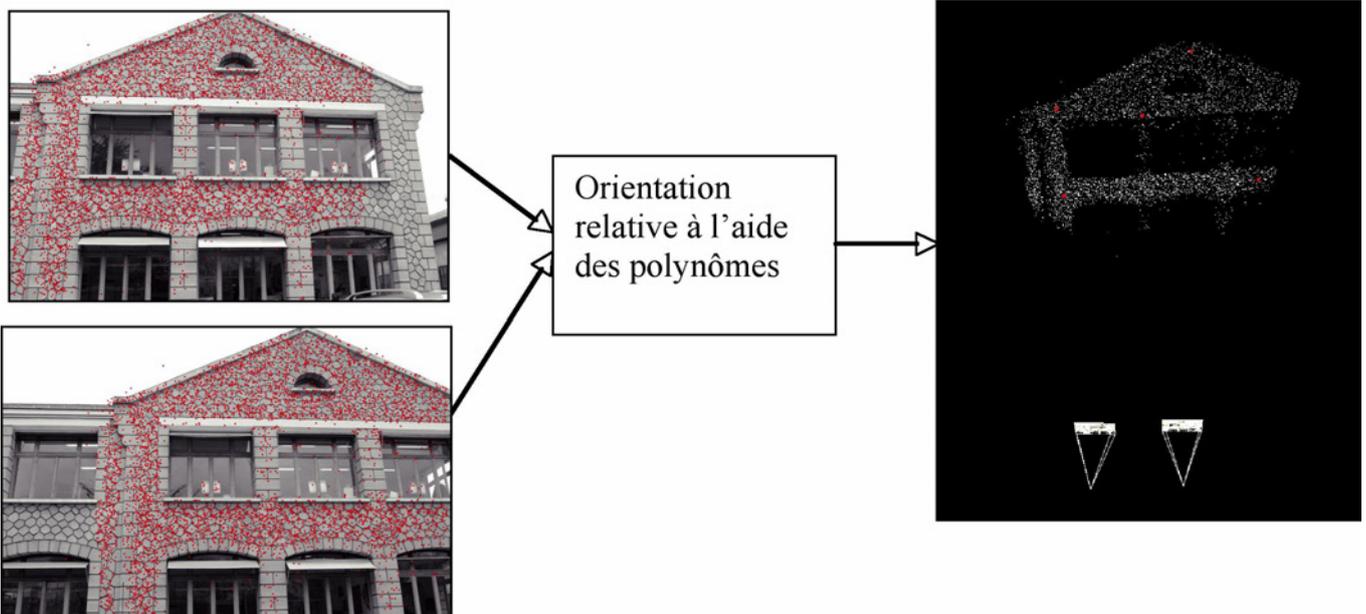
L'algorithme qui a été développé ici comporte donc trois étapes, tout d'abord une détection automatique des points de liaisons (ou points d'intérêt) avec la méthode SIFT, une estimation robuste basée sur la méthode RanSac, et enfin une estimation de l'orientation relative à l'aide des bases de Gröbner.

## Résultats

Tout d'abord, plusieurs séries de points présentant des situations géométriques différentes ont été simulées, afin de valider le bon comportement des algorithmes dans des situations différentes, et y compris celles réputées difficiles (en particulier base très courte, ou points plus ou moins coplanaires). Ensuite, deux séries d'acquisitions d'images de terrain sur des bâtiments

ont été effectuées, puis traitées, tout d'abord la façade de l'école des Mines de Paris, puis l'un des bâtiments de l'IGN à Saint-Mandé. Nous présentons ici un exemple tiré de cette dernière acquisition, avec deux images de 3008x2000 pixels. Il s'agit donc d'un cas où les points sont coplanaires, un cas réputé défavorable et non fonctionnel pour les algorithmes de cinq points existants. Sur ces images, ont été reportés en rouge les 5562 points SIFT (parmi 5 616 points extraits a priori) qui ont été retenus après l'appariement automatique et le filtrage RanSac. Le résultat du traitement avec les algorithmes présentés ici apparaissent sur l'image ci-dessous à droite : l'orientation relative a été obtenue à partir de cinq de ces points, tirés au hasard parmi la population ainsi filtrée, la seule contrainte qui a été appliquée porte sur la distance minimale qui a été imposée entre ces cinq points : dans chaque image, ces points respectent une distance minimale de 200 pixels entre eux, ce qui ne représente pas une contrainte sévère vu la taille de chaque image.

Dans l'image de droite, compte tenu de l'orientation relative qui a été calculée, les points d'intérêt sont désormais en 3D, les points de prise de vue calculés en même temps apparaissent à leur place exacte. Les 5 points ayant servi au calcul ont été représentés en rouge.



## Perspectives

Ce travail a été développé afin de parvenir à un tableau d'assemblage automatique, permettant une aide à l'acquisition d'images sur le terrain. En outre, il ouvre de nombreuses perspectives pour accélérer la phase d'orientation relative d'images, rapprochant ainsi les méthodes de photogrammétrie de celles, orientées vers les applications temps réel, de la communauté de la vision par ordinateur. Rappelons ici que l'originalité du procédé tient à ce que le calcul de l'orientation relative est obtenu sans l'aide d'aucune information externe, et qu'elle est donc entièrement automatique. Et par rapport aux méthodes équivalentes développées jusqu'ici, celle-ci peut fonctionner avec le nombre le plus petit possible permis par la théorie, soit 5 points identifiés comme homologues dans les deux images, et fonctionne encore avec des points coplanaires, comme l'exemple présenté ci-dessus le montre bien. ●

## Remerciements

Nous tenons à remercier ici Erwan Houzay et Bertrand Cannelle, du Laboratoire MATIS, pour l'aide apportée à l'acquisition des images ayant servi aux tests et aux calculs de mise en œuvre de la méthode SIFT.

## Contact

**Mahzad KALANTARI**

Laboratoire MATIS  
Méthodes d'Analyse et de Traitement  
d'Images pour la Stéréorestitution  
2 - 4, avenue Pasteur  
94 165 Saint-Mandé Cedex  
mahzad.kalantari@ign.fr

**Franck JUNG**

Franck.Jung@equipement.gouv.fr

## Bibliographie

[1] Buchberger, B. (1965). Ein Algorithmus zum Auffinden der Basiselemente des Restklassenringes nach einem nulldimensionalen Polynomideal. Mathematical Institute. Austria, University of Innsbruck. PhD.

[2] Cox, D., Little, J., O'Shea, D., 1997. Ideals, Varieties, and Algorithms. Springer-Verlag New York.

[3] Cox, D., Little, J., O'Shea, D., 1998. Using Algebraic Geometry, Springer-Verlag New York.

[4] Faugère, J. C. (1999). "A New Efficient Algorithm for Computing Grobner bases ( $F_4$ )". Journal of Pure and Applied Algebra 139.

[5] Fischler, M., Bolles, R., 1981. Random Sample Consensus: a Paradigm for Model Fitting with Application to Image Analysis and Automated Cartography, Commun. Assoc. Comp. Mach. 24:381-395.

[6] Harris, C. and Stephens, M. 1988. A combined corner and edge detector. In Fourth Alvey Vision Conference, Manchester, UK, pp. 147-151

[7] Hartley R., Zisserman, A., 2000. Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press, ISBN 0-521-62304-9.

[8] Kasser M, Egels Y., 2001. Photogrammétrie Numérique. Hermes-Sciences.

[9] Kruppa, E., 1913. Zur Ermittlung eines Objektes aus zwei Perspektiven mit Innerer Orientierung, Sitz.-Ber. Akad.Wiss.,Wien, Math. Naturw. Kl., Abt. IIa., 122:1939-1948.

[10] Longuet-Higgins, H., 1981. A Computer Algorithm for Reconstructing a Scene from Two Projections, Nature, 293(10):133-135.

[11] Lowe, D. G. 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. Int. Journal of Computer Vision 60(2), 91-110.

[12] Nister, D., 2004. An Efficient Solution to the Five-Point Relative Pose Problem, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 26(6):756-770.

[13] Philip, J., 1996. A Non-Iterative Algorithm for Determining all Essential Matrices Corresponding to Five Point Pairs, Photogrammetric Record, 15(88):589-599.

[14] Rouillier, F. (1999). Solving zero-dimensional systems through the rational univariate representation. Journal of Applicable Algebra in Engineering, Communication and Computing 9.

[15] Eric Schost. cours de mathématique de l'école Polytechnique

[16] Systèmes Polynomiaux, Arithmétiques, Calculs Efficaces et Sûrs. Projet SPACE <http://www.spaces.lip6.fr/>

[17] Stewénius, H., Engels, C., and Nister, D. (2006). Recent developments on direct relative orientation. ISPRS Journal of Photogrammetry.

## ABSTRACT

*The calculation of the extrinsic parameters of a camera from several views with the help of the points of interests is the basis of all photogrammetric applications as well as computer vision ones. The major inconvenience of the photogrammetric approach, based on the condition of colinearity, is due to the non linearity of the problem, and thus approached values are necessary. In terrestrial applications, these initial values are unknown, and for that reason the community of computer vision since several years was interested to the calculation of the extrinsic parameters of the camera using linear equations, based on the classical condition of coplanarity, removing the need for approached values. In a case where the internal parameters of the camera are known, the calculation of the extrinsic parameters is often performed with help the so-called essential matrix. A lot of approaches have been finalized to solve this matrix. The most known are the algorithms said of the 8, 7 or 6 points. But the condition of coplanarity only has 5 degrees of liberty. Nister has proposed a polynomial resolution of the essential matrix, requesting only 5 points, but this approach has been reported as not working with coplanar points. In this article we present therefore a new method of direct resolution of the rotation and the translation from 5 points. Our method doesn't use the essential matrix, requires a polynomial resolution, using the bases of Gröbner, and behaves correctly with coplanar points. This method is also suitable for panoramic images, which is a significant comparative advantage.*

# Le code général des propriétés des personnes publiques

■ Jean-Pierre MAILLARD

*En France la propriété privée est depuis très longtemps sacralisée. C'est pourquoi elle fait l'objet d'une protection juridique significative, celle appartenant à un organisme public étant défendue dans les mêmes conditions. La propriété d'une personne publique affectée au domaine public est plus encore intangible puisque la domanialité se caractérise par les "Quatre I" à savoir : l'insaisissabilité, l'incessibilité, l'inaliénabilité et l'imprescriptibilité. L'insaisissabilité s'applique tout autant à leur domaine privé ainsi qu'à une cessibilité qui s'effectuait, sans contrepartie, en dessous de la valeur vénale.*

Pour prendre en compte la jurisprudence et la rigidité de critères s'opposant notamment à la valorisation économique du domaine public et à diverses politiques, comme celle en faveur du logement social, la réglementation en la matière a récemment évolué. Il aura fallu vingt ans pour faire aboutir la réforme initiée par un rapport du Conseil d'Etat de 1986. L'ensemble des textes et novations a été rassemblé dans ce code général des propriétés des personnes publiques (CG3P) mis en vigueur par l'ordonnance du 21 avril 2006. Le rapport du projet au Président de la République affiche clairement le sens de la réforme : "Il s'agit sans détours de proposer une définition qui réduit le périmètre de la domanialité publique." Préparée par un groupe de travail siégeant au Conseil d'Etat, la refonte de la réglementation a duré dix-huit mois et nécessité pas moins de soixante réunions.

Il est proposé de présenter les novations et d'apprécier la valeur ajoutée du texte de modernisation qui a étendu la réglementation aux patrimoines des collectivités locales, ceux de leurs établissements publics et leurs groupements. Les cinq parties du code (acquisition, gestion, cession, autres opérations immobilières des personnes publiques et dispositions relatives à l'outre-mer) ordonnent tous les textes en vigueur en apportant des précisions sur le classement dans le domaine public. Ce classement s'effectue de

facto pour tout ouvrage soumis à la triple condition de faire l'objet d'un aménagement indispensable à l'exécution d'une mission de service public, d'être réalisé sur la propriété d'une personne publique et d'être à l'usage direct du public. Le domaine public se qualifie désormais par une soumission aux "Quatre A" c'est-à-dire l'appartenance, l'affectation, l'aménagement spécial et l'accessoire.

## Le domaine public

En premier les rédacteurs du CG3P ont eu le souci de mettre un terme à l'hyperrophie de la domanialité publique en l'abordant de façon positive et non plus par défaut. En effet, le domaine public se trouvait à l'origine identifié comme ce qui était insusceptible d'être propriété privée. De même, aux critères jurisprudentiels, ils ont substitué des dispositions fondées sur des données précisées incitant à identifier l'essentiel et l'accessoire. Ainsi pour caractériser le domaine public, l'aménagement spécial doit être indispensable à la mission de service public, l'accessoire reconnu comme un complément indissociable et l'affectation déterminante. Les exemples suivants illustrent l'esprit et le fond de la réforme :

- une plage entretenue par une commune et lui appartenant relève du domaine public car sa gestion s'effectue comme celles des autres emprises communales ouvertes au public,
- un gîte communal spécialement

affecté par la politique économique et touristique de la collectivité territoriale est classé dans son domaine public,

- l'Agence France presse (AFP) rend un service d'intérêt général sans avoir de mission de service public. Son patrimoine est donc tout entier privé,
- les forêts des personnes publiques soumises au régime forestier sont privées car l'essentiel de leur gestion vise à l'exploitation et pas à l'oxygénation des promeneurs,
- dans un tribunal, une salle d'audience appartient au domaine public. Sous réserve du caractère indissociable des lieux, les bureaux des magistrats n'y entrent pas. De même, en étant dissociés, les logements de fonction non utilisés d'un équipement public sont incontestablement classés dans le domaine privé de la collectivité concernée.

Ainsi, pour l'existant, la réduction du périmètre du domaine public fait notamment passer les immeubles de bureaux appartenant à l'Etat et aux collectivités locales dans leur domaine privé. La logique de valorisation des biens, leur circulation facilitée et la disparition de la théorie de la domanialité publique virtuelle constituent des évolutions favorables aux échanges complexes.

La clarification est utile car la domanialité publique virtuelle pouvait s'opposer en particulier au droit de rétrocession susceptible d'être exercé par les expropriés avant la mise en œuvre du projet objet de la maîtrise foncière. Pour un

ouvrage, le moment du classement est celui du piquetage et cela met en valeur le rôle du géomètre.

Le nouveau texte donne des éclairages à la distinction et l'articulation entre propriété et domanialité.

A titre d'exemples :

- la domanialité présuppose la propriété publique. Les ouvrages publics réalisés, à tort, sur la propriété d'une personne privée ne sont pas classables tels quels dans le domaine public, même si, d'une façon générale, l'adage "on ne détruit pas un ouvrage public" peut toujours s'appliquer,
- un bien public compris dans une copropriété n'entre pas dans le domaine public et reste soumis aux dispositions du Code civil. En cas de nécessité, une propriété verticale à affecter au domaine public devra faire l'objet d'un ou plusieurs états descriptifs de division en volumes pour autant que l'accès soit indépendant,
- les opérations foncières entre l'Etat et les collectivités locales sont facilitées. Les transferts de propriété amiables entre personnes publiques à l'occasion d'un changement de service public qui maintient le bien cédé sous un régime de domanialité publique sont affranchis de la contrainte d'un déclassement préalable permettant juridiquement l'aliénation,
- la réalisation d'un ouvrage public sur la propriété d'une autre personne publique n'emporte pas transfert de propriété sauf passation d'un acte administratif la constatant. Dans ce cas, à défaut de transfert de charge, la mutation s'effectue à titre onéreux,
- des servitudes conventionnelles de droit privé peuvent être constituées sur le domaine public dès lors qu'elles sont compatibles avec l'affectation.

L'application du CG3P renforce les conditions de l'occupation du domaine public qu'il soit maritime, fluvial, ferroviaire, routier, aéronautique et hertzien.

Cette occupation doit être onéreuse exceptée celle des canalisations d'eaux pluviales qui profitent au domaine concerné. Les concessionnaires, les opérateurs de radiotéléphonie et autres doivent tous sans exception payer une

redevance sauf à ce que le bénéficiaire apporte une contrepartie. Cela serait le cas des annonceurs dont les abris bus supportent des plans de ville constituant un service rendu à la collectivité avec sa valeur à déduire de la redevance.

Le nouveau code permet la mise en œuvre d'autorisations et de conventions d'occupation temporaire (AOT et COT) du domaine public avec la constitution de droits réels transmissibles, contrats qui s'apparentent au bail emphytéotique administratif (BEA) (voir infra). Les dispositifs contractuels déjà mis en œuvre par les ports autonomes sont généralisés.

## Le domaine privé

Par principe, les personnes publiques n'ont pas à posséder des immeubles sans finalité sauf ceux qui participent à une politique de réserve foncière. A défaut, la remise sur le marché s'imposerait. Sous cette réserve, le domaine privé des personnes publiques reste soumis à une gestion d'intérêt général sachant que les travaux qui les concernent n'ont pas le caractère de travaux publics.

Avant d'être largement accru par l'application du CG3P, le domaine privé des personnes publiques était principalement constitué par des acquisitions réalisées au titre d'une action foncière (opportunité, échange, préemption, expropriation), de l'acceptation de legs ou de l'appropriation de biens vacants et sans maître. L'acceptation d'une vente en l'état futur d'achèvement (VEFA) leur permet aussi d'obtenir la disposition d'un immeuble bâti sans les préoccupations du maître d'ouvrage de la construction. Cependant cette forme sera critiquable si en réalité c'est l'acquéreur public qui a pris l'initiative de l'opération et en a fixé les caractéristiques. En effet, la VEFA ne doit pas aller à l'encontre des règles applicables aux constructions publiques et plus spécifiquement à celles de la loi sur la maîtrise d'ouvrage publique (Loi MOP) et du droit des marchés publics tant interne que communautaire. Autrement dit, l'acquisition des immeubles à construire

doit porter sur une moindre partie du bâti à édifier, les limites de la moitié ou du tiers étant sagement à respecter.

L'autre moyen d'entrée d'un bien dans le domaine privé provient de son déclassement ou de sa désaffectation. Les procédures correspondantes sont codifiées. Ainsi le déclassement et la désaffectation d'emprises de voirie font l'objet d'enquêtes publiques préalables. A défaut de réglementation spécifique, les décisions en ce sens sont prises par acte administratif (décision de la personne qualifiée, délibération de l'assemblée compétente) et donc susceptibles d'être contestée par la voie judiciaire.

Outre les bois et forêts soumis au régime forestier, le code confirme l'appartenance au domaine privé des chemins ruraux. Pourtant, si une affectation à l'usage du public existe et nonobstant son caractère privé, la suppression d'un itinéraire sera soumise à enquête publique préalable à la délibération de la collectivité locale.

Sur le domaine privé les contrats immobiliers à long terme sont validés et divers. Ils relèvent du bail emphytéotique institué par le code rural, du BEA défini dans le code général des collectivités territoriales (CGCT) et du bail à construction défini dans celui du code de la construction et de l'habitation (CCH). La durée des trois baux varie de 18 à 99 ans. Chacun se distingue par son cahier des charges :

- Le bail emphytéotique acte un louage d'immeuble de longue durée,
- Le BEA engage la réalisation par le preneur, pour le compte de la collectivité territoriale propriétaire, d'une mission de service public ou une opération d'intérêt général,
- Le bail à construction encadre l'obligation d'édifier des constructions et d'assurer leur entretien pendant toute la durée du bail.

En confirmant sa terminologie le CG3P élargit l'objet du BEA aux lieux de culte et ouvre la possibilité de recourir au crédit bail.

Les successions en déshérence, les biens confisqués, les objets placés sous main de justice et les sommes et valeurs prescrites sont appropriés par l'Etat. En revanche, comme indiqué ci-dessus, les



biens sans maître le sont maintenant par la commune, les deux appropriations s'effectuant selon des modalités et des procédures précisées par le CG3P. La réception des actes authentiques sous la forme administrative est respectivement de la compétence des Préfets, des autorités des établissements publics de l'Etat, des Maires, Présidents d'intercommunalité et d'établissements publics pour les actes relatifs aux organismes qu'ils représentent.

Enfin les biens du domaine privé sont cessibles selon des modalités fixées par les Titres I et II du Livre II du CG3P.

Le CG3P contient donc des novations significatives qui s'apprécient comme autant d'avancées dans la définition du domaine public, la possibilité de créer des servitudes dans son emprise et la faculté pour toutes les personnes publiques de délivrer des autorisations d'occupation avec création de droits réels. Nombre de modifications contenues dans le code étaient souhaitées et

attendues. Cela permet de saluer une réforme méritoire.

Depuis sa promulgation, on comprend que l'application du CG3P n'ait pas encore produit de jurisprudence puisqu'il s'appuie et intègre l'antérieure. Il ne faut cependant pas douter que ce code devra vivre avec son temps et s'adapter en tant que de besoin, comme toute la réglementation de la République. ●

► **Pour tout renseignement :**  
[www.legifrance.gouv.fr](http://www.legifrance.gouv.fr)

## ■ Le Grenelle et son environnement

Sans préjuger de la mise en œuvre des programmes retenus, le Grenelle de l'environnement d'octobre 2007 a été salué comme une expérience intéressante, porteuse d'une novation dans la façon de traiter les problèmes posés. En tant que telle, aucune des actions envisagées n'a de conséquence directe sur la pratique de la topographie. Cependant les domaines de la compétence de l'AFT, n'échapperont pas à une évolution des approches et des pratiques induites par l'approfondissement de l'esprit "Environnement". Pour illustrer ces changements un regard est porté sur un secteur d'activité qui mobilise de façon constante le savoir-faire des géomètres-topographes : le bâtiment et les travaux publics (BTP).

En France, chaque année, plus de 130 millions de tonnes de déchets de chantier sont générées par le BTP. Depuis une décennie, l'administration est engagée dans la planification et la gestion de ces déchets. Ainsi la circulaire du 15 février 2000 et le respect des réglementations nationale et communautaire ont engagé la lutte contre les déchets sauvages et la volonté d'économiser les ressources de matériaux non renouvelables. Les objectifs d'origine sont encore poursuivis aujourd'hui à savoir :

- mise en place d'un réseau de traitement qui prenne en compte la réduction du transport des déchets et le coût de la transformation,
- effort de valorisation et de recyclage des déchets concourant à la limitation des mises en décharge,
- encouragement à l'utilisation des matériaux recyclés dans les chantiers du BTP sous réserve du respect de la sécurité environnementale et de la santé publique,
- implication des maîtres d'ouvrage dans l'élimination des déchets produits par la réalisation de leurs commandes.

Dans ce cadre, les collectivités territoriales jouent depuis un rôle grandissant quand bien même la responsabilité des déchets du BTP incombe aux producteurs. En effet, elles sont le fait générateur pour les réalisations dont elles assurent la maîtrise d'ouvrage et impliquées par conséquent. Dans le cadre du pouvoir de police général qui leur incombe, ces collectivités doivent traiter et sanctionner les dépôts illégaux de matériaux et autres déchets. Elles sont donc conduites à agir comme des facilitateurs en contribuant, par exemple, à l'implantation d'installation de tri, de regroupement, de recyclage et de stockage ou en ouvrant autant que possible des déchetteries municipales pour les artisans et entreprises.

Le Grenelle de l'environnement a pris en compte l'existant, mais n'a pas tranché toutes les questions relatives aux progrès à réaliser dans la gestion des déchets et demandé à la table ronde ad hoc de poursuivre ses travaux. Le 20 décembre 2007 cette table ronde a conclu, s'agissant du BTP, à l'obligation de diagnostics préalables aux chantiers de démolition, à la création d'un instrument économique dédié à la prévention de la production des déchets et la mise en place de plans de gestion des déchets sous la responsabilité des conseils généraux. Pour leur part, les entreprises du secteur montrent qu'un processus industriel peut parfaitement se comporter comme n'importe quel écosystème puisque les déchets et rebus d'une entreprise deviennent ressources pour une autre. C'est ainsi que la démolition a fait place à la déconstruction et au recyclage avec des résultats encourageants. Ainsi, même si cela peut paraître paradoxal, les graves réalisées à partir du béton déconstruit sont le plus souvent de meilleure qualité que les matériaux naturels. La transformation des mâchefers, résidus d'incinération d'ordures ménagères, constitue également un produit compétitif pour les fonds de forme de voirie.

Pour illustrer la prise en charge d'un espace économique grandissant, la société spécialisée dans le recyclage des matériaux YPREMA a montré le 17 janvier 2008 à la presse qu'elle s'inscrit depuis sa création 1989 dans l'écologie industrielle en travaux publics. En Ile-de-France, elle a anticipé la réduction du trafic routier, promue par le Grenelle de l'environnement, en implantant trois de ses sites sur des terrains du Port autonome de Paris, respectivement à Lagny-sur-Marne (77), Bonneuil-sur-Marne (94) et Gennevilliers (92). Ainsi 40 % de son propre trafic entre les lieux de réception, de transformation et les points de vente s'effectue désormais par voie d'eau.

La mise en œuvre de tels progrès environnementaux suppose cependant que des lieux de traitement soient à proximité des zones urbaines sauf à rendre leur équilibre économique impossible. On objectera qu'un équipement de proximité de cette nature au service de l'aménagement apporte des nuisances aux riverains. Les schémas directeurs de cohérence territoriale (ScoT) et les plans locaux d'urbanisme (PLU) doivent dégager des compromis car c'est à ce prix que des réelles avancées seront constatées.

JPM.

► **Pour tous renseignements :**  
[www.legrenelle-environnement.fr](http://www.legrenelle-environnement.fr) - [www.yprema.com](http://www.yprema.com)

# Chassé-croisé frisquet... Du nord au sud et du sud au nord

■ François BODIN

## Rapide petit bilan des dernières années

*Depuis 8 ans maintenant l'association a orienté son activité en imaginant une collaboration avec les jeunes, via les étudiants des écoles d'ingénieurs géomètres. Les géomètres-experts constituent en effet le plus grand nombre des adhérents de l'association et il leur est très difficile de pouvoir s'absenter longtemps de leurs cabinets, obligeant il y a quelques années l'association à refuser des missions topographiques. Heureusement plusieurs enseignants professionnels et jeunes retraités ont rejoint les rangs des bénévoles et ont pu assurer quelques cours ou encadrement d'activité au Bénin ou à Madagascar.*

**D**evant cette situation difficile eu égard à la disponibilité des membres actifs de l'association, l'idée est venue de proposer à des élèves en fin de cycle ingénieur de choisir un thème de TFE à réaliser en collaboration, pour les parties de topographie conventionnelle, avec leurs homologues de première année d'un pays qui accepterait ce type d'échanges, ce qui s'est déroulé au Bénin pendant plusieurs années. Parallèlement l'association devait répondre à quelques demandes purement techniques dans le cadre de travaux de base et a pris le risque, après réalisation des premières missions, de passer ce flambeau aux élèves de première et seconde année de l'ESGT ; cette collaboration dans le cadre de projets d'adduction d'eau à Madagascar avec



l'association IDEES fonctionne toujours. D'autres projets sont venus se greffer sur ces levers, en particulier avec l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo dont les élèves manquaient de TP. Les étudiants français ont donc ajouté à leur périple malgache la rencontre et le partage de TP avec leurs homologues de la Grande Ile.

Enfin il y a deux ans le projet de faire venir pour leur TFE des étudiants étrangers a pu aboutir après maintes péripéties administratives, de même que la participation en début de séjour d'un professionnel avec les étudiants français a pu permettre de faire tomber quelques barrières et de nouer des contacts pour l'avenir.

Même si rien l'équipe du bureau a été bien occupée puisque à ces activités sur place il faut ajouter le suivi des stages ou des TFE, la recherche de matériels en don (merci Leica, soutien fidèle) et leur acheminement, la logistique et la recherche de stages ou visites pour les étudiants malgaches accueillis...



## Et l'avenir ?

On dit que le premier travail d'un président d'association est de trouver son successeur, garant de la continuité de l'action... tâche difficile semble-t-il à GSF puisque depuis 1999 vous avez devant vous toujours le même bureau, qui doit maintenant laisser la place à du sang neuf, les idées commençant à manquer ! Ce futur bureau trouvera à suivre un TFE à Madagascar, une nouvelle mission d'étudiants ESGT à soutenir vers le Burkina Faso et l'"habituelle" mission vers Madagascar à piloter en qualité de Maître de stage. Merci donc à ceux qui accepteront de poursuivre ces actions, parfois ingrates, souvent gratifiantes quand on constate le bénéfice qu'en tirent les uns et les autres. ●

# Dans les terres australes et antarctiques françaises



■ **Paul COURBON**

*Avec une pensée pour Hervé Guichard et Hervé Durand de Corbiac Ingénieurs Géographes auxquels nous devons la carte des Kerguelen.*

**Les Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF) comprennent l'Archipel Crozet, l'Archipel Kerguelen, les îles St-Paul et Amsterdam et évidemment, la Terre Adélie. Il faut y ajouter les îles éparses : Tourmelin, Juan de Nova, Bassas da India, Europa et les Glorieuses, petites îles situées non loin de Madagascar, d'une superficie de 1 à 30 km<sup>2</sup> et qui abritent des stations météo ou détachements réduits de l'armée.**

**L'administration de ces îles est dirigée par une préfecture dont le siège est à St-Pierre de la Réunion.**

**Un bateau, le Marion Dufresne, assure quatre fois par an le ravitaillement et la desserte de trois bases situées dans l'archipel Crozet, à Kerguelen et à l'île d'Amsterdam.**

## Un peu d'histoire et... de géographie

Au XVIII<sup>e</sup> siècle, on supposait qu'un continent austral équilibrait le continent septentrional. Plusieurs expéditions furent entreprises dont les chefs les plus connus furent

Bougainville, La Pérouse, Cook. Aussi, la découverte des îles Kerguelen est-elle récente. Marion Dufresne et Crozet, qui naviguaient pour la Compagnie des Indes, découvrent tout d'abord l'île de l'Espérance (aujourd'hui Marion et possession sud africaine) puis l'île de la Caverne, (aujourd'hui Prince Edward et possession sud africaine). Ils découvrent ensuite, entre le 22 et 24 janvier 1772, les îles d'un archipel appelé aujourd'hui Crozet. Ce sont l'île des Apôtres, l'île aux Cochons, l'île de l'Est et l'île de la Possession où fut laissé un parchemin dans une bouteille, au pied d'un cairn. Ce parchemin prenait possession de l'archipel au nom du roi de France.

Le 16 février de la même année, la flotte de Yves de Kerguelen de Trémarec découvre une nouvelle île encore plus au sud. Les mauvaises conditions météorologiques ne permettent que de laisser un parchemin dans une bouteille déposée au pied d'un cairn. En 1775, Cook redécouvre l'île qu'il nomme l'île de la Désolation à cause du climat exécrable et de l'absence totale de végétation. En 1776, honnêtement, il reconnaît la découverte de l'île par Kerguelen.

Plus tard, l'île fut occupée par les baleiniers américains de Nantucket. Après l'indépendance des Etats-Unis, interdits par l'Angleterre de pêcher au Nord, ils vinrent pêcher à Crozet et Kerguelen. Durant le XIX<sup>e</sup> siècle, la fréquentation de ces îles est majoritairement américaine, un peu anglaise et très peu française ! Pourtant, en 1893, c'est la France qui en fait officiellement acte de possession ! Cependant, la première base permanente n'y sera installée qu'en 1950.

Situées entre le 46<sup>e</sup> et le 50<sup>e</sup> parallèle sud, ces îles sont donc



**L'hélicoptère nous dépose en Baie Américaine. Un endroit merveilleux. Deux petites cabanes, une qui sert de magasin et une autre où nous nous entassons à quatre pour dormir, manger et travailler.**

proches des 50<sup>e</sup> hurlants. Les courants marins froids venant de l'Antarctique influent sur le climat. Sur les côtes, si l'hiver n'est pas très froid à cause de l'influence maritime (-2 à -5°), en été, on a seulement entre 2 et 14°. Pourtant, nous ne sommes qu'à la latitude de Bourges ! Quant au vent, il souffle quasiment en permanence avec des sautes à 100 ou 150 km/h.

### La mission patrimoine 2006-2007

Les TAAF ont un service du patrimoine chargé de sauvegarder les vestiges de l'occupation humaine dans leur territoire. Jean-François le Mouel, chef de ce service me contacta suite à une recommandation de "Géomètres sans frontières" pour participer à des missions durant l'été austral 2006-2007. Nous embarquons à la Réunion, le 3 novembre 2006, par la troisième rotation annuelle du Marion Dufresne. Le 10, nous étions débarqués par hélicoptère dans la Baie Américaine à l'Île de la Possession (Crozet) où nous allions rester un mois, logés sommairement dans une petite cabane.



### ■ Le fondoir à graisse de Crozet

Ici, notre travail consistait à faire un relevé détaillé, pierre par pierre, d'un fondoir à graisse de baleines, unique en son genre et datant de la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle. Menacé par la mer qui s'en était rapprochée, il fallait le démonter



**A quelques jours de l'été, dernière chute de neige.**



**Aujourd'hui Crozet et Kerguelen sont des réserves naturelles protégées où l'homme fait bon ménage avec des espèces qu'il massacrait il n'y a pas longtemps.**



**Paysage typique de Kerguelen : un rivage profondément découpé par l'érosion glaciaire.**

- avant qu'il ne soit détruit. Toutes les pierres étaient numérotées au marqueur blanc. Le lever terminé, les photos prises, nous pouvions commencer le démontage. Plus de 3 tonnes de gros galets de solide et lourd basalte furent transportées à 300 mètres de là, la plupart à dos d'homme, ou tirées dans une civière quand leur poids était rédhibitoire. Les plus lourdes dépassaient le quintal. Qui a dit que le métier de topographe était de tout repos ? Quant au chaudron en fonte reposant sur ces pierres, d'un poids de plus de 400 kilos, il fut évacué par hélicoptère, lors de notre récupération en fin de mission.

Ensuite, mon travail fut d'établir un plan d'implantation détaillé pour les maçons chargés de reconstituer le fondoir ultérieurement. Ce plan d'implantation, par rapport à des règles verticales qui seront fixées dans une dalle en béton, était accompagné d'explications et de toute une série de photos. Le 11 décembre, l'hélicoptère nous reprenait pour nous ramener sur le Marion Dufresne dont c'était la quatrième rotation annuelle.



**Le bord du chaudron est visible en haut à gauche. Nous avons numéroté toutes les pierres et marqué en rouge chaque point relevé.**

## La Baie de l'Observatoire

Nous mettions alors le cap sur Kerguelen et le 18 décembre, nous étions débarqués, toujours par l'hélicoptère, en Baie de l'Observatoire où devait se dérouler notre deuxième mission. Nous allions y camper pendant deux mois avant le retour par barge à Port-aux-Français "capitale" de Kerguelen.

### ■ La mission britannique du "transit de Vénus" (1874)

La Baie de l'Observatoire est l'un des sites les plus connus de Kerguelen. Quand on y arrive en bateau, on voit de loin une grosse stèle blanche, vestige de l'expédition britannique de 1874. Cette expédition faisait partie de l'une des trente expéditions qui eurent lieu au même moment en différents points du globe pour observer le passage de Vénus devant le soleil. Prévu en premier par Kepler, en 1631, cet événement n'arrive que tous les 107 ou 122 ans, aussi met-il la communauté scientifique en émoi quand il se produit. Pourquoi avoir choisi les Kerguelen où les mauvaises conditions climatiques constituaient un gros risque d'échec sur la courte période d'observation ? Tout simplement parce que le transit se déroulait durant l'été austral où les journées sont beaucoup plus longues. De plus, à latitude égale, à cette époque de l'année, la plus grande hauteur du soleil au-dessus de l'horizon représentait de meilleures conditions d'observation que dans l'hémisphère nord.

Combinant la vitesse apparente du soleil et celle de Vénus, le temps du transit de Vénus devant le soleil peut durer jusqu'à 6 heures au maximum (4 h 11 en 1874). Cela signifie qu'on ne peut le voir de tous les points de la terre, une grande partie du globe terrestre étant plongée dans la nuit durant ces quelques heures. De plus, pour des questions de clarté et de réfraction, on ne peut faire d'observations quand le soleil est près de l'horizon. De ce fait, les conditions optimales d'observation ne touchent qu'un quart du globe.

La mission "transit de Vénus" n'impliquait pas que l'observation de ce phénomène durant les quelques heures de son déroulement. Il amenait aussi de nombreuses autres observations et calculs. Ces calculs demandèrent plusieurs années



**Notre camp en Baie de l'Observatoire. Trois d'entre nous ont préféré camper, ronflements obligent !**

après les différentes expéditions. L'informatique n'était pas encore née.

**Méthodologie.** L'un des premiers impératifs était de déterminer la position la plus précise possible du lieu d'observation. A l'époque, la seule méthode était l'astronomie de position, dont l'une des plus grosses contraintes est de connaître le temps exact par rapport à Greenwich. Bien que de grands progrès aient été accomplis depuis le XVII<sup>e</sup> siècle, les horloges n'étaient plus assez précises après un ou plusieurs mois de navigation. En 1874, le temps de Greenwich pouvait être obtenu quand on avait une liaison télégraphique, ce n'était pas le cas à Kerguelen. Il fallait alors employer une autre méthode plus complexe et beaucoup plus longue à mettre en œuvre : celle des "transits lunaires".

Les instructions données par les scientifiques (Airy's instructions) demandaient 100 doubles observations de la hauteur et de l'azimut de la lune ainsi que 30 mesures du passage de la lune au méridien. Il faut préciser que la définition du méridien est plus difficile dans l'hémisphère sud où l'étoile polaire n'est pas visible. De plus, les conditions climatiques n'étaient pas propices pour faire un aussi grand nombre d'observations dans un temps restreint. Cela explique que les navires Volage et Supply aient du mouiller plus de quatre mois aux îles Kerguelen, dont un mois et demi après le transit de Vénus.

Travailler dans les dures conditions de Kerguelen nécessitait un minimum de confort, aussi plusieurs constructions en bois, préfabriquées en Angleterre, avaient-elles été érigées sur place. De plus, des observations et mesures autres que les astronomiques avaient été prévues. Cela nécessitait une infrastructure assez lourde.

### ■ Baie de l'Observatoire bis, l'expédition polaire allemande (1901-1903)

Carl Friedrich Gauss ne fut pas seulement le brillant mathématicien qui laissa son nom à la courbe de la théorie des erreurs et qui inventa, en même temps que Legendre, la méthode des moindres carrés. Il s'intéressa aussi au magnétisme, formulant en 1839 "La théorie générale du magnétisme



Une fois l'herbe arrachée, nous signalons les artefacts qui seront relevés par le topographe. Au fond, les restes de la charpente écroulée de la maison allemande



Vestige de la station météo allemande installée au sommet du Treppe ou Mont de Vénus (alt. 151), à 2 km de l'habitation.

terrestre", dont l'étude devint une tradition chez les Allemands. Aussi, le 9 novembre 1901, une "mission polaire allemande" débarquait-elle à Kerguelen pour y étudier le magnétisme terrestre ; elle y resta dix-sept mois, jusqu'au 30 mars 1903. Mais, un séjour aussi long nécessitait une solide infrastructure. Une nouvelle maison d'habitation fut construite sur les ruines de la maison anglaise, ainsi qu'un observatoire de magnétisme relatif, un autre de magnétisme absolu et deux stations météorologiques. Une carte 1/25.000 fut établie dans un rayon de 3 km.

### ■ Baie de l'Observatoire ter, enfin une présence française

Du 1<sup>er</sup> février 1912 au 14 février 1913 Valérien Culet et le Baron Decouz étudièrent les possibilités d'élevage du mouton dans les îles Kerguelen. Mais, avec la rigueur du climat, les constructions y vieillissent très vite et l'habitation allemande était déjà en mauvais état. Ils en construisent une autre plus petite, ainsi qu'un enclos à bétail. Mal préparés aux dures conditions des lieux, leur expérience fut un échec.



En fin de mission, tout a été répertorié et dégagé. Les fondations de l'habitation allemande apparaissent.



Le mont Ross (1 855 m) point culminant des Kerguelen.

## ■ ■ ■ A la recherche du temps perdu ?

En Baie de l'Observatoire, on n'est pas du côté de chez Swann et encore moins à l'ombre d'une jeune fille en fleur ! Dans cet univers minéral, sévère, mais magnifique, ce serait plutôt la quête de l'absolu ! Quelles émotions que de faire revivre un passé proche et lointain à la fois, 133 ans ou 104 ans au plus. Quelle émotion de faire ressurgir le fantôme des "aventuriers de la science" ! Mais, cette recherche, bien que s'appuyant sur des documents existants, n'a rien de littéraire. C'est une recherche absolue, avec des méthodes de fouilles archéologiques précises. Pour le topographe, il faut d'abord faire un état des lieux. Le site s'étend sur près de 300 mètres et une superficie de 4 hectares. Il faut relever tous les détails et vestiges visibles : les "mikados" formés par les amoncellements de planches des anciennes constructions écroulées, les alignements de pierres correspondant aux chemins par lequel 360 tonnes de matériel furent acheminés à dos d'homme du débarcadère aux différents sites, les drains creusés pour assainir, etc.

Ensuite, le topographe se met au service des archéologues : au fur et à mesure que les planches sont dégagées, il faut relever les nouveaux éléments qui apparaissent. Puis, au fur et à mesure que les végétaux sont enlevés et la terre râclée, relever l'emplacement de tous les artefacts, c'est-à-dire objets divers avec un numéro et un code défini à l'avance. Emotion de retrouver une assiette, un couteau, des bouteilles dont certaines sont encore pleines, un verre de lampe à pétrole, une paire de lunettes, un badge qui nous font revivre la vie qui se déroulait ici il y a plus d'un siècle. Objets inanimés avez-vous donc une âme...

Autre émotion, de rechercher, en fonction de la place et de l'orientation des planches et poutres, comment la maison s'est écroulée et de retrouver les fondations sous 15 ou 20 centimètres de terre et d'un lacs serré de racines d'acaena. Autre défi que celui de mesurer les morceaux de poutres cassées, les tenons, les mortaises, tout ce qui permettait de les assembler et de reconstituer la charpente de l'habitation. De trouver des planches intérieures et extérieures des murs, ainsi que la poudre de liège placée entre les deux qui permettait une isolation. Il y a là toute une foule de mesures et de recherches dans lesquelles le topographe a un rôle primordial.

## ■ Les pierres de transit (transit stones)

Il ne restait plus grand-chose du passage des Britanniques, les vestiges de leur habitation avaient été recouverts par celle des Allemands, plus de trace de leur observatoire. Restaient l'empierrement des chemins depuis leur lieu de débarquement et, surtout, les deux pierres de transit (transit stone). Hautes de 1,48 m, d'un poids de 400 kg chacune, elles étaient taillées dans un calcaire blanc de l'Essex. L'une de ces pierres était encore debout, posée sur l'acaena, herbe locale épaisse qui a tissé sur le sol un lacs inextricable de racines. L'autre pierre, brisée en deux était couchée. En creusant, à 15 ou 20 centimètres de profondeur, nous retrouvions une dalle en béton que nous nous empressions de dégager. Rectangulaire, elle reposait sur le lit rocheux. Après relevé, elle apparaissait rigoureusement orientée est-ouest. C'est sur elle qu'avaient été placées les deux pierres de transit pour constituer un support remarquablement stable lors des observations du passage de la lune au méridien. Là encore, petite dose d'émotion que de reconstituer ce qu'avaient fait nos prédécesseurs géographes 133 ans avant nous, avec un soin et une rigueur que la contrainte d'aller plus vite (le temps c'est de l'argent) nous a fait perdre...

## ■ Mémoire d'outre-tombes

Ceux qui voyagent dans des endroits perdus, très éloignés de notre bonne Europe, ont parfois l'occasion de trouver la tombe d'un voyageur ou d'un aventurier venu terminer son périple terrestre là où personne ne viendra jamais déposer un bouquet de fleurs. Cela est toujours émouvant et amène de nombreuses questions. "N'aurait-il pas mieux fait de rester dans la tiédeur de son pays, au milieu de l'affection des siens ?" Mais on oublie souvent que jusqu'à une époque récente, les marins péris en mer n'avaient d'autre sépulture que l'océan.

En Baie de l'Observatoire, une plaque nous rappelle le météorologue allemand Josef Enzensperger, mort ici du bérubéri, en

Les deux pierres de transit, en Grande-Bretagne avec un appareil pour les mesures méridiennes. A gauche, une horloge astronomique.



La pierre de transit encore debout a été gravée d'un trait horizontal et de M.W=15M., en creusant, nous avons retrouvé la dalle de béton où étaient calées les deux pierres.

février 1903, une semaine avant son trentième anniversaire, mais sa tombe a disparu, malgré nos recherches, nous n'avons pu la retrouver.

Autre tombe, située 700 mètres au nord-ouest de notre lieu de fouille, celle de John, jeune marin du navire britannique HMS Volage qui avait amené la mission d'observation du passage de Vénus en 1874. Agé d'à peine plus de 20 ans, John, dont on ignore même le patronyme, mourut en cette terre lointaine. A 500 mètres du camp, nous avons recherché et retrouvé la tombe des deux coolies chinois, morts du bérubéri lors de l'installation de la mission allemande. Un européen, sans doute, y a laissé une croix pour leur donner une sépulture humaine.

## Considérations "géotopographiques"

Il est toujours intéressant d'analyser ce que d'autres géographes ou topographes ont fait avant vous, avec d'autres méthodes, et de le comparer à ce que l'on trouve.

### ■ Rattachement GPS, coordonnées géographiques

J'ai déterminé, au GPS de poche, quatre points en plusieurs sessions pour caler le lever. Ces quatre points ont aussi été relevés au théodolite. Après adaptation au mieux, par translation et rotation de la figure théodolite aux coordonnées GPS, la moyenne des résidus est un peu supérieure au mètre. Lors de la rotation du bateau d'avril 2007 qui nous ramenait en France, une équipe IGN recalait mes deux points extrêmes au GPS différentiel, un GPS fixe stationnant sur le point fondamental de Port-aux-Français. Une différence de 0.34 m était trouvée sur le point le plus au nord et de 1,88 m sur le point le plus au sud de mon lever. Voilà qui est rassurant quant à la fiabilité des GPS de poche en "terra incognita"!

### ■ Déterminations antérieures

Il est intéressant de comparer les coordonnées de la pierre de transit issue des différents levers, bien qu'une comparaison brute soit difficile entre des coordonnées issues de diverses observations astronomiques et du GPS\*.

Auteur détermination	Année	Latitude	Longitude	Altitude
GPS Magellan	2006	49°25'13"	69°53'04 "	14
1/100.000 IGN	1963-65	49°25'16,3"	69°53'02	
Venus transit anglais	1874	49°25'11,5 "	69°53'07,5"	
Expédition allemande	1901 1902	49°25'15,2"	69°53'24,3"	15

La précision du GPS est de l'ordre de 2 mètres, comme nous l'avons vu. Ce sont les meilleures.

La précision graphique de la carte IGN est de l'ordre de 20 mètres. Mais, c'est une carte de reconnaissance où certaines zones n'ont pas la précision absolue des cartes régulières. Ici, les différences ne sont que de 40 m en X et 100 m en Y. Mais au

(\*) Pour la petite histoire, on cite l'exemple de ce bateau de notre marine nationale qui, navigant au GPS et se fiant aveuglément à ce dernier, avait heurté des écueils mentionnés sur la carte, mais déterminés astronomiquement !

point fondamental et en d'autres points de la carte, les coordonnées astronomiques ont une différence de l'ordre de 150 m en X et de 200 m en Y par rapport aux coordonnées GPS.

La précision des coordonnées anglaise est excellente : 85 mètres environ par rapport au GPS.

Les coordonnées allemandes sont kutchées sur la carte 1/25.000. Elles sont moins bonnes : en latitude on n'a qu'une différence de 40 m environ, ce qui est excellent, mais en longitude, on trouve un écart de l'ordre de 400 m du en partie à un moins bon calage des chronomètres.

### ■ Les altitudes

Les Allemands avaient dressé une carte 1/25.000 de la Baie de l'Observatoire et fait quelques mesures de gravimétrie. Aussi était-il normal qu'ils aient défini un point de référence en altitude. Sur l'une des pierres de transit a été gravé un trait horizontal avec l'indication "M.W.=15M," que nous avons interprété comme : Mittel Wasser (Niveau moyen des mers) = 15 mètres. Cette altitude de 15 m dépend du point 0 choisi, ce qui est aléatoire sans marégraphe. Avec une mauvaise estimation du niveau 0, nous trouvions à ce trait 15,14 m, altitude qui sera ramenée à 15.22 m après la détermination GPS de l'IGN. Il faut cependant préciser que la pierre de transit ayant été ripée par rapport à sa position originale, il semble illusoire de discuter de précision centimétrique.

### ■ Autres comparaisons

Et autres émotions ! Après avoir retrouvé l'emplacement de l'observatoire de mesures de magnétisme absolu, nous avons aussi retrouvé les repères utilisés par les Allemands pour orienter leurs appareils. Les mesures que nous avons faites étaient très proches de celles données par nos prédécesseurs. Quelle satisfaction...

Après avoir retrouvé les fondations de l'observatoire de magnétisme relatif, nouvelle satisfaction de constater qu'il était orienté suivant le nord magnétique de l'époque, lequel était différent de près de 20 grades du nord magnétique actuel. Aujourd'hui, la déclinaison magnétique à Kerguelen est supérieure à 60 gons, témoin de l'éloignement entre les pôles magnétique et géographique sud.

## En guise de conclusion

La lecture de "Mesurer la Terre" de Jean-Jacques Levallois ou des "Sciences géographiques dans l'Antiquité" de Raymond d'Hollander m'avait passionné. J'ai eu le bonheur de revivre cette passion d'une manière encore plus intense *in situ*. Avec nos moyens modernes et les progrès de la technique, nous ne faisons plus partie des grands aventuriers de la science... même quand nous allons travailler aux Kerguelen, ou plus au Sud.

Nota : il est possible de revivre cette mission par Google en consultant le site [archaeobs.com](http://archaeobs.com).

## Contact

**Paul Courbon**

[Paul.courbon@yahoo.fr](mailto:Paul.courbon@yahoo.fr)

# Aurélien Bory :

■ Jean-Pierre MAILLARD

*Longtemps cantonné dans l'espace du divertissement, le cirque a été rattaché en 1979 au Ministère de la culture puis reconnu en tant qu'art de la piste. Ce classement a acté le renouvellement du monde du cirque qu'il soit traditionnel ou contemporain. Au croisement du théâtre, de la danse, des musiques, ce mode d'expression va même jusqu'à réinterroger les arts plastiques. C'est dans cet élan de reconnaissance nationale et grâce au travail patient d'élus de l'agglomération que la réhabilitation du Cirque-Théâtre d'Elbeuf a été achevée à la fin 2007.*

## Le Cirque-Théâtre d'Elbeuf

Vieux de cent-quinze ans, chargé d'Histoire, l'équipement public retrouve une place centrale dans la cité et la société elbeuviennes. La construction de l'édifice est apparue comme le symbole du prestige de la ville et de son industrie textile qui a trouvé son origine, en 1667, dans la création de la Manufacture royale du drap d'Elbeuf fondée par Colbert. La mémoire collective se rappelle d'une salle de spectacles qui n'a pas uniquement présenté des productions circassiennes depuis sa mise en service en septembre 1892. Jusqu'à sa fermeture au public en 1995, le Cirque-Théâtre a accueilli des pièces de théâtre, des matchs de boxe et de catch, des concerts, des attractions, des conférences ou encore des meetings politiques sans oublier la fête celle, comme dit Roger Caillois, "qui ramène le temps de la licence créatrice, celui qui précède et engendre l'ordre, la forme et l'interdit". Ce qui est à présent le siège du Centre des arts du cirque de Haute-Normandie a aussi porté tout au long des années les premiers pas et la grande époque du cinéma jusqu'à lui être complètement dédié de 1942 à 1963 – on allait alors à l'Eden –. Ainsi, pendant cent ans, le Cirque-Théâtre a été véritablement l'endroit dans la ville où on se changeait les idées, où il était bon d'être vu, même si, à l'image de la lente dégradation du lieu liée à celle de l'économie locale, le Cirque-Théâtre s'est endormi à la fin du siècle passé... pour mieux renaître en 2007.

La piste d'un diamètre normalisé de 13 m est enchâssée dans un bâtiment

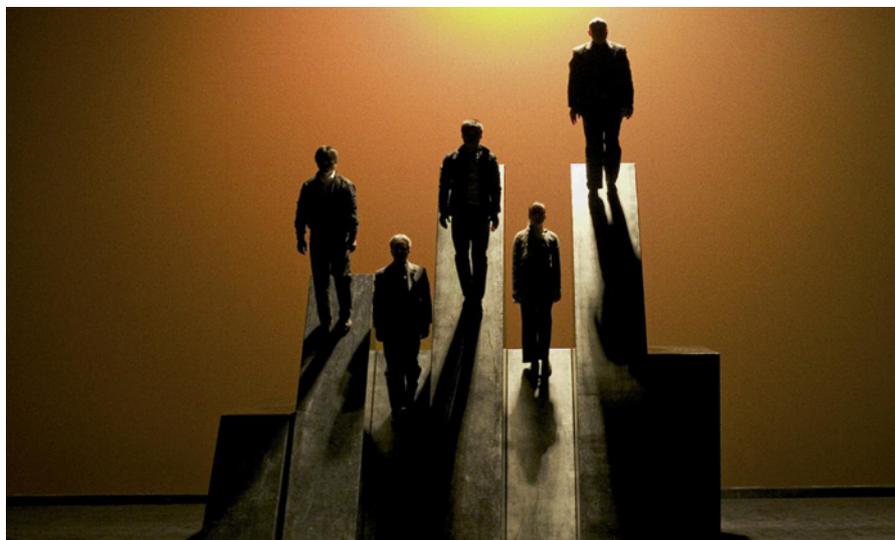
octogonal conçu par les architectes Laquerrière père et fils, de la même école que Victor Baltard et Gustave Eiffel. Haut de plus de 20 m, le dôme est couronné d'un lanterneau. D'une capacité de 2200 places en 1892, 900 aujourd'hui, l'espace est complété par une scène à l'italienne de 9 m d'ouverture et 10 m de profondeur. La géométrie du lieu a récemment rencontré celle développée par un jeune metteur en scène, Aurélien Bory, ce qui n'est pas banal dans une salle d'art vivant.

## Qi qiao ban ou Les sept planches de la ruse

Le qi qiao ban, littéralement "Les sept planches de la ruse" en chinois, aussi appelé tangram, est un jeu de solitaire. Il est composé de sept éléments géométriques : cinq triangles rectangles isocèles de trois tailles différentes, un carré, un parallélogramme, qui, agen-

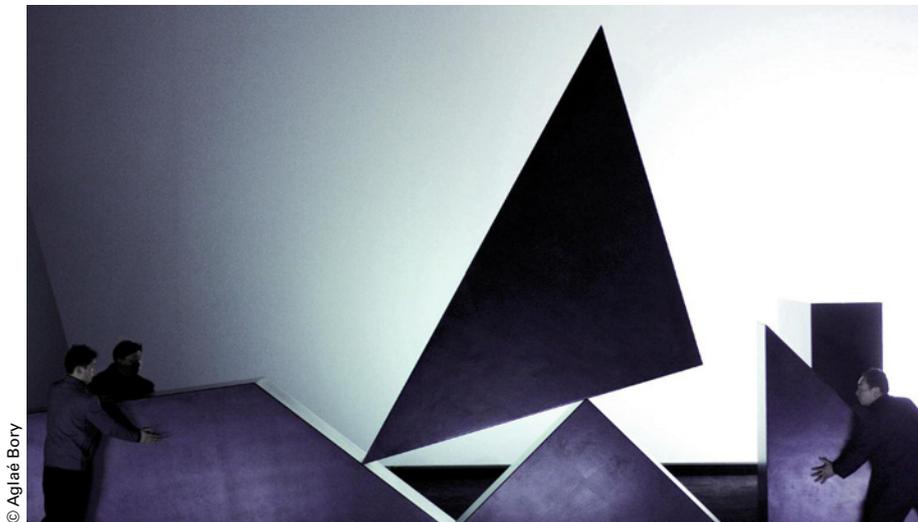
cés d'une certaine manière forment un grand carré. En variant les juxtapositions une multitude de figures géométriques peut être composée, certaines étant d'ailleurs très représentatives des rapports géométriques et mathématiques entre les différents éléments.

Le jeu se pratique habituellement sur une table et prête à la réflexion. Comme pour un puzzle, après avoir mélangé les pièces, on cherche à reconstituer le carré d'origine. Sa pratique suscite aussi l'imagination puisqu'en déplaçant une ou plusieurs pièces on peut facilement figurer un immeuble, une montagne, un pont... Dans un grand sens de la mesure, Aurélien Bory, a construit un qi qiao ban géant qui s'inscrit dans un carré de 8 m de côté. Pour déplacer les pièces ou les redresser il ne faut pas moins de quatorze acteurs, cinq femmes et neuf hommes. Membres de l'Opéra de Pékin (genre artistique à part entière) de la ville de Dalian en Chine –



© Aglaé Bory

# Qi qiao ban (le tangram)



© Aglaé Bory

ville portuaire calée entre la Mer jaune et la Mer de Bohai –, d'âge très différent, ils sont acrobates, chanteuse, musicienne. La distribution explique aisément que la création soit intervenue le 1<sup>er</sup> décembre 2007 justement à Dalian. Le spectacle poursuit sa carrière en se produisant maintenant en France et en Europe. La représentation s'ouvre sur les sept planches de la ruse, volumes posés à l'horizontale et assemblés en carré.

Dans une composition de sept tableaux l'artiste joue avec nombre de combinaisons dans les trois dimensions et entraîne le spectateur dans sept métaphores géométriques. La dimension ludique prévaut. Comme des joueurs de tangram, les acteurs s'engagent dans une recherche qui les pousse à manipuler les sept volumes jusqu'à leur donner du sens. Quand un paysage imaginaire se fige, il sert de support à une séquence mimée. Si des pics incitent à escalade, les pentes à 100% sont gravies ou descendues avec une maîtrise déconcertante. Si un mur est élevé, il est franchi à coup sûr quand bien même, dans une démarche comique, plusieurs essais sont nécessaires. Si une façade de rue apparaît, le nombre des participants restitue parfaitement le sentiment d'une foule qui marche avec souplesse et détermination. Il en est de même quand l'impression cinématique est signifiante. Si des mouvements tectoniques sont évo-

qués, le personnage coincé dans une faille s'emploie à dominer autant que possible la pesanteur. Si des mouvements chaotiques sont suggérés, un autre personnage réussit à se sortir d'une situation périlleuse en montrant la fragilité humaine face aux forces naturelles. Si un grand vide est à franchir, un troisième personnage engagé sur un parallélogramme fluctuant met tout son art de l'équilibre au service de sa sauvegarde. *In fine* la quête conduit le groupe à rétablir la composition d'origine, verticale cette fois, comme si on invite l'homme à terre à n'avoir de cesse que d'explorer la 3<sup>e</sup> dimension.

On l'aura compris, le spectacle n'est pas tout à fait du cirque, ni de la danse, ni du mime, ni de l'opéra, ni un jeu d'ombres chinoises mais il est tout à la fois, une expression qui colle avec son temps, une expression qui à défaut de texte peut être également reçue comme universelle. Le jeu des acteurs et du décor est accompagné par une musique tantôt chinoise - chantée et jouée sur scène, tantôt occidentale, cette dernière étant enregistrée. L'auteur a perçu le tangram comme *"offrant un territoire transculturel avec les mathématiques, à la fois science fondamentale de la pensée chinoise et pilier de la culture européenne"*. Il a tenu à placer l'homme au milieu de forces mathématiques qui le dépassent et pour ce faire demander

## Aurélien Bory

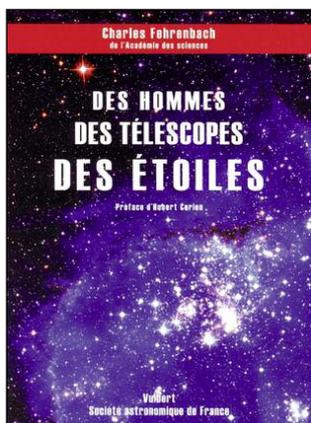
Aurélien Bory, né en 1972, vit et travaille à Toulouse. Après des études scientifiques inachevées -physique et acoustique architecturale- il devient jongleur et se forme à la scène au sein de la troupe Tattoo théâtre de Madlden Matéric. Depuis 1999, il dirige la Compagnie 111 qu'il a fondée. Avec *Les sept planches de la ruse* il signe sa septième création. Elle entretient dans la durée son esthétique basée sur la géométrie qui s'est notamment révélée dans sa trilogie sur l'espace : IJK, Plan B et Plus ou moins l'infini.

Avec *qi qiao ban*, Aurélien Bory, déclare *participer à l'invention d'un monde à part, d'un continent fictif là où "les yeux furbonds des rois adamantins valent moins que les sourcils baissés des bodhisattvas"*. La première tournée du spectacle passe par les scènes nationales d'Annecy (1<sup>er</sup> et 2 avril 2008), Chambéry (4 et 5 avril), la Roche-sur-Yon (11 et 12 avril) et la Rochelle (21 et 23 avril).

aux acrobates de mettre en lumière un équilibre fragile qui contraste avec leur habituelle virtuosité. La dimension géométrique est d'autant plus claire qu'incidemment l'observation visuelle démontre sans discours les théorèmes qui régissent, par exemple, l'égalité des angles et des côtés.

La rubrique "Art et géométrie" ne s'attendait pas à trouver sur une scène la géométrie à une telle place, tant la taille des volumes en impose aux acteurs obligés de s'unir pour les dominer. Pourtant d'une sobriété évidente, le rôle du décor est central au point d'être perçu comme un quinzième acteur tant sa mobilité est quasi constante. L'abstraction pure se révèle une nouvelle fois figurative, mais les lecteurs d'XYZ le savent déjà. ●

► Pour tous renseignements :  
Cirque-Théâtre d'Elbeuf :  
[www.cirquetheatre-elbeuf.com](http://www.cirquetheatre-elbeuf.com)  
Compagnie 111 : [www.cie111.com](http://www.cie111.com)



## ■ Des hommes, des télescopes, des étoiles

**Charles FEHRENBACH**

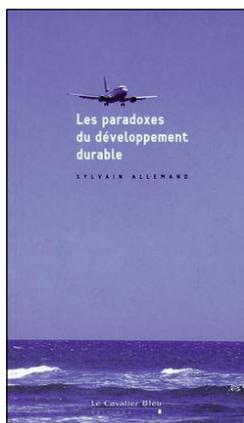
*D'où l'astrophysique française vient-elle et, avec elle, toute l'astrophysique européenne ? C'est Charles Fehrenbach qui le raconte ici, lui qui, né en 1914, fut non seulement le témoin mais, surtout, l'un des principaux acteurs de cette aventure scientifique, technique et politique.*

Encouragé par Gabrielle Flammarion et par André Danjon, Charles Fehrenbach est membre de l'Académie des sciences depuis 1968. Il fit ses débuts en 1931, l'astronomie française étant alors très faiblement dotée. La fondation Dina vint alors lui apporter un soutien décisif qui se traduisit notamment par la création du laboratoire d'optique de l'Observatoire de Paris et celle de l'Observatoire de Haute-Provence dont Charles Fehrenbach, inventeur du prisme-objectif portant son nom, sera le directeur jusqu'en 1983. L'essor de l'astrophysique et l'exploration du ciel austral exigeant enfin l'installation de grands observatoires, fruits d'une collaboration internationale, on retrouve Charles Fehrenbach en pionnier de l'European Southern Observatory, PESO, le créateur du sigle sous lequel elle est désormais célèbre. Il en a présidé la commission des instruments et favorisé la création de l'observatoire de La Silla (Chili), celle de l'observatoire Canada-France-Hawaï puis les projets du VLT.

► **Vuibert, Société astronomique de France**

**Prix : 32 € – 346 pages**  
**ISBN : 2-7117-4038-2**

**Le numéro ISBN indiqué pour chaque ouvrage vous permet de le commander en librairie.**



## ■ Les Paradoxes du développement durable

**Sylvain ALLEMAND**

Le développement durable a 20 ans. Le temps d'une génération, le temps d'un premier bilan. L'expression, en elle-même, tient du paradoxe : comment, le développement, synonyme de mouvement, peut-il être durable ? Notion ambivalente, le développement durable, s'appuie sur l'environnement mais aussi, on l'oublie souvent, sur l'économie et le social, avec la volonté de concilier ce qui paraît inconciliable : croissance économique et progrès social, dans le respect des ressources naturelles. Commerce équitable, réchauffement climatique, finance solidaire, OGM..., les chiffres controversés et les effets pervers ne manquent pas ! Pourtant, loin de discréditer le développement durable, ils sont autant d'aiguillons pour en dépasser les contradictions, le remettre sans cesse en question et innover.

► **Le Cavalier Bleu éditions**

**Prix : 22 € – 192 pages**

**ISBN : 978-2-84670-166-2**



## ■ François Arago, un savant généreux

Physique et astronomie au XIX<sup>e</sup> siècle

**James LEQUEUX**

François Arago est une figure dominante de la science française de la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle. Il a mis à profit son influence considérable pour aider Fresnel, Ampère et d'autres à développer et faire connaître leurs idées ; son apport personnel à la physique, à l'astronomie et à la géodésie est loin d'être négligeable. Il fut aussi un vulgarisateur hors pair et un promoteur de la science et de la technique. Un des derniers humanistes, Arago s'est intéressé à tout. C'est l'occasion pour l'auteur de décrire les progrès extraordinaires accomplis à cette grande époque de la science française, qui a vu naître l'optique physique, l'électromagnétisme et la thermodynamique. C'est aussi l'époque de la révolution industrielle, qui a inventé la photographie, le moteur à explosion, le moteur et le télégraphe électriques...

► **EDP SCIENCES**

**Prix : 35 € – 538 pages**

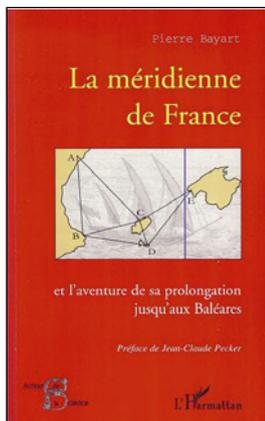
**ISBN : 978-2-86883-999-2**

## ■ Les Plus Beaux Portraits du National Géographic



Splendide collection de plus de 280 photos choisies avec soin dans les fabuleuses archives photographiques du National Geographic, ce livre est une puissante rétrospective de la photographie de portrait. Ces œuvres exceptionnelles relatent plus d'un siècle de notre histoire, visitent les coins les plus reculés de la planète et détaillent tous les aspects de l'art du portrait.

► **National Geographic - Prix : 39 € – 500 pages**  
**ISBN : 978-2845821323**



## ■ La Méridienne de France et l'aventure de sa prolongation jusqu'aux Baléares

**Pierre BAYART**

Entre 1806 et 1808, deux astronomes français, Jean-Baptiste Biot et le tout jeune François Arago, sont envoyés aux îles Baléares afin de prolonger les mesures sur le méridien de Paris. Tenter de préciser la valeur du mètre, nouvel étalon de mesure récemment adopté et mettre en œuvre la jonction géodésique avec l'île sauvage de Formentera, telle sera leur aventure, en pleine tourmente espagnole, par monts et par mers, pour fixer le terme austral de l'arc de méridien mesuré depuis Dunkerque.

*"Pierre Bayart mêle à une remarquable narration, la description de la progression géodésique et une relation aux accents picaresques de la vie sur l'archipel"*

Jean-Claude Pecker.

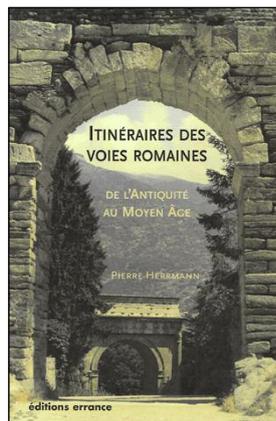
A propos de l'auteur :

Après des études à l'Université de Grenoble, Pierre Bayart s'installe aux îles Baléares. Il devient traducteur, puis enseignant à l'Alliance Française. Auteur d'articles sur Jules Verne et sur l'histoire maritime en Méditerranée, il collabore à la rédaction de l'Encyclopédie d'Ibiza et Formentera.

► **L'Harmattan**

**Prix : 21,50 € – 250 pages**

**ISBN : 2296038743**



## ■ Itinéraires des voies romaines de l'Antiquité au Moyen Âge

**Pierre Herrmann**

L'Empire romain était immense, de l'Angleterre à la Syrie, de l'Allemagne au Maroc. Les légions, les marchandises, les fonctionnaires y circulaient. L'empereur devait le gérer et y faire appliquer ses ordres. Pour cela, un vaste réseau routier fut implanté, tellement dense qu'il devint un symbole de l'ère romaine. Des bornes jalonnaient les routes pour aider les voyageurs. Mais quelle vision géographique un Romain avait-il de l'empire ? Des textes de géographes et des documents appelés "itinéraires" nous sont parvenus. Leur lecture et leur analyse nous renseignent sur le fonctionnement d'un empire où les déplacements, à pied et à cheval, étaient fondamentaux.

► **Éditions Errance**

**Prix : 34 € – 275 pages**

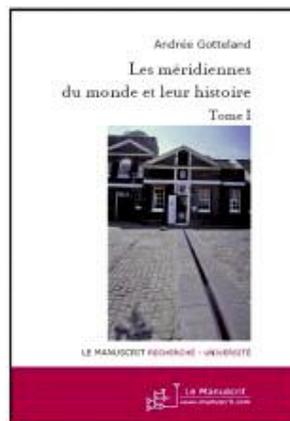
**ISBN : 978-2-87772-348-0**

## ■ les méridiennes du monde et leur histoire

**Livre en deux tomes**

**d'Andrée GOTTELAND, préfacé par Denis SAVOIE, Président de la Commission des cadrans solaires**

Les méridiennes sont des cadrans solaires permettant à la fois de définir l'heure



de midi et l'époque de l'observation. C'est un point d'ombre ou plus généralement une tache lumineuse projetée par un œilleton qui sert d'indicateur.

Midi peut être donné en "temps vrai", le tracé est alors une droite. Ou bien en "temps moyen", le tracé devient une sorte de 8 allongé.

Le travail considérable mené par Andrée Gotteland a été de recenser, le plus exhaustivement possible, les méridiennes de 28 pays du monde entier. Au total 1050 spécimens, soutenus par 500 photos en noir et blanc sont décrits minutieusement, précisant leur histoire, leur construction, leur utilité.

Nous découvrons en près de 1000 pages de véritables chefs d'œuvre artistiques, techniques, des concepts ingénieux, parfois complexes, utilisant un ou des miroirs pour rediriger la lumière solaire sur un mur, un plafond à l'intérieur d'un bâtiment.

Cet inventaire unique à notre connaissance a été réalisé à partir de nombreuses lectures d'ouvrages de gnomonique, de recherches en bibliothèque, de consultations d'inventaires.

L'auteur est bien connu des amateurs de cadrans solaires.

► **Le Manuscrit**

**2 volumes Prix : 78 € – 1 000 pages**

**En vente par correspondance**

**Internet : [www.manuscrit.com](http://www.manuscrit.com)**

### REPERTOIRE DES ANNONCEURS - N° 114

ECOLE CHEZ SOI	4	LEICA	2	SpaceEyes3D	21
GEOEVENEMENT	1	REIS STOLZEL	9	TOPCON	6
GÉOMEDIA	4° de couv	SOKKIA	22	TRIMBLE	2° et 3° de couv



## ■ La forme urbaine et l'enjeu de sa qualité

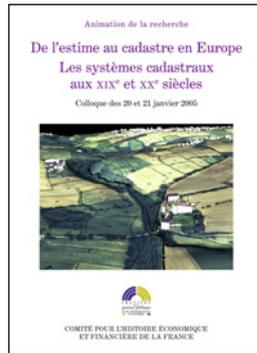
Xavier PRIGENT -

Anne Laure LE CABELLEC - Anne LE THIEC

Le Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU) a réservé le N°56 de sa collection Débats à l'Ordre des géomètres-experts. La forme urbaine est une notion polymorphe dont le sens dépend du contexte dans lequel il s'inscrit. Il existe cependant un certain nombre de registres et critères qui permettent de la qualifier. Aujourd'hui, on prône les démarches qualitatives, l'apport du développement durable dans les opérations d'aménagement. Les formes urbaines, la recherche de la qualité et le développement durable sont-ils compatibles ? Pourra-t-on demain parler de forme urbaine durable ? L'étude présentée n'a pas la prétention d'ériger les opérations qui ont résisté à l'épreuve du temps en modèle idéal. En revanche, elle essaie de caractériser ce qu'il convient de prendre en compte pour obtenir la qualité. Ainsi, à partir des différents éléments de doctrine, une grille d'analyse de la forme urbaine reposant sur trois niveaux (typo morphologique, socio-fonctionnel et environnemental) a été définie.

Après avoir sélectionné six opérations du XX<sup>e</sup> siècle d'une forme urbaine reconnue, les réalisations sont analysées à travers de la grille ci-dessus afin d'identifier les thèmes, les critères et les éléments à retenir dans la conception des opérations d'aménagement d'aujourd'hui. Sont ainsi cernées les notions de contexte urbain, de profil d'îlot, de typologie bâtie, de dimensionnement, de perméabilité, de mixité fonctionnelle, d'économie de l'espace, d'énergie, de patrimoine, etc. Partant, une approche méthodologique se dégage et avec elle des critères unitaires et qualitatifs susceptibles d'être déclinés à l'acte de construire. Cette contribution montre les compétences des géomètres-experts en matière d'urbanisme et valorise leur savoir-faire auprès des maîtres d'ouvrage publics et privés.

► CERTU - Prix : 30 € - 90 pages  
ISBN : 978-2-11-097149-4



## ■ De l'estime au cadastre en Europe - Les systèmes cadastraux aux XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles

Colloque des 20 et 21 janvier 2005  
sous la direction de Florence Bourillon,  
Pierre Clergeot et Nadine Vivier

Troisième et dernière étape de la vaste enquête sur les cadastres du Moyen Âge à l'époque contemporaine, ce volume édité par le Comité pour l'histoire économique et financière de la France est consacré au développement des systèmes cadastraux en Europe aux XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles. Consacrant le droit de propriété et l'égalité des citoyens devant l'impôt, les Constituants ont décidé la réalisation d'un cadastre fiscal en mettant à profit les expériences des précédentes décennies. La loi du 15 septembre 1807 donne au cadastre parcellaire une efficacité supplémentaire en lui permettant de certifier la propriété et d'être un outil d'intérêt général. Les États européens l'ont inégalement adopté. Les Pays-Bas et les États allemands en font un Grand Livre foncier ; l'Italie et la France pendant longtemps un simple instrument fiscal. D'autres pays s'opposent à sa création, soit parce que les élites veulent rester maîtresses de la répartition de l'impôt comme en Espagne, soit parce que l'ingérence du pouvoir central dans la propriété privée est vécue comme une atteinte à une liberté fondamentale comme en Angleterre. Aujourd'hui, la récente arrivée du cadastre numérisé fait l'unanimité. Elle permet la représentation de la propriété, et plus largement, la gestion des responsabilités qu'elle induit. De plus, les collections anciennes lui confèrent une valeur patrimoniale inestimable.

► Collection comité pour l'histoire économique financière de la France  
Prix : 35 € - 428 pages  
ISBN : 978-2-11-095376-6

### Dans la même collection

De l'estime au cadastre en Europe.

Le Moyen Âge

Colloque des 11, 12 et 13 juin 2003 sous la direction d'Albert Rigaudière - 2006

De l'estime au cadastre en Europe.

L'époque moderne

Colloque des 4 et 5 décembre 2003 sous la direction de Mireille Touzery - 2007

Accessible en ligne sur [www.comite-histoire.minefi.gouv.fr](http://www.comite-histoire.minefi.gouv.fr)

Le Cadastre. Guide des sources, GRINEVALD (Paul-Marie) 3<sup>e</sup> édition, 2007

► Comité pour l'histoire économique et financière de la France Hôtel de la Monnaie

## ■ Le Centre de Documentation de l'IGN ouvert à tous

Situé dans les locaux de l'ENSG à Marne la Vallée, boulevard Blaise Pascal à Champs-sur-Marne, le Centre de Documentation de l'IGN, fourni et accueillant, reçoit le public les jours ouvrés, du lundi au vendredi de 9h30 à 17h30. Il est spécialisé en sciences de l'information géographique autrement dit tout ce qui touche à la géomatique à savoir : l'astronomie-géodésie, la photogrammétrie, la télédétection, la topographie, la cartographie et les SIG.

La consultation sur place est libre et gratuite, le prêt inter bibliothèques est pratiqué.

Jusqu'au 14 juillet 2008, le centre de documentation accueille l'exposition d'une soixantaine de photos d'Yves Egels qui illustrent sa topo vécue dans les régions polaires.



► Pour tout renseignement : [www.ensg.eu/CDOC/](http://www.ensg.eu/CDOC/)

■ par Raymond D'HOLLANDER

On considère un triangle sphérique équilatéral où les angles sont désignés par  $A = B = C$  et les arcs par  $a = b = c$ .

1 - Montrer que dans un tel triangle, on a :  $\cos a = \frac{\cos A}{1 - \cos A}$

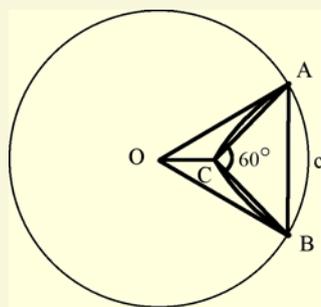
2 - On suppose que l'aire du triangle, égale à l'excès sphérique  $\delta = A + B + C - \pi$ , est  $n$  fois plus petite que celle de la sphère entière. Montrer que la longueur des côtés est donnée par :

$$\cos a = \frac{\cos \frac{\pi(4+n)}{3n}}{1 - \cos \frac{\pi(4+n)}{3n}}$$

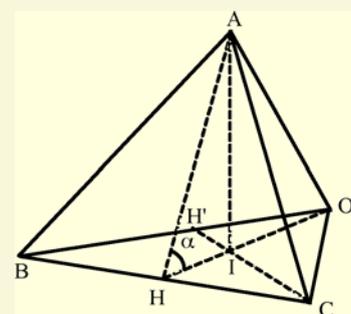
3 - Quelles sont les valeurs de  $a$  pour les valeurs ci-après de  $n$  : 3, 4, 5, 6, 8.

La solution de cette récréation sera donnée dans le prochain numéro de XYZ.

## Solution de la récréation mathématique du n° 113 d'XYZ



1 - Considérons la face ABC du tétraèdre régulier : c'est un triangle équilatéral de sorte que l'angle  $\widehat{BCA} = 60^\circ$  ; ainsi l'arc  $AB = c = 60^\circ = \frac{\pi}{3}$ .  
On a donc  $a = b = c = 60^\circ = \frac{\pi}{3}$ .



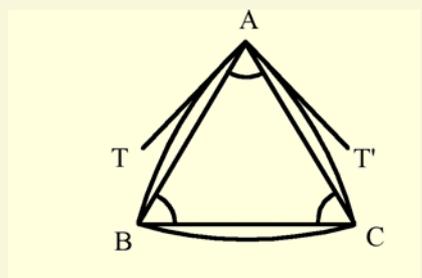
2 - Considérons la relation fondamentale de la trigonométrie sphérique :  $\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A$ , qui devient :  $\cos a = \cos^2 a + \sin^2 a \cos A$ , d'où :

$$\cos A = \frac{\cos a(1 - \cos a)}{\sin^2 a} = \frac{2 \sin^2 \frac{a}{2}}{\sin a \frac{\sin a}{\cos a}} = \frac{2 \sin^2 \frac{a}{2}}{2 \sin \frac{a}{2} \cos \frac{a}{2} \tan a}$$

$$\text{soit } \cos A = \frac{\tan \frac{a}{2}}{\tan a} \quad \text{c.q.f.d.}$$

3 - Pour  $a = \frac{\pi}{3}$  :  $\cos A = \frac{\tan \frac{\pi}{6}}{\tan \frac{\pi}{3}} = \frac{1}{\sqrt{3} \times \sqrt{3}} = \frac{1}{3}$

d'où  $A = B = C = 70,528^\circ$



$\widehat{BAC} = 60^\circ \quad \widehat{TAT} = \alpha = A = 70,528^\circ$

4 - Le rectiligne du trièdre est l'angle  $\alpha$  que fait la hauteur AH du triangle ABC avec la hauteur OH du triangle OBC. Soit I le point d'intersection de ces 2 hauteurs, qui sont aussi des médianes puisque les triangles sont équilatéraux.

On a donc  $\cos \alpha = \frac{HI}{AH}$  et  $HI = \frac{HO}{3} = \frac{AH}{3}$ ,

d'où  $\cos \alpha = \frac{1}{3}$

On a donc la même valeur  $\alpha = A$  c.q.f.d.