

# xyz

Éditée par l'  
Association  
Française de  
Topographie  
**n°118**

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

## Histoire des SIG

Nouvel Essai  
de Paul Courbon  
Page 47

**Le marégraphe  
de Marseille :  
patrimoine  
et modernité**



## Directeur des publications

André Bailly  
Ingénieur Géomètre ETP, Paris

## Directeur adjoint des publications

Jean-Baptiste Henry  
Ingénieur LNE, Trappes

## Rédaction et administration XYZ

107, rue La Boétie - 75008 Paris  
Tél. 01 43 98 84 80  
Fax 01 42 25 41 07

## 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

Emmanuel Natchitz  
Ingénieur Géomètre ETP, Cachan

## Responsable du site Internet

Tania Landes  
Publicité : Samuel Guillemain  
Tél. 06 72 12 08 97  
communication@aftopo.org

## Conception et maquette

Dorothee Picard

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

## ALBEDIA IMPRIMEURS

137, avenue de Conthe  
BP 90449 15004 Aurillac Cedex  
Tél. 04 71 63 44 60  
Fax: 04 71 64 09 09



## Dépôt légal

1<sup>er</sup> trimestre 2009 ISSN 0290-9057  
N° CPPAP: 01 11 G 80 866

Tirage de ce numéro: 1 600 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 €  
Membre du SPCS Syndicat de la  
Presse Culturelle et Scientifique

Le bulletin d'adhésion est en p. 72  
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.

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

Membre de la FIG (Fédération Internationale des Géomètres) **FIG**

107, rue La Boétie - 75008 Paris - Tél.: 01 43 98 84 80 - Fax: 01 42 25 41 07

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

## Editorial ..... 5

## Info-Topo

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

## Manifestation

> Le colloque sur les "techniques laser pour l'étude  
des environnements naturels et urbains"  
Patrice GAUBERT ..... 11

## Lasergrammétrie

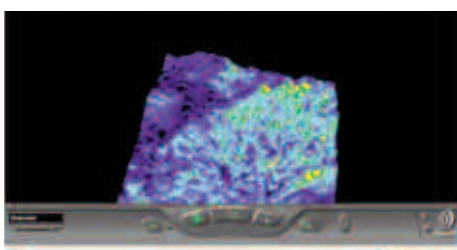


> L'altimétrie aéroportée de précision :  
lidar topographique et recherche  
Frédéric BRETAR ..... 13

## Nivellement

> Le marégraphe de Marseille:  
patrimoine et modernité  
Alain COULOMB ..... 17

## Cartographie



La géovisualisation interactive basée sur le SIG  
3D et le GeoVRML : une approche pour l'analyse  
des morphostructures  
Tarek SLAMA et Noamen REBAI ..... 25

## GPS

Evaluation ponctuelle des performances  
du réseau TERIA  
Stéphane DURAND - Laurent MOREL ..... 33

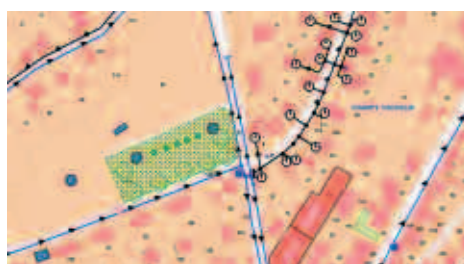
## Thermographie

> Thermographie aérienne des villes - Mythes et  
réalités  
Jean-Baptiste HENRY - Sylvain PIERRARD  
Pascal RIDOUX ..... 39

## SIG

> Intégration de l'analyse multidimensionnelle  
dans la gestion d'un réseau d'auscultation  
géométrique  
Aïcha DERKAOU - Boualem GHEZALI ..... 43

## Histoire



> Historique de la géomatique et des Systèmes  
d'Information Géographique (SIG)  
Paul COURBON ..... 47

## Vie associative

> Le 11 décembre 2008, l'AFT a célébré  
son trentenaire ..... 61



## Art et géométrie

> Guy de Lussigny :  
la musicalité du carré -  
Mark di Suvero : l'œil sur la poutre  
Jean-Pierre MAILLARD ..... 62

## GSF

> Géomètres Sans Frontières :  
dépaysement et aventure humaine assurés  
Claire GALPIN ..... 64

## Carnet de voyage

> Vous reprendrez bien un peu de désert ?  
Robert CHEVALIER ..... 65

## Récréation cosmographique

> Raymond D'HOLLANDER ..... 68

## Livres

..... 70

Pour la recherche de nos annonceurs consulter la page 71.

## PROCHAIN XYZ - n° 119

Du cadastre napoléonien  
au cadastre en ligne sur Internet  
"Technique et outils"

Au moment où paraîtront ces lignes le 5<sup>e</sup> Forum 2009 de la topographie se sera bien tenu au Lycée Dorian à Paris. Après des forums en alternance à l'ENSG et à l'ESTP, le conseil de l'AFT a trouvé opportun d'organiser sa manifestation annuelle dans d'autres centres d'enseignement professionnel. Montrant la voie à l'élargissement, le Lycée Dorian a accepté cette année d'ouvrir ses portes au forum. L'association remercie vivement Madame le proviseur et les responsables de la section "géomètres" pour leur accueil et leur implication à la réussite de la journée. Comme annoncé les conférences auront traité de l'application Laser 3D et du contexte réglementaire français en matière de systèmes de référence (systèmes géodésiques, classe de précision) applicable en 2009. Dans le même temps, les exposants auront été en mesure de présenter des applications opérationnelles, notamment en matière de Laser 3D. Ces sujets ont appelé nombre d'inscriptions sans compter celles des étudiants "géomètres" du lycée parisien, ceux des lycées Jean-Pierre-Thimbault de Brétigny-sur-Orge et de l'ESGT qui ont fait connaître leur intérêt et leur participation. Le n° 119 d'XYZ rendra largement compte du déroulement et du contenu du forum. Dans cet élan et pour les années à venir, l'AFT pense déjà à la tenue de prochains forums en province.

Sous la plume autorisée d'Alain Coulomb, le présent numéro d'XYZ présente en détail un des fondements des références de la profession : le marégraphe de Marseille. Son inscription en 2002 à l'inventaire supplémentaire des monuments historiques (bâtiment et appareil) et son usage renouvelé justifient le complément de titre : patrimoine et modernité. L'association des mots, loin d'être un oxymore, montre au contraire que, tout en appartenant au passé, tel patrimoine peut garder sa vocation et encore servir l'activité d'aujourd'hui. Même sans ce prolongement et pour en rester au patrimoine "trace du passé", les professionnels de la "topo" apprécient certainement ce classement, au caractère exceptionnel, qui honore leur discipline. Ils pourront aussi se retrouver dans les conclusions du programme national de sauvegarde du patrimoine scientifique et technique contemporain suivi, à la demande du ministère de la recherche, par le Conservatoire national des arts et métiers (CNAM). Ils se reconnaîtront également dans la recherche du géomètre australien John F. Brock.

A la lecture de son article paru dans la revue *Geomatik Schweiz* de décembre 2008, on apprend son intérêt pour le patrimoine, cinématographique cette fois. Il montre combien les "*Surveyors Stars Shine Brightly*" (combien brillent les acteurs du métier) en répertoriant les films dans lesquels les arpenteurs, leurs instruments et les plans qu'ils produisent jouent un rôle. Il s'emploie tout autant à réunir des affiches publicitaires qui se servent de l'image des instruments topographiques pour faire valoir des produits qui n'ont rien à voir. Sachant que le premier métier de Daniel Auteuil était opérateur géomètre, John F. Brock se penchera-t-il un jour sur l'inventaire de la reconversion artistique d'aucuns de ses collègues ?

Par ailleurs la revue comporte un article des spécialistes du Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), référence en métrologie et organisme de formation. Le LNE est à l'origine du développement méthodologique de la thermographie aérienne en France depuis la fin des années 1970, tant sur les applications de cartographie de déperditions thermiques du bâtiment que sur d'autres applications environnementales telles que le rejet de centrales électriques, détection de pollution marine (systèmes POLMAR des douanes françaises), suivi de l'auto combustion de terroirs... C'est dire que le sujet "Thermographie" traité dans le n° 116 d'XYZ a suscité leur lecture attentive et appelé de leur part un point de vue différent et des compléments que le comité de rédaction a plaisir à vous faire partager. Comme eux, n'hésitez pas à réagir et à apporter votre valeur ajoutée. Nous sommes attentifs à toutes les propositions.

Jean-Pierre MAILLARD



## ■ La société Cadden



La Ville de Nantes a effectué des tests de levés signalétiques de mobilier urbain avec le système Trident 3D. Destiné aux applications d'inventaire SIG à grande échelle, Trident 3D est un système conçu par le Canadien Géo3D et associé

vidéo haute résolution, positionnement et photogrammétrie pour collecter les données à partir d'un véhicule. Le système a aussi été utilisé par l'ONF pour le relevé des arbres en environnement urbain à Cholet.

Cadden vient également d'enrichir son catalogue d'une nouvelle solution SIG destinée à la gestion des câbles, tuyaux et canalisations enterrés. Le système se compose d'un détecteur de marqueurs RFID de la gamme Dynatel 3M, connecté à un GPS portable Magellan MobileMapper 6 pour la géolocalisation des informations et le transfert vers une base SIG. Les applications visées sont la maintenance préventive ou curative des réseaux de canalisation, la gestion de ce type de parc, ou encore les études avant travaux de construction.



► Pour plus d'information : [www.cadden.fr](http://www.cadden.fr)

## ■ La Communauté d'agglomération de St-Quentin-en-Yvelines passe à une gestion 3D de son territoire grâce au logiciel LandSIM3D (Bionatics)



Les licences LandSIM3D sont mises en œuvre par le service des Systèmes d'Information Géographique à partir de la base numérique topographique en place. Elles permettent à la Communauté d'Agglomération de Saint-Quentin-en-Yvelines (CASQY) de visualiser en 3D et de manière interactive les 180 km<sup>2</sup> de son territoire en y incluant l'ensemble des bâtiments, des routes et autres réseaux ainsi que l'intégralité de ses espaces verts également simulés en 3D. Cette maquette sert de base d'analyse et de réflexion pour l'intégration de grands projets comme le futur vélodrome de St-Quentin-en-Yvelines, mais également comme outil d'aide à la décision pour la prospective en aménagement urbain et la gestion à moyen terme du territoire (mobilier urbain, espace vert, voirie...). LandSIM3D se différencie des solutions d'imagerie classiques et habituellement réservées à des experts en infographie 3D.

► Pour plus d'information : [www.landSIM3D.com](http://www.landSIM3D.com)

## ■ Portail ouvert entre l'OGE et l'AFIGéo

Le 27 janvier 2009, à l'occasion de la présentation des vœux de l'Ordre des géomètres-experts, son président, M. Pierre Bibollet, et M. Dominique Caillaud, président de l'Association française pour l'information géographique (AFIGéo), ont signé une convention de partenariat annuelle ayant pour objet de confier à AFIGéo une mission de promotion et de valorisation du portail eFoncier environnemental de l'OGE, de soutien à son déploiement dans l'ensemble des régions françaises, et d'aide à son exportation à l'étranger.

En effet, la Directive INSPIRE, en favorisant la mise en place de portails de données environnementales, génère un besoin croissant de diffusion de données cohérentes et précises couvrant le territoire de manière exhaustive et homogène.

Partant, le projet d'un portail eFoncier environnemental à l'échelle de la parcelle cadastrale constitue une réponse à la directive et l'un des engagements des géomètres-experts contenus dans la charte en faveur du développement et de l'aménagement durables signée le 17 septembre 2008 par l'OGE et le Ministère de l'écologie, de l'environnement, du développement durable et de l'aménagement du territoire (MEEDDAT), son ministère de tutelle.

**Le portail eFoncier favorisera la dématérialisation et la diffusion de données produites par ses membres.**

Sa réalisation s'effectuera par la mise en place d'une infrastructure française de données pérennes et cohérentes géoréférencées à l'aide du réseau TERIA de positionnement satellitaire dans un système unique et homogène. Ce cadre constitue un levier pour la mutualisation entre partenaires de données métier avec pour finalité de les "mettre à disposition" du citoyen.



De gauche à droite : Patrick Bezar-Falgas - OGE, Dominique Caillaud, Président de l'AFIGéo et Député de Vendée, Pierre Bibollet - Président de l'OGE, et Yves Riallant - secrétaire général de l'AFIGéo

Pour sa part, l'AFIGéo concourt au développement du secteur de l'information géographique en œuvrant pour la promotion et la valorisation des applications géomatiques en France, en Europe et à l'international. S'appuyant sur un réseau de partenaires et d'adhérents qui contribuent par leur expertise au développement de l'information géographique, l'AFIGéo est un des acteurs le mieux placé pour accompagner l'OGE dans son projet.

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

## ■ Leica Geosystems annonce sa dernière technologie GNSS : le Leica GPS1200+, prêt pour l'avenir du GNSS



Le Leica GPS 1200+ supporte les nouveaux signaux GPS L5, GLONASS L1 et L2, et pourra également capter les satellites Galileo et Compass lorsque ceux-ci seront opérationnels. Tous les systèmes 1200 pourront être mis à jour avec cette récente technologie.

Leica GPS1200+ inclut les technologies éprouvées SmartTrack+, offrant un traitement du signal amélioré et SmartCheck+, garantissant une fiabilité maximale par un contrôle continu de la solution de positionnement. Galileo augmentera de 30 le nombre de satellites GNSS, offrant ainsi une moyenne de 20 satellites visibles en permanence, un moyen de gagner plus de rapidité et de précision. Ce faisant Leica Geosystems propose une mise à jour totale vers le plus moderne et le plus précis signal Galileo AltBOC, qui permettra d'améliorer sensiblement les travaux en différentiel et les résolutions d'ambiguïtés en zones délicates.

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

## ■ Géomusée de Lyon

Dans son n° 7 du 6 février 2009, la *Gazette de Géomusée* souligne les vingt ans d'existence de l'équipement culturel, fait connaître les acquisitions récentes d'instruments, d'ouvrages ou encore un bicorné de l'uniforme d'agent voyer de 1<sup>re</sup> classe de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, provenant de dons et d'achat, et salue la mémoire de son fondateur André Dhelens décédé le 11 septembre 2008.

► Pour tout renseignement : [www.geomusee.org](http://www.geomusee.org)

## ■ Instrument mystère : l'ophtalmomètre

Le n° 116 d'XYZ a fait connaître le jeu concours organisé par le musée Henri-Lecoq de Clermont-Ferrand en marge de l'exposition "Si la mesure m'était comptée".

Aujourd'hui le mystère est levé sur l'objet insolite dont la définition de l'usage a été soumise à la sagacité des visiteurs : c'est un ophtalmomètre du XIX<sup>e</sup> siècle.



Cet appareil permet de mesurer la courbure de la cornée et de calculer l'axe et la puissance de l'astigmatisme par réflexion de mires sur la surface antérieure de la cornée, l'astigmatisme provenant de la déformation du globe de l'œil.

Les mires sont composées de deux réflecteurs, un blanc avec une fente qui se déplace (1a) et un zébré noir et blanc (1b).

Deux lampes à huile (2) éclairent les mires afin que celles-ci puissent se refléter dans l'œil du patient.

L'ophtalmologue observe l'œil dans l'objectif (3) composé d'un système de prismes et tourne le disque gradué (4) jusqu'à obtenir la netteté de la lecture des mires. Il lit le rayon de courbure sur

le disque et en déduit un diagnostic. Un trépied en fonte (5) assure la stabilité de l'instrument.

Cet instrument porte aussi le nom de kératomètre. Il fut perfectionné par Louis-Emile Javal (1839-1907) dont le nom y est maintenant associé.

L'instrument n'étant pas de leur domaine de compétence, on comprend que les topographes n'aient pas brillé dans leurs réponses.

► Pour plus d'informations : [www.musee.lecoq.clermont-ferrand.fr](http://www.musee.lecoq.clermont-ferrand.fr)

## ■ Que sont les Géomètres-Experts du groupe VISAGE et le diagnostic électricité ?

Depuis de nombreuses années et bien avant la "vague" du diagnostic, les Géomètres-Experts du groupe VISAGE® sont présents pour conseiller et diagnostiquer en toute indépendance tous types de biens immobiliers, en particulier pour : la loi Carrez, l'amiante, le plomb, les termites, le gaz, les risques naturels et technologiques, le diagnostic de performance énergétique et, depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2009, le diagnostic sur l'état électrique d'un logement pour les installations de plus de quinze ans.

Membre d'une profession réglementée régie par l'Ordre des Géomètres-Experts, ils sont en permanence contrôlés sur leurs obligations d'indépendance par leurs pairs. Ingénieurs de formation, ils sont les experts de la propriété immobilière, interviennent localement au côté des architectes et des notaires à tous les stades de la vie d'un bien immobilier. Pour ces raisons, ils sont reconnus par toute la profession du bâtiment pour leur compétence et leur impartialité. Professionnels durablement assurés, les Géomètres-Experts diagnostiqueurs du groupe VISAGE® portent un regard d'expert sur chaque bien visité, et engagent leur responsabilité pendant trente ans sur tous leurs actes.

De part leur appartenance à un ordre professionnel, la centaine de Géomètres-Experts diagnostiqueurs du groupe VISAGE® apportent à leurs clients un gage de pérennité des informations, nécessaire à une relation durable. Comme tous les professionnels libéraux, ils fixent leurs honoraires librement, ce qui explique une disparité de tarifs selon le bien à diagnostiquer, son emplacement, sa configuration et son ancienneté.

► Pour plus d'informations : [www.diagnosticvisage.net](http://www.diagnosticvisage.net)

## ■ Brèves de STAR-APIC

Avec ses centres d'opération européens et ses nombreux partenaires de par le monde, le Groupe STAR-APIC est depuis sa création en 1983, un acteur dans l'édition de logiciels Système d'Information Géographique et d'applications de gestion territoriale (collectivités locales et administrations publiques), de gestion de réseaux d'utilité publique (eau, assainissement, électricité, gaz), de gestion d'infrastructures (espaces immobiliers, câblage, télécommunications) et de publication cartographique.

**La Communauté d'Agglomération Mulhouse Sud Alsace (CAMSÀ)** a sélectionné STAR-APIC, à l'issue d'une procédure de dialogue compétitif, pour le renouvellement de son SIG. Concernant ses besoins internes, la CAMSÀ déploiera une architecture client/serveur et intranet. La diffusion des données vers les communes membres, sera effectuée au travers d'un Extranet communautaire. De plus, STAR-APIC intégrera les applications métier existantes dans le nouveau système.

**L'Algérienne des Eaux** a sélectionné STAR-APIC pour équiper la Régie de Jijel, ville côtière située au nord-est de l'Algérie. La solution STAR-APIC qui sera déployée lui permettra de gérer l'ensemble de son réseau d'eau potable.

**La Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain (CPCU)**, poursuit le déploiement des solutions STAR-APIC, pour la gestion de son réseau de chaleur, en faisant

l'acquisition d'une dizaine de licences complémentaires. Dans le même temps, afin d'ouvrir le système à de nouveaux services, la CPCU entame la migration de ses données sous Oracle Spatial.

**La Suite 7 de Mercator**, la nouvelle version des logiciels de production cartographique du Groupe STAR-APIC, sera bientôt disponible. Elle est présentée pour la première fois au grand public sur le stand de STAR-APIC à la conférence IMTA ("International Map Trade Association" pour l'Europe, le Moyen-Orient et l'Afrique) qui s'est tenue les 20 et 21 février 2009 à Belfast (Irlande du Nord).



Son atout majeur est l'utilisation du format PDF en tant que format graphique interne, offrant ainsi un lien avec l'industrie graphique plus direct encore que celui fourni par son prédécesseur (GRS natif). Cette nouveauté permettra de produire des cartes plus rapidement, tout en garantissant le même degré de cohérence.

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

## ■ L'AFIGÉO en Chine

Le lobbying et les actions menées depuis plus de dix ans par le Club International de l'AFIGÉO ont permis de nouer un partenariat privilégié avec Ubifrance, l'Agence française pour le développement international des entreprises, agence rattachée au secrétariat d'Etat au commerce extérieur.

Ubifrance apporte son soutien actif aux entreprises du secteur de la géomatique et dans ce cadre, une mission "Information géographique - Chine" sera dépêchée du 20 au 23 avril 2009. Elle a pour objectif de permettre la découverte du marché chinois de l'information géographique et de rencontrer un grand nombre d'acteurs à Pékin, avec extension au choix à Canton, Shanghai ou Wuhan.



► **Plus d'information sur le**  
**site :** [http://www.afigeo.asso.fr/page\\_278.html](http://www.afigeo.asso.fr/page_278.html)  
**Date limite d'inscription :** 30 mars 2009  
**Contact :** Lucie Fourcin : [lucie.fourcin@afigeo.asso.fr](mailto:lucie.fourcin@afigeo.asso.fr)

## ■ ESRI France - ArcLogistics 9.3 - Gestion de flotte automobile améliorée

ArcLogistics 9.3, la nouvelle solution de gestion de flotte d'ESRI, a été conçue pour aider les entreprises et organisations à réduire leur consommation de carburant, leurs émissions polluantes et à diminuer leurs coûts de fonctionnement. Elle est maintenant disponible.

ArcLogistics 9.3 permet de créer des itinéraires et plannings de tournée optimisés, en tenant compte de paramètres concrets tels que la capacité des véhicules et le domaine d'expertise du conducteur. De même, ArcLogistics permet de respecter des délais stricts et d'augmenter l'efficacité opérationnelle en attribuant des ordres de mission aux véhicules en fonction d'un séquençage optimal. Pour une plus grande précision, les temps de parcours sont calculés en s'appuyant sur le réseau routier réel, et non sur des distances à vol d'oiseau.



ArcLogistics 9.3 assiste les conducteurs sur le terrain. En effet, les résultats d'analyse d'ArcLogistics peuvent être embarqués dans les véhicules grâce à l'application ArcLogistics Navigator. Le conducteur bénéficie ainsi d'indications de guidage et de redirection qui tiennent compte des contraintes inhérentes à l'activité de transport logistique. ArcLogistics est conçu sur la plate-forme ArcGIS 9.3 d'ESRI, bénéficiant ainsi d'une technologie standard ouverte pouvant s'intégrer dans votre système d'entreprise. Les projets ArcLogistics sont à présent stockés dans une géodatabase ESRI, offrant une capacité quasi illimitée. Les résultats d'analyse peuvent être exportés en tant que couche d'analyse réseau pour une utilisation ultérieure dans ArcGIS et son extension Network Analyst, faisant ainsi d'ArcLogistics une nouvelle source de données d'un SIG d'entreprise.

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



## ■ Ecole chez soi : Lancement officiel de [www.metiers-tv.fr](http://www.metiers-tv.fr)

L'Ecole Chez Soi, organisme privé de formation à distance aux métiers de la construction et du cadre de vie, fait le pari d'initier un projet collaboratif d'information qui dépasse son cœur de métier : elle lance la première Web TV de la formation aux métiers de la construction et du cadre de vie. En ligne depuis octobre 2008, [www.metiers-tv.fr](http://www.metiers-tv.fr) invite les professionnels du secteur de la construction et du cadre de vie à partager les réalités de leurs métiers (reportages vidéo, interviews). Les témoignages qu'il contient révèlent la dimension humaine de leurs métiers. Cet outil d'aide à l'orientation et à la reconversion participe à la construction d'une nouvelle image du BTP auprès du grand public. L'ouverture du site Internet [www.metiers-tv.fr](http://www.metiers-tv.fr) a été accueillie par la remise d'un trophée Roc d'Or dans la catégorie "Démarche de communication/Relations humaines" du festival Fimbacte le 13 octobre dernier. Alliant les outils du web 2.0., l'objectif de la plate-forme est triple :

- Valoriser les métiers de la filière construction (BTP, bureau d'études, développement durable, topographie) et cadre de vie (paysage, environnement), véritable enjeu pour le secteur qui souffre d'une image bien souvent dénaturée.
- Orienter l'internaute vers un choix d'un métier du secteur par exemple dans le cadre d'une réorientation ou d'une reconversion professionnelle. Les informations générales sur les filières sont regroupées par famille de métiers ou par dossiers thématiques (les femmes et le BTP, la vie de chantier, handicap et travail...).

- Echanger avec les internautes (commentaires, bookmarks...) pour aider à la progression professionnelle en partageant l'expérience des autres. Ainsi, [www.metiers-tv.fr](http://www.metiers-tv.fr) est un projet collaboratif en faisant intervenir des partenaires professionnels qui, au travers de leurs témoignages, et des contenus vidéo, souhaitent montrer toutes les facettes de leurs métiers. Lancé officiellement le 6 octobre 2008, le site [www.metiers-tv.fr](http://www.metiers-tv.fr) rassemble actuellement 70 vidéos et 200 pages d'informations et d'aide à l'orientation dans le secteur de la construction et du cadre de vie. Un blog de l'éco-construction, un calendrier interactif, une géolocalisation des établissements de formation à ces métiers, des conseils et astuces viennent compléter l'information offerte aux internautes. Le site Internet [www.metiers-tv.fr](http://www.metiers-tv.fr) s'adresse principalement au grand public : les 20 - 30 ans et les 30 - 50 ans en (ré)orientation professionnelle. Une attention particulière a été portée sur les publics minoritaires dans le secteur du BTP : les femmes, les seniors, les personnes handicapées.

Pour sa démarche de communication en "Ressources Humaines", l'Ecole Chez Soi a été récompensée le 13 octobre 2008 lors du 13<sup>e</sup> festival Fimbacte par la remise du trophée Roc d'Or. Depuis 1996, Fimbacte encourage les meilleurs projets de communication exposant les grands enjeux du secteur de la construction et du cadre de vie.

► Pour tout renseignement : [www.ecolechezsoi.com](http://www.ecolechezsoi.com)

## ■ Aménagement et urbanisme durables : la solution 3D d'IGN France International (IGN FI)

50 % de la population mondiale vit désormais en milieu urbain. En 2030, cette proportion atteindra 80 %. La problématique urbaine, c'est-à-dire la manière dont les collectivités vont devoir gérer la pression croissante subie par les territoires qu'elles ont en charge, nécessite des outils permettant une vision d'ensemble à court et moyen termes. Trop souvent encore les constructions s'édifient sans réelle insertion au bâti existant, sans prise en compte des infrastructures nécessaires et avec un défaut de concertation. IGN France International, filiale de l'IGN, spécialiste de l'information géographique a présenté au Salon Imagina qui s'est tenu du 4 au 6 février 2009 à Monaco la solution 3D qu'elle a conçue à partir de l'outil BATI3D de l'IGN pour répondre aux problématiques des responsables et des professionnels de l'aménagement du territoire comme de l'urbanisme. Fruit de dix années de recherche des laboratoires de l'IGN, BATI3D est un outil de production de données 3D des bâtiments de très haute définition et topologiquement avérées. Ces données intégrées dans les solutions logicielles proposées par IGN FI permettent des simulations de toutes natures (projet d'infrastructure, étude d'impact, gestion de crise et diagnostic...) et la visualisation de l'espace urbain. Véritable outil d'aide à la décision, de communication et de concertation, cette solution 3D répond aux très nombreux besoins dans les domaines de l'aménagement et de l'urbanisme.

► Pour tout renseignement : [www.ignfi.fr](http://www.ignfi.fr)

## Agenda des manifestations

### ■ Forums ESRI 2009 :

31 mars à Rennes  
2 avril à Toulouse  
5 mai à Lyon  
12 mai à Aix-en-Provence  
14 mai à Nancy  
26 mai à Lille  
28 mai à Paris  
[www.esrifrance.fr](http://www.esrifrance.fr)

### ■ Du 12 au 14 mai 2009 :

**Les rencontres de SIG La Lettre**  
ENSG - Marne-la Vallée  
[www.sig-la-lettre.com](http://www.sig-la-lettre.com)

### ■ Du 2 au 5 juin 2009 : AGILE/ISPRS

Hanovre - Allemagne  
[www.ikg.uni-hanover.de](http://www.ikg.uni-hanover.de)

### ■ INTERCATO - INTERGIS 15

**Du 15 au 29 juin 2009** Perm - Russie  
**Du 3 au 6 juillet 2009**

Gand - Belgique  
[www.intercatogis.org](http://www.intercatogis.org)

### ■ Du 29 au 30 juin 2009

**4<sup>e</sup> rencontres des dynamiques régionales en information géographique**  
Lille - [www.afigeo.asso.fr](http://www.afigeo.asso.fr)

### ■ Du 16 au 18 septembre 2009

**Journées de la topographie 2009**  
INSA - Strasbourg  
[www.insa-strasbourg.fr](http://www.insa-strasbourg.fr)

### ■ Du 22 au 24 septembre 2009

**INTERGEO 2009**  
Karlsruhe - Allemagne  
[www.intergeo.de](http://www.intergeo.de)

■ **Du 30 septembre au 1<sup>er</sup> octobre 2009 Journées francophones ESRI**  
Versailles - [www.esrifrance.fr](http://www.esrifrance.fr)

### ■ Du 1<sup>er</sup> au 4 octobre 2009 FIG

Saint-Dié-des-Vosges  
[www.fig-saintdie.com](http://www.fig-saintdie.com)

### ■ 2009 Année mondiale de l'astronomie

Pré-programme proposé par l'Observatoire de Paris disponible sur [www.obspm.fr](http://www.obspm.fr)

## ■ Année mondiale de l'astronomie : 100 heures d'astronomie

Les "100 heures d'astronomie" se dérouleront du 2 au 5 avril 2009 dans plus de 146 pays. En France, 19 sites sont retenus pour l'événement dont deux en région parisienne, Juvisy-sur-Orge et Orsay. A Juvisy, deux mille personnes et une batterie de télescopes sont attendus. Rappelons que Camille Flammarion mort en 1925 à Juvisy est le fondateur de l'Observatoire privé de cette ville et de la Société astronomique de France en 1887.

► Pour tout renseignement : [www.saf-lastronomie.com](http://www.saf-lastronomie.com)

## Le colloque sur les “techniques laser pour l’étude des environnements naturels et urbains”

■ Patrice GAUBERT

*La Société française de photogrammétrie et de télédétection (SFPT) organisait les 20 et 21 janvier derniers à l'ESGT un colloque sur les “techniques laser pour l’étude des environnements naturels et urbains”. Un numéro spécial de la revue de la SFPT (RFPT), sera consacré aux actes de ce colloque. Il devrait être publié en principe dans le courant de cette année. Vous y trouverez la plupart des exposés. Consultez régulièrement le site [www.sfpt.fr](http://www.sfpt.fr) pour connaître la date de parution et les modalités d’obtention. Le présent compte rendu ne prétend pas être exhaustif, et s’attache un peu plus à ce qui concerne les scans terrestres qu’aux scans aéroportés ou à la télédétection.*

### Généralités - organisation

Des problèmes à l’arrivée en gare SNCF n’ont pas réussi à gâcher l’excellente organisation. L’organisation spatiale s’articulait en quatre zones : accueil, conférence (grand amphi), posters et enfin exposition. L’organisation temporelle recoupait l’organisation spatiale, les quatre demi-journées étant classées par thème, laissant des temps pour la consultation des posters, la visite des stands, sans compter que les pauses café étaient servies au milieu de la zone d’exposition. Non seulement un temps était prévu pour la consultation des posters, mais deux moments ont été consacrés à une courte présentation de leur poster par les postants en deux sessions concernant l’une les milieux naturels, l’autre les milieux anthropisés.

### Posters

Les posters présentaient, comme souvent, une variété d’exemples concrets de réalisation qui se recoupaient avec les exposés. Retenons spécialement celui concernant un système d’“aide à la conception par simulation de systèmes de cartographie mobiles à scanner laser”. Ce système simule sur ordinateur les résultats potentiels d’une configuration de scanner embarqué sur véhicule. Cela paraît tout à fait de nature à améliorer les systèmes existants et à venir.

### Exposition

Dans l’exposition, on pouvait voir des scanners terrestres sur les stands de Faro, Leica, Trimble et Optech (Mauray). Le tableau joint, qui reprend les caractéristiques des scanners terrestres exposés est un extrait de la conférence de Daniel Schelstraete. Le tableau complet sera disponible dans les actes du colloque. Pour ce qui est des systèmes embarqués sur véhicule, Optech

et Faro proposaient des ensembles industrialisés, Trimble présentait des références de clients, et Leica se cantonnait aux applications Rail/tunnel. “Lynx”, le système embarqué d’Optech, permet un montage très intéressant de deux scanners 360° dont les plans de scan se croisent, permettant une bien meilleure couverture que le classique scanner perpendiculaire à l’avance du véhicule. Le système proposé par Faro était présenté en poster, et l’Ecole des mines évoquait un montage à base de Trimble. Les autres stands étaient consacrés aux producteurs d’information géographique, et à des systèmes aéroportés. L’ENSG disposait également d’un emplacement.

### Les conférences

Le classement par thème le long des 4 demi-journées a facilité l’emploi du temps de quelques participants qui n’ont pu venir qu’une journée. Ainsi, bien que 150 personnes soient venues à ce colloque, le grand amphi a su accueillir tout le monde, au prix de l’optimisation du remplissage des sièges, de quelques volontaires assis dans les escaliers et d’autres debout contre la rambarde du fond. Cela valait mieux que refuser du monde. Il faut dire que malgré la variété des centres d’intérêt le parti pris était de tout traiter en sessions plénières, pour que chacun puisse bénéficier de l’ensemble des exposés.

Le mardi matin a été consacré aux “aspects instrumentaux des acquisitions laser terrestres, aéroportées, spatiales”. La première et la dernière conférences du matin étaient présentées par des membres de l’AFT : En ouverture, l’exposé de Daniel Schelstraete faisait un “point sur les techniques laser 3D terrestres utilisées par les géomètres”, et, pour nous mettre en appétit avant le déjeuner, notre président Michel Kasser, par un exposé sur les “Problèmes de physique élémentaires en matière de levers laser de haute précision”, attirait l’attention sur certaines des erreurs possibles, et laissait coi des auditeurs (dont moi) y trouvant l’explication de mystères dans

#### LIDAR À RETOUR D’ONDE COMPLÈTE ( ROC ) EN ANGLAIS : FULL WAVEFORM LIDAR

Quand on pense lidar aéroporté, on imagine d’abord l’impulsion émise par le laser, sa réflexion sur le sol, son retour dans le photo détecteur pour le calcul de la distance. On conçoit ensuite, en milieu forestier par exemple, vu la taille au sol de l’impact laser, qu’il soit intéressant de prendre en compte le premier retour (distance la plus courte, point “dur” le plus haut), et le dernier (distance la plus grande, point “dur” le plus bas, souvent le sol... mais parfois un endroit fictif après des réflexions parasites). Maintenant la tendance est aux lidars ROC, qui analysent l’ensemble du signal retour, pour en tirer après profonde analyse une bien meilleure connaissance du sol et du sursol.



les résultats obtenus lors de certains scans... Tant que l'on parle de l'AFT, j'ajouterai seulement que l'on reconnaissait parmi les auditeurs, les exposants, et les conférenciers, de nombreux membres de notre association.

Cette matinée fut aussi l'occasion de présenter quatre applications à base de matériel embarqué en véhicule terrestre, hélicoptère, avion et satellite ! En particulier une conférence du MATIS (IGN) faisait le point sur les systèmes lidar à retour d'ondes complète (voir encadré).

L'après-midi fut d'abord consacré aux "Méthodes de traitement et d'analyse", où l'on a encore parlé de systèmes lidar à retour d'ondes complète. Ce fut également l'occasion d'évoquer l'apport du scanner laser dans l'enseignement des techniques de positionnement. Ensuite, cinq conférences concernant les "Levers laser terrestres pour les applications architecturales et urbaines" ont explicité les diverses étapes de lever laser puis traitement de relevés de façades et corps de rue.

## Les environnements naturels

Le lendemain fut consacré aux environnements naturels. D'abord les "Techniques laser pour les géosciences et les risques naturels" évoquaient l'utilisation du laser terrestre pour l'étude des glissements de terrain, des MNT de haute précision, et l'analyse géostructurale des escarpements rocheux, et l'utilisation de laser aéroporté pour des levés topographiques de la Loire, ou pour l'étude du risque d'inondation dans le Haut-Rhin. Ensuite, nous avons appris que l'utilisation des "Techniques laser pour l'étude de la végétation et des forêts", lidars aéroporté ou terrestre, permettait la caractérisation, la répartition, l'étude de la densité de la végétation, des digues, forêts tempérées ou tropicales. Enfin, l'application à l'"étude des milieux côtiers" de ces mêmes techniques laser nous a été présentée sous les angles des problématiques spécifiques de la bathymétrie des eaux de très faible profondeur, et de la géomorphologie littorale.

## Conclusion

Bien construit, ce colloque a fait le point sur diverses utilisations du lidar, ses possibilités, ses limites. Il a suscité des ren-

contres de professionnels d'horizons différents, la plupart étant présents les deux jours. On a ressenti que les mêmes problèmes se posaient aux différents types d'utilisation, bien que ce qui est du bruit dans les mesures pour certains puisse être au contraire le sujet d'étude pour d'autres (le meilleur exemple étant les feuilles des arbres). Chacun attend mainte-

### ENTENDU DANS LES COULOIRS

*Cet encart ne prétend pas refléter le contenu des conférences, ni l'opinion de l'AFT sur les questions évoquées, mais être le reflet de quelques commentaires venant principalement de propriétaires de scanners (terrestres).*

**Précision des mesures.** La conférence de Michel Kasser a suscité des réflexions sur le besoin de prudence, bien sûr, mais, au-delà, sur la difficulté de définir pour les scanners des classes d'appareil, comme pour les théodolites par exemple, puisque la précision obtenue dépend non seulement de l'appareil et de sa bonne mise en œuvre, mais également de la nature (au sens large, texture, couleur, réflectance...) des matériaux scannés.

Ainsi, les tests consistant à filtrer des données d'une certaine (im)précision, jusqu'à obtenir le résultat (connu) recherché ont paru illusoire, voire aberrants à beaucoup, et certainement pas de nature à "prouver" une quelconque précision.

Il ressort des discussions avec les professionnels impliqués dans la production de données par scanner que la création d'un banc de test, dont il est clair que la conception est éminemment complexe, pourrait être un sujet de recherche pour une université ou une institution. Voilà un bon sujet de réflexion pour les membres de l'AFT. Les expériences des universités de Mayence et de Hambourg, ou du DOT de Californie ont été citées.

Par ailleurs, au vu des matériels et logiciels proposés sur le marché, certains ont eu le sentiment de voir exposé des recherches sur des matériels (scanner embarqué sur véhicule) ou des fonctions logicielles (suppression des véhicules dans les nuages sur voies) qui n'étaient pas en avance sur les offres du marché.

Enfin, des professionnels "topo" très intéressés par les exposés "géoscience" ont évoqué la problématique de l'auscultation d'ouvrages, du monitoring des zones instables, en continu par scanner demandant, en quelque sorte : à quand un logiciel, mesdames/messieurs les chercheurs et industriels ?

## SCANNERS 3D TERRESTRES LES PLUS RÉCENTS ET LES PLUS PUISSANTS DES CONSTRUCTEURS EXPOSANT AU COLLOQUE\*

Modèle		portée (m) refl 90 %		résolution maximale	sigma distance	champs H x V	cps max
		min	max				
laser pulsé, temps de vol							
Leica Geosystems	ScanStation 2		300	1 mm / 300 m	4 mm à 50 m	360° x 270°	50 000
Optech	ILRIS-3D		1 800	10 mm / 640 m	7 mm + ppm	(40°x9) x 40°	3 500
Trimble	GX	2	350	2mm / 60 m	4 mm à 50 m	360° x 60°	5 000
Décalage de phase							
Faro	LS 880	0,6	76	3mm / 60 m	3 mm à 25 m	360° x 320°	120 000
Leica Geosystems	HDS 6000	0,5	79	8mm / 50 m	6 mm à 80 m	360° x 310°	500 000
Trimble	FX	1	28	1mm / 28 m	3 mm à 28 m	360° x 270°	175 000

\*d'après Daniel Schelstraete.

## L'altimétrie aéroportée de précision : lidar topographique et recherche

■ Frédéric BRETAR

*Les nouveaux défis environnementaux en termes de prévision des risques et de gestion des ressources naturelles ont fait naître le besoin d'une cartographie altimétrique du terrain plus précise que celle proposée par les systèmes satellites imageurs ou bien que celle de la base de données altimétrique actuelle de l'Institut Géographique National. Si la photogrammétrie permet de générer la composante altimétrique sur de larges zones par des processus de corrélation automatique, cette technique n'est plus adaptée pour certains paysages comme les littoraux, ou bien les zones de végétation pour lesquelles le terrain, masqué, n'est plus visible. La technique de la télémétrie laser (ou lidar aéroporté) permet depuis quelques années de relever ces défis en fournissant une altimétrie de haute précision (point 3D), des informations sur la composition du sur-sol ainsi que des points terrain en présence de végétation.*

**B**asé sur la mesure du temps d'aller retour entre une impulsion laser et son retour après réflexion sur la surface terrestre, les systèmes lidar aéroportés fournissent des nuages de points géoréférencés. Ces dernières années ont été le témoin d'avancées considérables aussi bien en matière de précision du mécanisme de géoréférencement, qu'au niveau de la cadence d'impulsion du laser, donc de la densité de points.

Le laboratoire MATIS de l'IGN est impliqué dans la conception d'algorithmes de traitements de données lidar aéroporté, ainsi que dans la valorisation des résultats appliquée à différentes thématiques (milieu urbain, milieu forestier). Par des approches transversales fournissant des nuages de points 3D, chercheurs et ingénieurs développent des méthodologies pour comprendre les erreurs de géoréférencement, automatiser les traitements, améliorer les IHM et les struc-

### MOTS-CLÉS

Lidar aéroporté, recherche, nuages de points, classification automatique, MNT

tures de données, proposer de nouvelles approches algorithmiques.

### Rappel sur les systèmes lidar aéroportés

Les systèmes lidar aéroportés sont des télémètres laser à balayage transversal. Fixé à bord d'un avion ou d'un hélicoptère, le système calcule le temps d'aller-retour d'une impulsion laser entre l'instant de son émission au niveau de la tête laser et sa réflexion sur la surface terrestre. L'angle de visée du laser est mesuré au niveau du miroir oscillant ou rotatif déviant l'impulsion laser, la position de l'avion est estimée par géoréférencement direct (couplage des données de position GPS et de l'attitude de l'avion acquis par une centrale inertielle). La diffraction du rayon lumineux (de 0,3 à 0,8 mrad pour les systèmes aéroportés les plus utilisés) permet de recueillir, au niveau des paysages inclus dans le cône de diffraction, plusieurs pics d'énergie pour une même impulsion laser : ce sont les échos. La séparabilité du faisceau laser est une propriété essentielle faisant des systèmes lidar aéroportés des outils indispensables pour l'étude du milieu forestier et l'extraction de la surface terrain sous couvert végétal.

Une série de traitements de ces données est aujourd'hui opérationnelle, basée sur des approches semi-automatiques. Il s'agit de :

- l'ajustement géométriquement de plusieurs bandes pour générer un chantier globalement cohérent,
- classer le nuage de points 3D en points sol et points sur-sol,
- d'utiliser les points sol comme supports pour la génération de Modèles Numériques de Terrain.

En ce qui concerne la gestion forestière, on voit apparaître sur le marché des logiciels spécifiques fournissant des variables forestières à l'échelle de la parcelle.

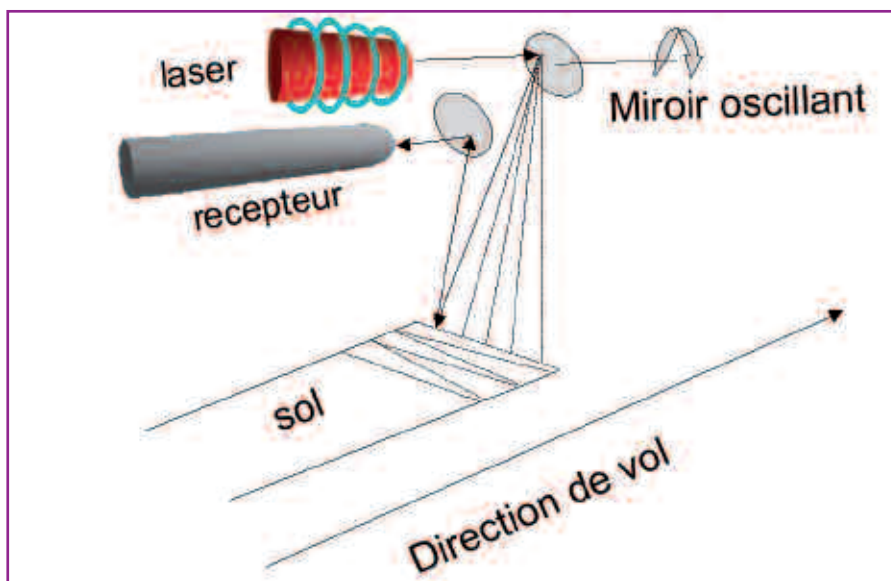


Figure 1. Mécanisme d'un lidar à balayage latéral.



De plus, de nouveaux systèmes lidar à retour d'onde complète (ROC) sont maintenant disponibles. Ces systèmes n'enregistrent plus uniquement les quelques pics d'énergie rétrodiffusée, mais la totalité de l'onde laser réfléchi. En effet, l'énergie de l'impulsion laser émise se concentre dans une porte temporelle de quelques nanosecondes, prenant une forme pseudo-gaussienne (figure 2). L'interaction de cette onde avec la surface terrestre (parfois complexe) fournit une onde retour dont la distribution temporelle est une suite de pics plus ou moins énergétiques, caractéristiques de la distribution 3D et de la réflectance de la cible.

Ces données n'ont pas encore d'application opérationnelle, mais les chercheurs s'y intéressent particulièrement, notamment pour la caractérisation des matériaux et la description de la structure 3D des arbres. Un des objectifs du MATIS est de dégager les potentialités de telles données pour des applications de cartographie et d'interprétation automatique de paysages.

## Les recherches au MATIS

Fin 2006, le MATIS a développé un axe de recherche spécifique aux traitements de données lidar aéroporté dont le but est d'acquies ce nouveau savoir-faire et de l'intégrer au cadre photogramétrique déjà confirmé du laboratoire. Dans la problématique générale de l'étude de la fusion laser/image, nos recherches s'articulent aujourd'hui autour de cinq thèmes.

### ■ La préparation de la fusion de données en géométrie mixte

La fusion de données nécessite une étape de mise en cohérence des sources laser et image. En exceptant les configurations où les données lidar sont acquies de manière synchronisée avec une caméra numérique de haute qualité radiométrique, le problème de la mise en correspondance est toujours présent, notamment si les mécanismes de géoréférencement sont différents. Il s'agit, pour l'ajustement de bandes laser adjacentes, de trouver des éléments homologues dans deux ou plu-

sieurs nuages de points, puis d'appliquer une transformation géométrique adaptée. Ces éléments homologues peuvent être de nature différente : routes détectées à la fois dans le nuage de points et dans les images, morceaux de surface, etc.

### ■ La génération de Modèles Numériques de Terrain automatique de nuages de points

Les données lidar sont particulièrement populaires pour la qualité des MNT générés. Ces MNT sont à la base de nombreuses applications thématiques en milieu urbain et naturel. La qualité des résultats de certaines approches automatiques dépendent des paysages. Une interaction conviviale avec les données permet de corriger les erreurs des algorithmes. Nous nous intéressons particulièrement à développer des méthodes automatiques, fonctionnant avec peu de paramètres, sur des paysages variés. Plusieurs approches sont mises en œuvre au laboratoire.

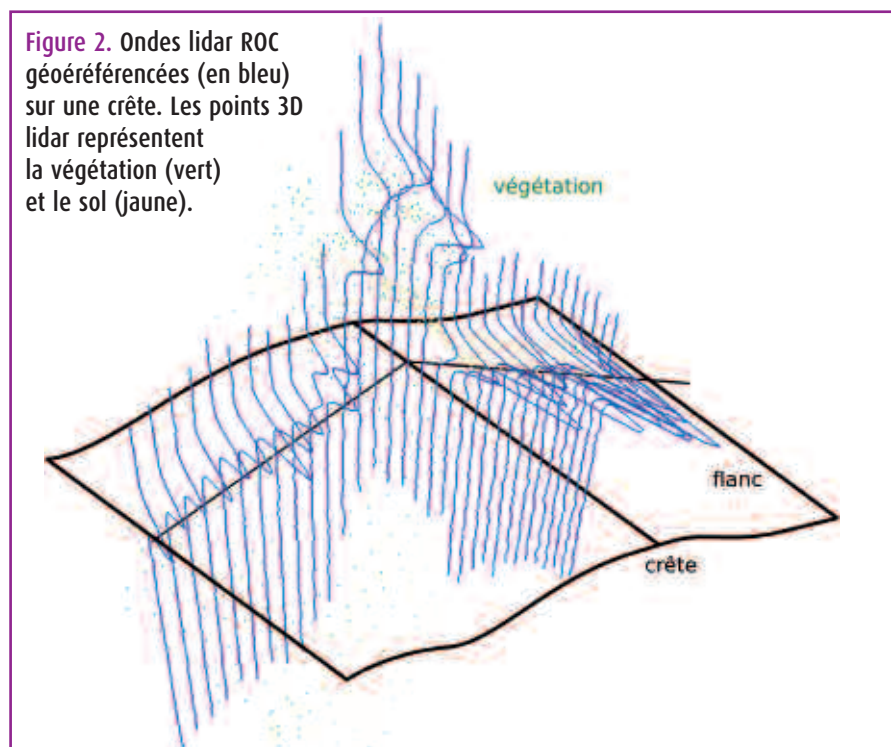
Si la mesure des points laser est précise à 0,4 m en planimétrie et 0,15 m en altimétrie, la précision des MNT, issus d'un processus de filtrage et de ré-échantillonnage, varie en fonction de la résolution de la grille, de l'algorithme utilisé,

de la composition et du type de paysage. Nos études ont montré par exemple que la précision altimétrique des MNT en milieu montagneux en présence de végétation est décimétrique (<1m), mais également que le processus d'ajustement de bandes est précieux et complexe, les transformations à appliquer étant fortement non linéaires.

### ■ La création d'une chaîne de traitement de données laser ROC

Les données lidar ROC sont aujourd'hui très peu utilisées et n'ont pas encore d'application opérationnelle. Beaucoup plus volumineuses que les données multi-échos, il n'existe pas de chaîne de traitement. Nos recherches sont donc d'une part opérationnelles puisqu'elles consistent à écrire les procédures permettant de lire les données brutes (fichiers binaires d'acquisition) puis de les géoréférencer, mais aussi théoriques puisque la mise en place de l'algorithme dépend de la thématique de recherche. Parallèlement, l'étude de la physique du signal lors de l'interaction de l'onde émise avec les éléments de topographie nous guide sur le potentiel de ces données pour l'extraction d'information supplémentaire. Deux thèses de doctorat sont en cours spécifiquement sur l'utilisation de ces

**Figure 2.** Ondes lidar ROC géoréférencées (en bleu) sur une crête. Les points 3D lidar représentent la végétation (vert) et le sol (jaune).





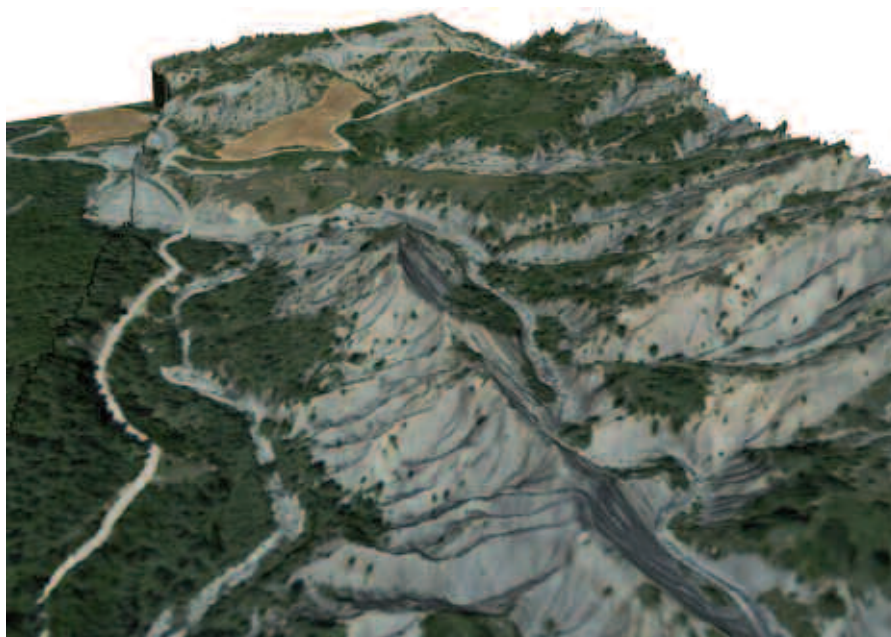


Figure 3. Orthophoto plaquée sur un MNT lidar en milieu montagneux.

données en milieu urbain (C. Mallet) et en milieu forestier (A. Chauve).

#### ■ La segmentation/classification d'images et de données laser

La finalité des recherches du MATIS est à trouver dans la cartographie (semi) automatique des territoires (2D et 3D), principalement à l'échelle locale (ville) ou régionale. La segmentation des images et des données lidar est donc au cœur de nos recherches théoriques et pratiques, et est une activité transversale des axes de recherche. Basées sur des méthodologies de type hiérarchique en exploitant la complémentarité régionale des images et des points laser en milieu urbain ou bien sur des classificateurs du type machine à noyaux pour faire apparaître des similarités dans un espace de paramètre de dimension variable, les traitements mis en œuvre sont une adaptation à notre contexte d'approches génériques et révélées pertinentes. Nous nous intéressons à la cartographie du milieu forestier, en partenariat avec des instituts spécialisés français et européens, pour qualifier la structure 3D des arbres (individuels ou statistiques au niveau de la parcelle) dans le but de retrouver des cartes de biomasse ou des profils de végétation, mais aussi pour faire une cartographie des strates de végétation dans le cadre de la prévention des feux de forêts. Une thèse de doctorat est

actuellement en cours sur ce thème (A. Ferraz).

#### ■ La création d'IHM originales et performantes

La représentation des données, des résultats et l'interaction (les requêtes) entre un algorithme et les données deviennent une tâche critique pour le chercheur et l'utilisateur soucieux de l'efficacité de ses traitements et de l'esthétique de ses résultats. Trop conscients des limitations imposées par un logiciel commercial, nous avons décidé de lancer une action de R&D sur la création d'une Interface Homme-Machine conviviale et performante, intégrant une recherche sur des structures de données efficaces, une représentation 2D couplée à une visualisation 3D (N. David). Le cas particulier des données ROC est éloquent puisqu'il n'existe aucun logiciel permettant de gérer, de manipuler et de visualiser de telles données.

### Conclusion

Le lidar est en France une technologie récente mais opérationnelle dans nombre de situations. Les recherches menées au laboratoire MATIS, loin de ne servir que les services de production de l'IGN, s'inscrivent en bonne place dans la communauté internationale de

photogrammétrie et de télédétection. Nous concentrons nos efforts à rendre les traitements plus automatiques, plus fiables, et à susciter chez les utilisateurs de la topographie de précision (archéologues, forestiers, hydrologues, géophysiciens, etc.) un intérêt grandissant pour ces données. ●

### Contact

Dr. Frédéric BRETAR  
frederic.bretar@ign.fr

### Quelques références

**F. Bretar, N. Chahata.** *Génération de modèles numériques de terrain par fusion de données lidar et image*. Traitement du Signal – Numéro spécial Télédétection pour la surveillance et la gestion de l'environnement, En cours de publication, 2008

**F. Bretar, M. Pierrot-Deseilligny, M. Roux.** *Fusion LIDAR/photogrammétrie : une mise en cohérence globale*. Reconnaissance de Formes et Intelligence Artificielle (RFIA). Toulouse, France, janvier 2004.

**Collectif.** *Atelier REGLIS : LiDAR et surfaces continentales : techniques, applications et perspectives*. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, n° 186. Sous la dir. de C. Puech. 2007.

**C. Mallet, F. Bretar.** *Le Lidar Topographique à Retour d'Onde Complète : Etat de l'art*. Traitement du Signal, volume 24, n° 6, pp. 441-465, 2007.

**C. Mallet, A. Chauve, F. Bretar.** *Analyse et traitement d'ondes lidar pour la cartographie et la reconnaissance de formes : Application au milieu urbain*. Reconnaissance de Formes et Intelligence Artificielle (RFIA). Amiens, France, janvier 2008.

### ABSTRACT

*This article summarizes the research field of the MATIS laboratory (Institut Géographique National) dedicated to lidar data processing. Airborne lidar systems actually provide very accurate 3D point clouds that can be automatically processed to generate digital terrain models as well as a relevant point classification. Moreover, full-waveform lidar data are among the most promising data to get a 3D classification of landscapes, particularly on forested areas.*

## Le marégraphe de Marseille : patrimoine et modernité



■ Alain COULOMB

*Le Marégraphe de Marseille, construit en 1884, présente un tel intérêt patrimonial qu'il a été classé en 2002 parmi les monuments historiques. Mais ce site magnifique abrite aussi un observatoire moderne, équipé d'appareils sophistiqués, et intégré dans plusieurs réseaux géodésiques ou programmes d'observation du niveau des mers.*

### ■ MOTS-CLÉS

Marégraphe, médimarémètre, nivellement, géodésie, gravimétrie

### Le marégraphe de Marseille : un élément peu connu du patrimoine national

Un marégraphe est un instrument permettant de mesurer et d'enregistrer en continu le niveau de la mer à un endroit donné.

Les premiers marégraphe ont été des marégraphe à flotteur. Ce flotteur suit les variations de l'eau dans un puits en



### Les bâtiments du Marégraphe de Marseille

communication avec la mer. Ses mouvements verticaux sont transmis à une poulie par l'intermédiaire d'un fil métallique tendu par un contrepoids puis, au moyen d'un système de pignons, à un organe scripteur (crayon, plume ou

pointe) qui se déplace sur un papier enroulé sur un cylindre mû par une horloge. On obtient ainsi une courbe traduisant, à l'échelle de réduction choisie, les variations avec le temps de la hauteur du flotteur. En France, c'est l'ingénieur

© Photo Alain Coulomb-IGN





hydrographe Rémi Chazallon qui aurait mis au point en 1842 le premier appareil opérationnel de ce type.

L'implantation d'un marégraphe est généralement liée à des activités maritimes et la plupart des marégraphes français sont aujourd'hui gérés par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM). Mais l'ensemble immobilier du marégraphe de Marseille a la particularité d'avoir été attribué à l'Institut Géographique National par un arrêté du 6 janvier 1993. Pourquoi donc cette décision qui peut paraître a priori étonnante et saugrenue ? Parce que l'édification du Marégraphe de Marseille a été intimement liée à une technique fondamentalement terrestre qui est celle du nivellement.

L'association de l'observation du niveau de la mer et du nivellement, d'ailleurs beaucoup plus récente que les occupations en question, est fondée sur la notion de surfaces équipotentiels du champ de pesanteur terrestre, que l'on appelait autrefois surfaces de niveau. Les surfaces de niveau sont des surfaces normales en chacun de leurs points à la direction du fil à plomb et sur lesquelles, par suite, un déplacement quelconque s'effectue sans travail de la pesanteur. Par chaque point du globe, il passe une surface de niveau et une seule.

On appelle alors différence de niveau de deux points, ou dénivellée, la distance de l'un de ces points à la surface de niveau qui passe par le second. L'idée la plus claire des surfaces de niveau nous est donnée par l'état de repos d'un liquide libre à sa partie supérieure. La mer, dans son état d'équilibre, c'est-à-dire si elle n'était soumise ni à l'action des astres, ni à celle des vents et des courants, serait une surface de niveau.

Le niveau de la mer s'est donc imposé, dès la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, comme la surface de référence à laquelle pourraient être rapportées toutes les opérations de nivellement. Dans la première moitié du siècle suivant, on a d'ailleurs vu apparaître un mot nouveau, encore réservé à l'usage de spécialistes : le nom "altitude". L'altitude d'un point de

la surface topographique était définie de façon un peu simpliste comme l'élévation verticale de ce point au-dessus du niveau de la mer. Les altitudes du premier réseau de nivellement d'envergure nationale, opéré par les équipes du conducteur des Ponts et Chaussées Paul Adrien Bourdalouë [1], ont donc été rapportées à ce niveau.

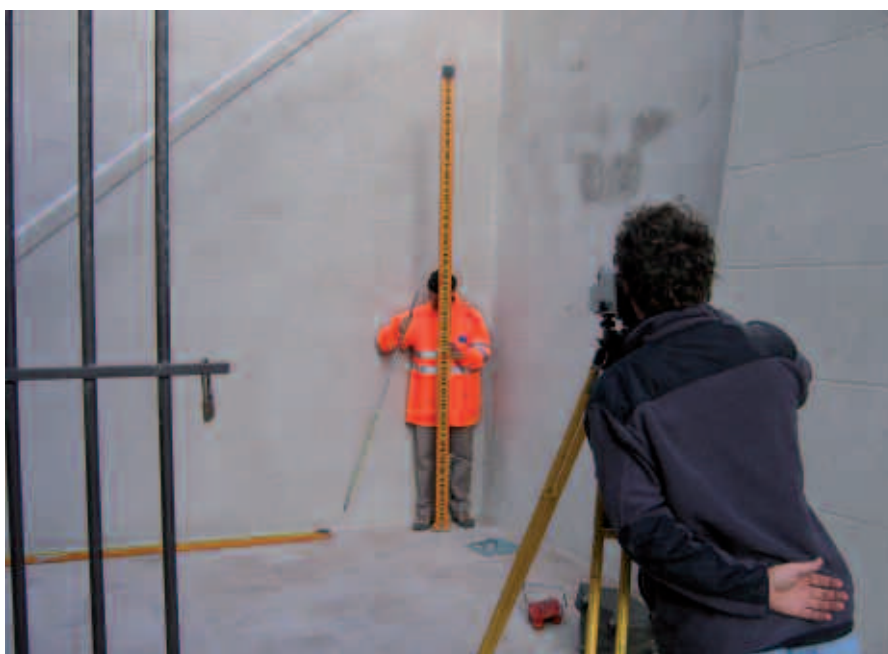
Comme le niveau d'équilibre de la mer est une surface évidemment théorique, impossible à mesurer, les ingénieurs ont essayé, avant l'invention du marégraphe, de s'en approcher, avant l'invention du marégraphe, en mesurant ce qu'ils appelaient alors un niveau moyen, obtenu en calculant la moyenne entre des observations de pleine et de basse mer (ce niveau est aujourd'hui appelé niveau de mi-marée). Bien que le réseau de nivellement Bourdalouë soit postérieur à l'invention du marégraphe, c'est de cette façon qu'a été déterminée son altitude zéro, fixée en 1860 à la graduation 0,40 mètre de l'échelle de marée implantée dans le Vieux Port de Marseille.

Pascal, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées à Marseille, a indiqué que le niveau moyen était considéré "comme se trouvant à 0,40 m au-dessus du zéro de l'échelle des marées" et qu'il n'avait été fait "aucune observation pour déterminer ce niveau", choisi par les ingénieurs du port de Marseille en se gui-

dant sur les seules "traces plus ou moins apparentes que les eaux, dans leurs mouvements de hausse et de baisse, laissent contre les murs de quai."

En 1864, les pays européens réunis à Berlin ont adopté les dispositions suivantes : "Les hauteurs de chaque pays seront rapportées à un seul point zéro, solidement établi ; tous ces points de départ seront reliés entre eux par un nivellement de précision. Le niveau moyen des différentes mers devra être déterminé dans le plus grand nombre de ports, et de préférence au moyen d'appareils enregistreurs (...). Selon les résultats de toutes ces mesures, on choisira plus tard le plan général de comparaison pour toutes les hauteurs de l'Europe."

Un autre nouveau vocable est alors apparu avant que la France ne se conforme à ce vœu : le nom géoïde. On définit un géoïde comme "une surface équipotentielle du champ de pesanteur coïncidant au mieux avec le niveau moyen des mers. En raison des variations de la masse volumique de l'eau, des vents et des courants dominants, des variations de pression atmosphérique, la surface moyenne des mers n'est pas une surface équipotentielle. D'autre part, la façon dont le géoïde coïncide au mieux avec la surface moyenne des océans est ambiguë. Il



Contrôles de nivellement dans la cour du Marégraphe de Marseille.



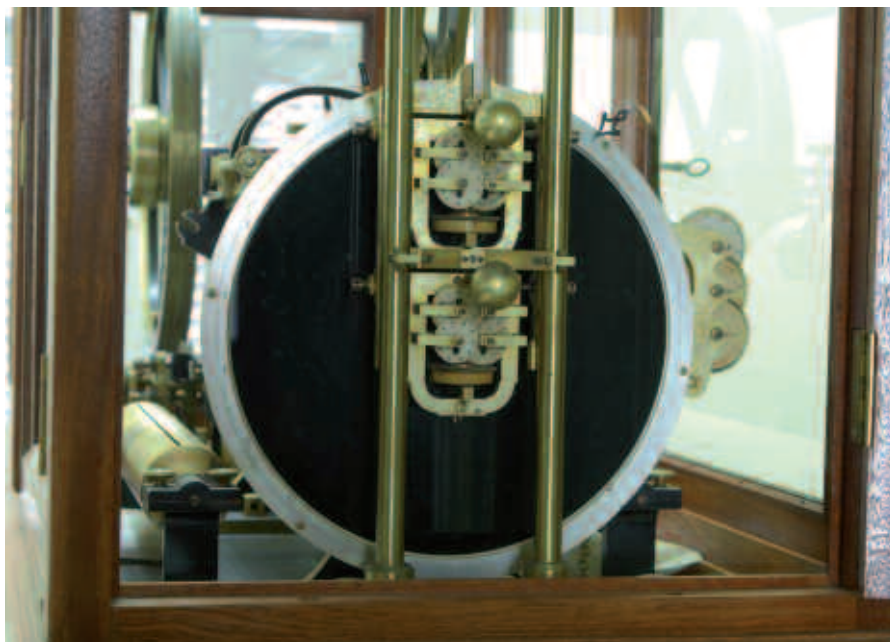
*s'ensuit que le géoïde ne peut pas être défini de manière univoque. Pour réaliser un modèle de géoïde, on peut convenir par exemple qu'il contient un point particulier : le niveau moyen enregistré par un marégraphe pendant une période donnée." L'altitude d'un point est alors définie comme "la coordonnée par laquelle on exprime l'écart vertical de ce point à une surface de référence proche du géoïde." [2]*

Quelques années après la création du nom géoïde, dans la dynamique créée par le plan de travaux publics lancé par Charles de Freycinet, et alors que le nivellement de Bourdalouë était tombé un peu en discrédit, en partie à cause de l'imprécision de son zéro, on a décidé une refonte totale du réseau de nivellement français. La Commission centrale du Nivellement Général de la France a été instituée en 1878. Lors de sa première réunion, elle a chargé une Sous-commission de préparer des projets de résolution, sur lesquels elle aurait ultérieurement à délibérer et à statuer.

En juillet 1879, cette Sous-commission a demandé l'installation à Marseille d'un marégraphe, dont les relevés devaient permettre la détermination exacte du niveau moyen de la mer dans ce port et l'établissement dans cette même ville du repère fondamental du futur réseau de nivellement.

Qu'est-ce qu'un repère fondamental et à quoi sert-il ? Une fois déterminé le niveau moyen de la mer, il faut le repérer par un point matériel, par rapport auquel sera définie la référence de la surface de niveau zéro. Le repère fondamental est ce repère de nivellement, choisi comme étant le plus stable possible, dont l'altitude est fixée conventionnellement et qui sert de point de départ aux calculs de toutes les altitudes d'un réseau de nivellement.

Les bâtiments du Marégraphe de Marseille ont été construits en 1883 à moins de trois kilomètres de l'échelle de marée utilisée par Bourdalouë, le long de la toute nouvelle promenade de la Corniche, une des plus élégantes de la cité phocéenne. L'ensemble immobilier comprend deux bâtiments principaux : un solide refuge pour l'appareil marégraphique et une maison d'habitation



Partie totalisatrice du marégraphe Reitz.

destinée à héberger le gardien des lieux. La chambre souterraine du premier édifice abrite, dans des conditions particulièrement favorables de stabilité et de conservation, le repère fondamental du futur Nivellement Général de la France. Ce repère est constitué par un rivet en bronze dont la calotte supérieure est faite en un alliage très dur de platine et d'iridium. Ce rivet est scellé dans un bloc cylindrique de granit, lui-même incrusté dans le rocher compact qui forme le promontoire sur lequel le Marégraphe est construit.

Sur proposition de Charles Lallemand, secrétaire de la Sous-commission, le choix de l'instrument s'est porté sur un type de marégraphe que l'ingénieur civil hambourgeois Reitz avait déjà installé sur l'île d'Helgoland (mer du Nord) et dans le port de Cadix (Océan Atlantique).

Avant l'invention de F. H. Reitz, le niveau moyen calculé sur une période de temps pouvait être déterminé, soit par un lourd calcul arithmétique, soit en mesurant sur les marégrammes (diagrammes fournis par les marégraphes), au moyen d'un planimètre, l'aire formée par la courbe de marée, l'axe des temps et les deux droites figurant les bornes de la période considérée. De cette dernière façon, le résultat était obtenu beaucoup plus rapidement mais manquait un peu de précision. Le



marégraphe totalisateur mis au point par F. H. Reitz remplaçait tout ce travail par une simple division de deux chiffres fournis par l'instrument et dont l'un était proportionnel au temps écoulé. Et comme, dans l'appareil nouveau, la détermination du niveau moyen se faisait automatiquement, sans l'aide d'aucun diagramme, on obtenait par cette méthode directe une précision extraordinaire, bien supérieure à celle qui était obtenue avec un planimètre.

© Photo Daniel Mener-IGN

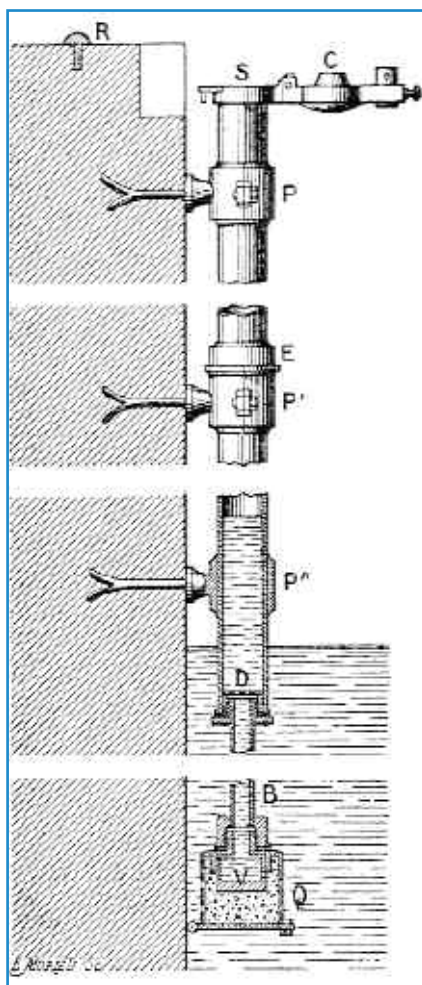


La mise au point du Marégraphe de Marseille, appareil plus élaboré que ses homologues d'Helgoland et de Cadix, a été le fruit d'un long échange de vues entre Monsieur F. H. Reitz et Charles Lallemant. Le marégraphe a ensuite été construit par la maison Dennert & Pape, installée dans la coquette ville d'Altona, dans la banlieue de Hambourg. Cet atelier de mécanique de précision avait déjà assemblé les appareils d'Helgoland et de Cadix. Les ateliers Dennert & Pape ont confié l'appareil destiné au Marégraphe de Marseille à un bateau à vapeur qui est arrivé à Marseille en novembre 1884 et l'installation de l'appareil a été assurée par Monsieur Johann Christian Dennert, en présence de Charles Lallemant. Le marégraphe a commencé à fonctionner au début du mois de février 1885.

## ■ Les médimarémètres

Les dépenses pour la construction des bâtiments du marégraphe se sont élevées à environ 38000 francs, et l'instrument a coûté, mis en place, 10500 francs. Cet ingénieux marégraphe totalisateur était donc très coûteux et, par suite, ne pouvait être multiplié autant qu'il était nécessaire le long des côtes françaises. Charles Lallemant a donc imaginé un nouvel appareil, appelé médimarémètre (mesure de la mer moyenne), qui échappait à cet inconvénient et qui permettait d'obtenir, sans le secours d'aucun mécanisme et avec une dépense insignifiante (moins de deux cents francs), le niveau moyen de la mer en un point donné.

La partie principale de l'instrument était un grand tube parfaitement étanche, que l'on fixait verticalement dans un puits en communication avec la mer ou le long d'un mur de quai. A sa base, ce tube était en relation avec un vase nommé plongeur, immergé au-dessous du niveau des plus basses mers. Une cloison poreuse divisait ce plongeur en deux parties. Le compartiment extérieur était rempli de sable, dont l'objet était de filtrer les impuretés de l'eau et d'empêcher un engorgement trop rapide de la cloison poreuse. L'enveloppe de ce compartiment était



Coupe d'un médimarémètre.

percée de trous qui permettaient à l'eau d'y pénétrer.

La détermination du niveau de l'eau se faisait simplement au moyen d'une sonde graduée, formée d'un tube mince en cuivre, qu'on laissait descendre dans le grand tube jusqu'à une butée. La graduation de la sonde tenait compte de la surélévation du niveau de l'eau créé par le volume de la sonde. Pour faciliter la lecture du niveau de l'eau, on fixait, le long de la tige, une bande de papier préalablement sensibilisé qui noircissait au contact de l'eau.

La bande de papier étant en place sur la sonde, l'opérateur introduisait dans le tube la sonde suspendue au moyen d'un fil. Une ou deux secondes après qu'elle soit arrivée en butée, il la retirait et il lisait la cote du niveau de l'eau, en regard de la limite du noir sur le papier. Il consignait le résultat sur un registre d'observation qui permet-

tait le calcul du niveau moyen sur une période de temps donnée.

Charles Lallemant a fait construire son premier médimarémètre en mai 1885. Installé dans le puits du marégraphe totalisateur de Marseille, ce prototype a été immédiatement opérationnel. Il a été le premier d'une longue série qui a bientôt équipé la plupart des ports de métropole et d'Afrique du Nord. Tout au long de son histoire, le Marégraphe de Marseille a ainsi été un véritable laboratoire d'expérimentation de matériels destinés à mesurer le niveau moyen de la mer.

A la fin de l'année 1896, alors que les observations du réseau de nivellement de base se terminaient, il devenait urgent de fixer un niveau de référence. On a alors constaté que le diagramme figurant le niveau moyen de la mer à Marseille depuis l'origine des mesures (1<sup>er</sup> février 1885) était une hyperbole qui tendait vers un niveau situé à 71 millimètres au-dessous du zéro du nivellement Bourdalouë.

Charles Lallemant, devenu Directeur du Service du Nivellement général de la France institué en 1891, a donc décidé d'adopter cette limite comme nouveau zéro des altitudes du réseau de nivellement continental français. Le centenaire de cet événement a été dignement commémoré par un article de Robert Vincent, Président honoraire de l'AFT [3]. Il est à noter que cette origine est purement conventionnelle et pratique, on aurait pu choisir un autre lieu ou une autre période et le résultat aurait pu être sensiblement différent. En Corse, l'origine des altitudes a été fixée à l'issue d'observations de la marée réalisées à Ajaccio de 1912 à 1937.

Le Marégraphe de Marseille a été édifié pour durer : il suffit d'apprécier le volume total de l'édifice et la qualité de sa construction pour s'en persuader ! Il ne s'agissait pas seulement d'établir un observatoire pour définir le zéro du nivellement national (opération réalisée après quelques années d'observations). Le Marégraphe de Marseille a aussi été conçu pour étudier les variations du niveau moyen de la mer avec le temps. Sans doute



les ingénieurs français caressaient-ils aussi le secret espoir que cet observatoire abriterait un jour le zéro unique d'un nivellement européen. A partir de 1897, les observations du niveau de la mer se sont donc régulièrement poursuivies. En 1940, le Service du Nivellement Général de la France a été rattaché à l'Institut Géographique National.

Dans les années 1960, le réseau NGF-Lallemand s'étant dégradé, l'IGN a décidé sa réfection, en conservant son origine. Le réseau de base étant terminé en 1969, le nouveau réseau a été baptisé NGF-IGN1969. Le type d'altitude du réseau NGF-IGN1969 étant différent du type d'altitude adopté par Charles Lallemand (le type d'altitude résulte du choix de la formule de calcul des altitudes, prenant en compte ou non la pesanteur), l'altitude du repère fondamental, arrêtée en 1897 à 1,660 m (altitude dite orthométrique) dans le système d'altitude NGF-Lallemand est devenu 1,661 m dans le système NGF-IGN69 (altitude dite normale).

En 1985, l'IGN a décidé d'arrêter l'enregistrement graphique de la courbe de marée et de se contenter des relevés journaliers effectués par le dernier gardien du Marégraphe de Marseille. En 1988, celui-ci a définitivement quitté la Corniche et, à partir de cette date, les relevés, dont la périodicité est rapidement passée à une semaine, ont été réalisés par un agent du centre IGN d'Aix-en-Provence.

Voici, très brièvement résumée, la riche histoire du Marégraphe de Marseille. En 2002, jugeant que la conservation de cet édifice présentait un intérêt public, le Ministère de la Culture a classé l'ensemble immobilier et l'appareil Reitz parmi les monuments historiques. En 2006 et 2007, l'IGN a entrepris d'importants travaux de rénovation de ces bâtiments. Espérons que Marseille, choisie pour être capitale européenne de la culture en 2013, capitale européenne de la culture, saura à cette occasion et avec l'aide de l'IGN, mettre encore plus en valeur cette partie de son patrimoine, jusqu'à présent très mal connue de ses habitants.



© Daniel Menet

## Le Marégraphe de Marseille : un observatoire vivant et moderne

Le Marégraphe de Marseille n'est pas seulement un lieu chargé d'histoire, c'est aussi une station de surveillance de haute qualité, équipée d'appareils modernes qui en font un observatoire essentiel des programmes actuels d'observation du niveau des mers.

Alors que l'altimétrie radar embarquée sur satellite a révolutionné notre connaissance des océans, la marégraphie a connu, depuis environ deux décennies, un essor sans précédent, aussi bien dans ses technologies que dans ses applications. Aujourd'hui, le besoin accru en observations côtières du niveau de la mer, accessibles de manière aisée, sous forme numérique, par des moyens modernes de communication, dépasse le cadre traditionnel de l'hydrographie, de la prédiction de la marée ou de la navigation. Les séries temporelles de longue durée sont par exemple les seules à permettre des analyses statistiques sur les niveaux extrêmes, et par suite à conduire à des études de dimensionnement de travaux maritimes, de protection du littoral, de

classification des zones inondables, de permis de construire et de remboursements par les assurances... Les enjeux économiques sont importants !

Ces séries concourent aussi à des études scientifiques menées notamment par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Le niveau moyen de la mer monte-t-il ? Où ? Comment ? Pourquoi ? Les ondes de tempête sont-elles plus fréquentes aujourd'hui ?... La réponse à ces questions dépend notamment de l'acquisition de longues séries temporelles d'enregistrement du niveau marin, dont l'interprétation est facilitée par l'association de la marégraphie avec d'autres techniques de mesure, en particulier avec les techniques spatiales de positionnement précis (GPS, DORIS...) qui permettent de s'assurer de la stabilité géodésique du socle sur lequel reposent les marégraphes... Les enjeux sont là considérables !

### ■ La numérisation des marégrammes de Marseille

La sauvegarde des données fournies par les diagrammes (courbes des hauteurs d'eau en fonction du temps) fournies par le Marégraphe totalisateur de Marseille entre 1885 et 1985 (dont le





papier se détériore avec le temps) et l'exploitation de ces données par des moyens informatiques nécessitaient leur conversion sous un format compatible avec les ordinateurs.

Ce travail colossal de numérisation de 1200 marégraphes a été effectué entre 1996 et 2001, grâce à une action concertée de l'IGN et du SHOM.

## ■ *L'intégration du Marégraphe de Marseille dans les programmes nationaux et internationaux d'observation du niveau des mers*

La série temporelle de mesures fournie par le Marégraphe de Marseille est, avec celle de Brest, l'une des plus longues dans le monde. De ce fait, le marégraphe de Marseille a attiré l'attention de la Commission Océanographique Intergouvernementale (COI) de l'UNESCO, qui assure depuis 1985 la coordination des efforts nationaux en vue de mettre en place un réseau mondial permanent d'observatoires du niveau de la mer, connu sous le nom de Global Sea Level Observing System (GLOSS).

Ce réseau est composé d'environ trois cents marégraphes (celui de Marseille, numéroté 205, est important parce qu'il représente la Méditerranée quasiment à lui tout seul), formant l'ossature autour de laquelle se rattachent les projets plus denses, régionaux ou nationaux.

Parmi ceux-ci, figure le Réseau d'Observatoires du Niveau de la Mer (RONIM), que le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) a mis en place sur l'ensemble des côtes françaises à partir de 1992. Le RONIM gère les mesures de 26 Marégraphes Côtiers Numériques (MCN) et des sonars. Le principe de mesure des MCN est fondé sur la mesure du temps de parcours aller-retour d'une onde acoustique émise au-dessus du plan d'eau et réfléchi par ce dernier. La connaissance de la vitesse de propagation de l'onde dans l'atmosphère permet alors de convertir la mesure de temps en mesure de hauteur. Ces appareils effectuent automatiquement une mesure toutes les dix minutes.

Sur proposition du Conseil National Français de Géodésie et de Géo-



© Photo Alain Coulomb-IGN

L'antenne de la station RGP installée sur le toit du Marégraphe de Marseille.

physique (CNFGG), et de manière à mieux répondre aux spécifications internationales en vigueur, l'IGN a donc, en juillet 1998, équipé l'observatoire de Marseille d'un marégraphe numérique. Jusqu'en 1998, les moyennes mensuelles et annuelles collectées par le Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL), service scientifique international créé en 1933, étaient établies à partir des données fournies par le marégraphe installé en 1885.

Depuis 1998, les données transmises au PSMSL sont donc celles du MCN à ultrason. L'ancien marégraphe de 1885 n'en est pas pour autant mis à la retraite. Il est toujours entretenu et, comme le marégraphe numérique, fait l'objet d'un étalonnage annuel. Des mesures hebdomadaires y sont constamment effectuées, en parallèle des mesures faites par le marégraphe à ultrason. La comparaison et l'analyse des deux séries d'observations prouve même que les données fournies par l'ancien appareil sont toujours d'excellente qualité et en particulier que sa référence est bien calée, au niveau du millimètre.

Signalons que, par l'intermédiaire de l'exploitation du Marégraphe de Marseille, et plus généralement de la surveillance géodésique des marégraphes, l'IGN entretient aussi d'étroites relations avec le Système d'Observation

National des Eaux Littorales (SONEL), coordonné depuis l'université de La Rochelle. L'objectif principal de SONEL est de rassembler et de diffuser à la communauté scientifique des observations du niveau de la mer enregistrées par des marégraphes (données horaires par exemple alors que le PSMSL ne diffuse que des moyennes) afin de mieux comprendre et décrire les variations de cette grandeur à la côte donnée.

## ■ *Une station GNSS permanente au Marégraphe de Marseille*

Les techniques spatiales de positionnement précis, telles que celles offertes par les GNSS (Global Navigation Satellite Systems (GNSS)), constituent aujourd'hui un outil qui permet un positionnement tridimensionnel dans un système de référence mondial lié à la Terre. Le GPS (Global Positioning System) et son équivalent russe GLO-NASS (GLOBAL NAVIGATION Satellite System) ont été les premiers systèmes en exploitation ; ils seront bientôt complétés par le système européen Galileo.

Dans sa proposition évoquée ci-dessus, le CNFGG proposait aussi d'équiper le Marégraphe de Marseille d'un récepteur GPS permanent, permettant la surveillance en continu par les techniques de géodésie spatiale des mouvements du marégraphe. Notre globe est en effet

maintenant couvert par des réseaux internationaux de stations fixes et permanentes dont les données sont mises à la disposition de la communauté scientifique. Sur le territoire français, dans le cadre de sa mission de service public, l'IGN fédère l'installation et la gestion d'un Réseau GPS Permanent (RGP) en partenariat avec des universités, des instituts de recherche, des collectivités territoriales et des entreprises du secteur privé.

Les données de ces stations permanentes couvrent la grande majorité des applications possibles du GNSS. Grâce à elles, les géodésiens et les hydrographes espèrent, par exemple, pouvoir distinguer dans le signal marégraphique les mouvements de la croûte terrestre des variations du niveau moyen de la mer, et d'autre part, comparer les résultats obtenus pour divers marégraphes, même très éloignés, puisque leurs coordonnées sont exprimées dans le même système global de référence.

Une station GNSS permanente, désignée par l'acronyme MARS et intégrée au réseau européen EUREF Permanent Network (EPN), est donc installée depuis le 1<sup>er</sup> août 1998 au Marégraphe de Marseille. Elle reçoit aujourd'hui les données des deux constellations GPS et GLONASS.



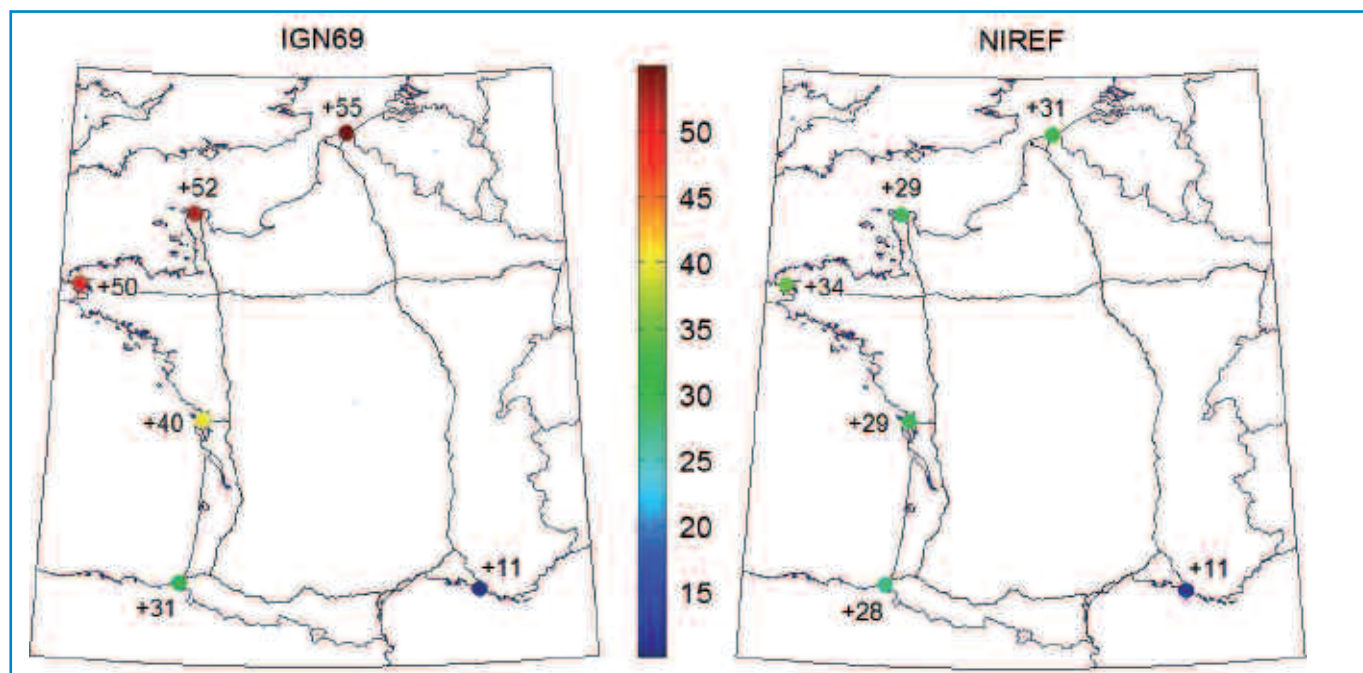
© Daniel Menet - IGN

Gravimétrie : Mesure de gravimétrie absolue dans le bâtiment du Marégraphe de Marseille.

### ■ Le marégraphe de Marseille et la gravimétrie

Nous avons vu au début de cet article que la théorie du nivellement est fondée sur la notion de surfaces équipotielles du champ de pesanteur terrestre et que l'altitude d'un point est définie comme la coordonnée par laquelle on

exprime l'écart vertical de ce point à une surface de référence proche du géoïde. Pour améliorer la connaissance du géoïde, l'IGN a entrepris, depuis 2000, des mesures de gravimétrie (technique de mesure de l'intensité de la pesanteur) sur tous les sites du réseau matérialisé de géodésie appelé Réseau de Base Français (RBF). L'observatoire de



© Paul Rebischung-IGN

Niveaux moyens des mers exprimés (en centimètres) dans les deux systèmes altimétriques NIREF et IGN69.



Marseille, qui constitue un des 23 sites du Réseau de Référence Français (RRF), formant l'ossature de ce RBF, abrite donc plusieurs points où l'on mesure l'intensité de la pesanteur. Grâce à la complémentarité de ces équipements (station RGP, points de mesure de l'intensité de la pesanteur, marégraphe numérique, points de nivellement), l'observatoire de Marseille est un élément essentiel de la contribution française au réseau européen ECGN (European Combined Geodetic Network).

## ■ Est-ce que la mer monte ?

Les observations continues effectuées à Marseille depuis 1885 ont montré que l'écart entre le niveau moyen de la mer et le repère fondamental du réseau de nivellement français allait en diminuant. Ceci pouvait être interprété de plusieurs façons : soit cette diminution mettait en évidence un exhaussement du niveau de la mer, soit elle montrait un tassement du Marégraphe de Marseille ou de son substrat, soit encore elle était due à une combinaison des deux phénomènes.

Les bâtiments du Marégraphe étant établis sur des rochers offrant a priori de bonnes garanties de stabilité, et les différents nivellements exécutés au cours des ans n'ayant montré aucun mouvement local, de nombreux auteurs avaient déjà conclu à un exhaussement du niveau de la mer.

Les moyens modernes dont nous disposons aujourd'hui confirment cette hypothèse. Les dix années d'observation GPS permanentes permettent d'abord d'écarter l'hypothèse d'un tassement du Marégraphe de Marseille ou du socle sur lequel il est construit. L'établissement en cours d'un réseau de Nivellement de Référence (NIREF) apporte aussi de nouveaux éléments de réflexion énoncés ci-dessous.

Signalons d'abord que NIREF est destiné à être utilisé dans la recherche sur les systèmes de référence altimétriques, l'unification de ces systèmes, l'étude des déformations de la croûte terrestre, l'étude des variations temporelles et spatiales du niveau des mers... Il n'est pas conçu pour devenir le nou-

veau système altimétrique officiel en France, qui reste le système NGF-IGN1969, mais il est envisagé que NIREF devienne la nouvelle contribution française au Réseau Européen Unifié de Nivellement (REUN) ou United European Levelling Network (UELN).

Les niveaux moyens de la mer enregistrés par six marégraphes français ont été exprimés récemment dans les deux systèmes altimétriques NGF-IGN1969 et NIREF. Les résultats obtenus permettent de formuler une première remarque : étant donné que l'origine du système NGF-IGN1969 est le niveau moyen enregistré au Marégraphe de Marseille durant les années 1885-1896, la valeur de + 11 cm (voir graphique p. 21) peut être lue comme la hausse du niveau moyen de la mer, à Marseille, depuis la fin du dix-neuvième siècle jusqu'à aujourd'hui. NIREF permet également d'estimer la dénivellée entre le niveau moyen de la Méditerranée et le niveau moyen océanique : la surface méditerranéenne serait (du moins à Marseille) environ 19 cm plus basse que la surface océanique. [2]

## ■ L'actualité

Au mois d'avril, grâce aux efforts conjugués de l'IGN et du SHOM, l'observatoire de Marseille doit être équipé d'un nouveau MCN, plus moderne et plus performant que celui de 1998 (marégraphe radar). Le nouvel instrument, compatible avec le réseau RONIM, comprendra notamment un télémètre à émission radar et une centrale d'acquisition numérique. La centrale permettra de recueillir les mesures de hauteur de niveau de la mer à une période d'échantillonnage inférieure ou égale à 10 minutes. Son fonctionnement sera permanent. La précision des mesures attendue est meilleure que 2 cm à 99,5%. Une nouvelle période de recouvrement durant laquelle le nouveau MCN et l'ancien marégraphe totalisateur vont fonctionner simultanément, assurera la continuité de la série de données établie à Marseille... L'observatoire marégraphe de la cité phocéenne a donc encore de beaux jours devant lui ! ●



Repère de nivellement implanté dans le mur de la maison de l'ancien gardien du Marégraphe, à droite de la porte d'entrée. Ce repère immatriculé M.abc, est à 11,450 m au-dessus du niveau moyen de la mer déterminé au même endroit en 1897.

## Contact

**Alain COULOMB**

Institut Géographique National  
Service de Géodésie et Nivellement  
Chef du Département Réseaux de référence matérialisés  
alain.coulomb@ign.fr

## Bibliographie

Archives du Marégraphe de Marseille –  
IGN - SGN 100 13 05

- [1] **Robert Vincent XYZ n°68** – Paul-Adrien Bourdalouë
- [2] **Alain Coulomb et al.** – IGN - SGN - IT n° 272, *Spécifications du produit Réseaux de nivellement* – Juillet 2008
- [3] **Robert Vincent XYZ n° 73** – Il y a 100 ans le marégraphe de Marseille
- [4] **Paul Rebischung et Henri Duquenne**, IGN – Colloque CNFG2, Paris, 2008

## ABSTRACT

**Key words:** Tide gauge, mean sea level, levelling, geodesy, gravimetry

*The Marseille tide gauge, built in 1884, is such an important heritage that it was registered historic monument in 2002. But that beautiful site also houses a modern observatory equipped with sophisticated devices, and belongs to several geodetic networks and sea level observation programmes.*



## La géovisualisation interactive basée sur le SIG 3D et le GeoVRML : une approche pour l'analyse des morphostructures

### Le Web et la visualisation géospatiale 3D

■ Tarek SLAMA et Noamen REBAI

*Le(s) SIG 3D et la réalité virtuelle (RV) constituent actuellement une puissante combinaison pour la visualisation, l'analyse et la diffusion sur le Web de données géospatiales tridimensionnelles. Dans cette étude, plusieurs morphostructures salifères du Nord de la Tunisie sont étudiées en se basant sur leurs MNTs pour visualiser des modèles 3D de terrain et extraire certains paramètres morphométriques. L'ensemble est converti au format GeoVRML pour la visualisation interactive dans un navigateur Web. Les scènes GeoVRML 3D produites montrent une grande facilité d'utilisation ainsi qu'un niveau élevé de précision. Le but est, en effet, de révéler l'importance et la puissance de cet outil dans les sciences de la terre et essentiellement dans les domaines de l'analyse spatiale 3D et de la cartographie géologique interactive sur le Web.*

#### ■ MOTS-CLÉS

SIG, scènes 3D, GeoVRML, visualisation, Web, morphostructures, Tunisie.

Les produits SIG 2D étaient pendant longtemps le seul support pour observer, traiter et analyser l'information géographique. Cela n'est plus le cas aujourd'hui grâce à l'évolution des méthodes classiques d'analyse spatiale et l'apparition de nouvelles technologies d'acquisition de l'information tridimensionnelle comme l'altimétrie laser, les sondeurs multifaisceaux et les puissantes techniques de la photogrammétrie numérique.

De ce fait, les sources d'informations deviennent abondantes et beaucoup plus précises mais aussi de taille importante. De plus, le recours aux techniques de la visualisation 3D interactive et dynamique devient une exigence pour plusieurs types d'analyses de l'information géographique (Jones et al., 2009 ; Tonini et al., 2009 ; Zanchi, et al., 2009).

La visualisation tridimensionnelle et l'analyse spatiale 3D de l'information géographique géoréférencée sont

parmi les approches les plus importantes qui ont actuellement révolutionné les Systèmes d'Information Géographique (SIG). La modélisation et la visualisation 3D des phénomènes présentant un grand niveau de complexité constituent des approches analytiques fort intéressantes favorisant la compréhension du phénomène en question (Appleton et al., 2002).

Jusqu'à tout récemment les possibilités "logicielles" pour la visualisation tridimensionnelle des entités géographiques n'étaient pas aisément disponibles pour les utilisateurs des SIG (Sheppard, 2000). Actuellement, l'intégration de la visualisation 3D avec les SIG devient évidente et intéresse plusieurs plates-formes SIG commerciales (Brown, 1999 ; Appleton et al., 2002 ; Tonini et al., 2009 ; Zanchi et al., 2009).

D'autre part, la croissance rapide du Web et en particulier celle des langages de modélisation de la réalité virtuelle (notamment VRML ou Virtual Reality

Modeling Language, qui est parmi les standards Web pour la création d'"univers virtuels" tridimensionnels), offrent de nouvelles voies pour la visualisation 3D des entités géographiques via Internet (Huang et al., 2001). La réalité virtuelle (RV) combinée avec la diffusion des visualisations 3D à travers le Web permettent un large accès aux données spatiales géoréférencées et donnent un autre sens, encore plus large et plus puissant, à l'aide à la décision (Al-Kodmany, 1999 ; Appleton et Lovett, 2004).

Le VRML a évolué rapidement vers le GeoVRML (VRML Géographique, créé en 1998) pour permettre la modélisation et la représentation 3D de l'information géographique géoréférencée sur le Web (Huang et Lin, 1999 ; Rhyne, 1999). Cette importante innovation technologique rend la visualisation tridimensionnelle du terrain beaucoup plus accessible du fait que le modèle GeoVRML peut être visualisé sur n'importe quel ordinateur. Il suffit d'avoir la configuration nécessaire permettant cette tâche. Actuellement, la génération du VRML/GeoVRML est intégrée dans plusieurs logiciels et plates-formes SIG (ArcGIS avec son module ArcScene ou ERDAS Imagine avec son module VirtualGIS).

Plusieurs travaux s'intéressent de plus en plus à cette combinaison SIG et VRML/GeoVRML, ce qui a engendré évidemment la naissance du SIG-VRML (Martin et Higgs, 1997). De nombreuses applications font appel à cette approche qui intègre le SIG (2D, 2.5D et 3D) et la réalité virtuelle (VRML et GeoVRML). Dans le domaine de l'urbanisme cette



technique a été largement utilisée pour la visualisation, la planification et la gestion urbaine, ainsi que pour la création de cités entièrement virtuelles (Doyle et al., 1998 ; Al-Kodmany, 1999 ; Morrison et Purves, 2002 ; Appleton et Lovett, 2004) et pour l'étude de l'impact du changement climatique au sein d'un paysage rural (Dockerty et al., 2004). D'autres domaines ont utilisé le SIG et la RV pour avoir de nouvelles perspectives d'analyse des données géographiques de différentes sources comme par exemple : la modélisation des sols (Grunwald et Barak, 2001), la cartographie dynamique et interactive sur le Web (Fairbairn et Parsley, 1997 ; Mitás et al., 1997), le développement d'outils de RV pour l'éducation (Moore et al., 1999), la visualisation et la gestion des systèmes forestiers (Lim et Honjo, 2003), la visualisation des scènes 3D à partir de modèle numérique de terrain (Honjo et Lim, 2001 ; Morrison et Purves, 2002) et l'aménagement du paysage sur Internet (Honjo et Lim, 2004).

La présente étude détaille une approche de visualisation tridimensionnelle des morphostructures triasiques du Nord de la Tunisie. Elle est basée sur la combinaison du SIG 3D, qui est le support de la création des scènes 3D à partir du MNT, et du GeoVRML qui est un standard Web assurant une visualisation dynamique et interactive des scènes 3D géoréférencées. Le but étant de produire des modèles 3D au format GeoVRML de certains reliefs présentant une structuration géologique et géomorphologique assez complexe (les extrusions triasiques de la "Zone des diapirs" en Tunisie septentrionale) et d'évaluer cette technique de visualisation et de diffusion sur Internet de l'information géoréférencée dans le domaine de l'analyse morphostructurale.

## Le contexte

La production des modèles VRML/GeoVRML des massifs de la zone d'étude entre dans le cadre :

- de la mise en place d'une nouvelle approche d'analyse morphostructurale basée sur la visualisation interactive des données géospatiales des

reliefs étudiés qui font partie de la Tunisie septentrionale, en se basant sur l'exploitation des potentialités des SIG 3D combinés avec la technologie GeoVRML de diffusion sur le Web ;

- d'une future implantation dans le site Web des unités de recherche ayant des activités cartographiques orientées vers le web afin d'assurer une large diffusion et plus d'accessibilité à l'information géographique et d'une manière plus dynamique et plus interactive ;
- de rendre l'accès aux données géographiques 3D plus facile et plus dynamique ;
- d'échanger de l'information tridimensionnelle à travers des groupes d'utilisateurs sur Internet sans recours aux logiciels SIG pour visualiser et analyser son contenu (il suffit de posséder un navigateur Web).

## La réalité virtuelle et l'information géographique : le GeoVRML

### ■ Le VRML

Pour mieux comprendre l'environnement réel existant il faut le visualiser. La création d'un environnement virtuel ou d'une réalité virtuelle permet toutefois de simuler cette réalité en utilisant des objets virtuels. Les langages de modélisation de la réalité virtuelle (comme VRML) permettent d'atteindre ce but.

La réalité virtuelle est une approche multisensorielle et interactive qui constitue un environnement particulier et fascinant basé sur l'interaction entre le Web et l'outil informatique dans lequel l'utilisateur devient un participant actif dans un univers totalement virtuel conçu sur des normes réelles et géoréférencées (Rhyne, 1997 ; Raper et al., 1999). Avec la RV l'utilisateur peut naviguer dans des environnements ambients présentant parfois une grande ressemblance avec le monde réel et allant même, dans un niveau assez avancé, jusqu'à proposer de nouveaux scénarios d'aménagements dans un espace 3D totalement virtuel (Appleton, 2004).

Le VRML est un langage approprié pour les navigateurs Web afin d'effectuer

des visualisations interactives et dynamiques. Il est considéré comme une technologie à part entière qui a révolutionné le "SIG-WEB" ou la cartographie numérique sur Internet surtout avec ses potentialités de visualisation dynamique et d'analyse spatiale 3D (Brown, 1999 ; Huang et Lin, 2002).

En 1996, le VRML 2.0 a été accepté comme une norme standard de visualisation sur le Web sous l'appellation VRML 97. Les fichiers VRML peuvent être consultés et visualisés dans une interface Web, en utilisant un navigateur Internet et un module d'extension (plug in) VRML. Le navigateur VRML permet à l'utilisateur de visualiser les objets tridimensionnels d'une manière interactive et suivant n'importe quelle direction et angle de vue. Les capacités du VRML incluent l'animation interactive 3D, la visualisation à partir de différents angles de vues, l'utilisation de textures pour l'habillage des objets 3D et la possibilité d'interaction avec d'autres plates-formes de type "JavaScript" pour les opérations d'analyses spatiales tridimensionnelles (Huang et Lin, 2002).

Un modèle VRML consiste en un ou plusieurs fichiers présentant conventionnellement le suffixe ".wrl" qui décrivent la géométrie et les attributs des objets dans un univers tridimensionnel bien défini. Les nœuds dans un fichier VRML constituent la composante fondamentale. Ils peuvent être de différents types et sont utilisés pour définir plusieurs paramètres comme les formes, les textures et les relations entre entités (Fairbairn et Parsley, 1997 ; Lange, 2001).

Le fichier VRML peut être créé avec un éditeur de texte ordinaire en utilisant le format caractériel standard ASCII. Ensuite, il est traité et compilé dans un navigateur Web pour visualiser les objets ainsi définis.

La structure "squelettique" d'un fichier VRML typique prend la forme suivante (Le consortium Web3D, 2007) :

- #VRML v2.0 utf 8 (ligne de l'entête du fichier ou MIMEType)
- Objets (sont des nœuds décrits par des champs)
- Group {

```

Children [
]
}
- Définition des caractéristiques
  des nœuds
  - Forme
  - Géométrie
  - Apparence
- Système de coordonnées
- Transformations
  - Translation
  - Rotation
  - Echelle
- Index Face sets
  - Grille des altitudes

```

Plus de détails sur la structuration d'un code source VRML se trouvent sur le site du consortium Web3D ([www.web3d.org](http://www.web3d.org)).

## ■ Le GeoVRML

Le GeoVRML, qui est le VRML géographique, présente de nouvelles caractéristiques dont l'intégration de données de différentes sources dans un contexte unique, simple et global. Il supporte les systèmes de coordonnées géographiques du type latitude/longitude et UTM. Le but est de permettre la représentation et la visualisation d'informations géographiques géoréférencées, comme les modèles 3D produits à partir du MNT et les cartes, dans un navigateur Web.

Les potentialités du GeoVRML sont incorporées dans une dizaine de nœuds permettant une meilleure représentation des données géographiques que celle réalisée par le VRML standard. L'ensemble des nœuds est exposé brièvement dans le tableau 1.

## SIG 3D et extraction de l'information morphostructurale

### ■ Zone d'étude

La région étudiée, le secteur de Mejez el Bab, se situe en Tunisie septentrionale (Figure 1). Elle correspond à une partie du domaine géographique de la Moyenne Mejerda et fait partie de la "Zone des diapirs". Elle présente des structures qui s'intègrent dans l'avant-pays de la chaîne alpine nordique. C'est

Nœuds	Utilités
GeoCoordinate	Incorporation du système de coordonnées
GeoElevationGrid	Définition du champ des altitudes
GeoLocation	Localisation spatiale du modèle
GeoLOD	Visualisation des détails du modèle
GeoMetadata	Intégration des métadonnées sur le modèle
GeoOrigin	Positionnement plus précis
GeoPositionInterpolator	Animation du modèle
GeoTouchSensor	Manipulation de coordonnées
GeoViewpoint	Spécification d'un angle de vue
InlineLoadControl	Module de chargement du modèle

Tableau 1. Les nœuds du modèle GeoVRML.

une région qui englobe plusieurs corps triasiques, autour desquels se sont développées des structures anticlinales et synclinales variées, ainsi que des fossés d'effondrements à remplissage tertiaires et quaternaires.

L'emplacement de cette région, entre la chaîne alpine au nord et l'Atlas tunisien à fossés au centre de la Tunisie, permet d'étudier les différents types de déformation dans l'avant pays des chaînes nordiques de Kroumirie et des Mogods.

La région de Mejez el Bab, comme le reste de la "zone des dômes", présente un grand intérêt minier. Plusieurs massifs triasiques font partie de cette zone dont Jebel el Mourra (Figure 2), Jebel Kechtilou et Jebel Jebbs (Figure 3), et sont caractérisés par une configuration morphostructurale assez complexe et intéressante pour une étude géomorphologique et morphostructurale.

### ■ Approche méthodologique

Un SIG 3D est un environnement capable d'analyser l'information spatiale 3D issue de la réalité géographique (Verbree et al., 1999). Il trouve largement son application dans plusieurs domaines présentant des phénomènes naturels assez complexes. En géologie, par exemple, les structures triasiques extrusives, les bassins d'effondrements, les structures cassantes à ampleur kilométrique présentent des géométries structurelles complexes.



Figure 1. Localisation de la zone d'étude : région de Mejez el Bab, Nord de la Tunisie.

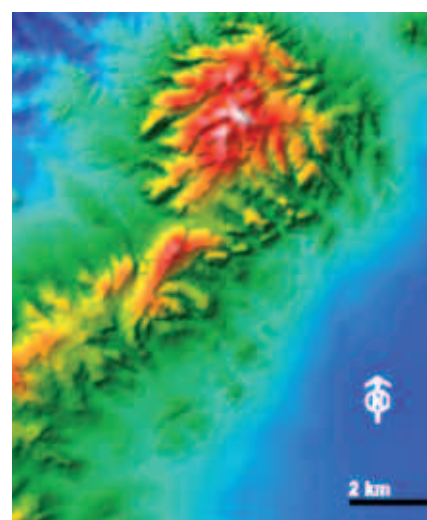
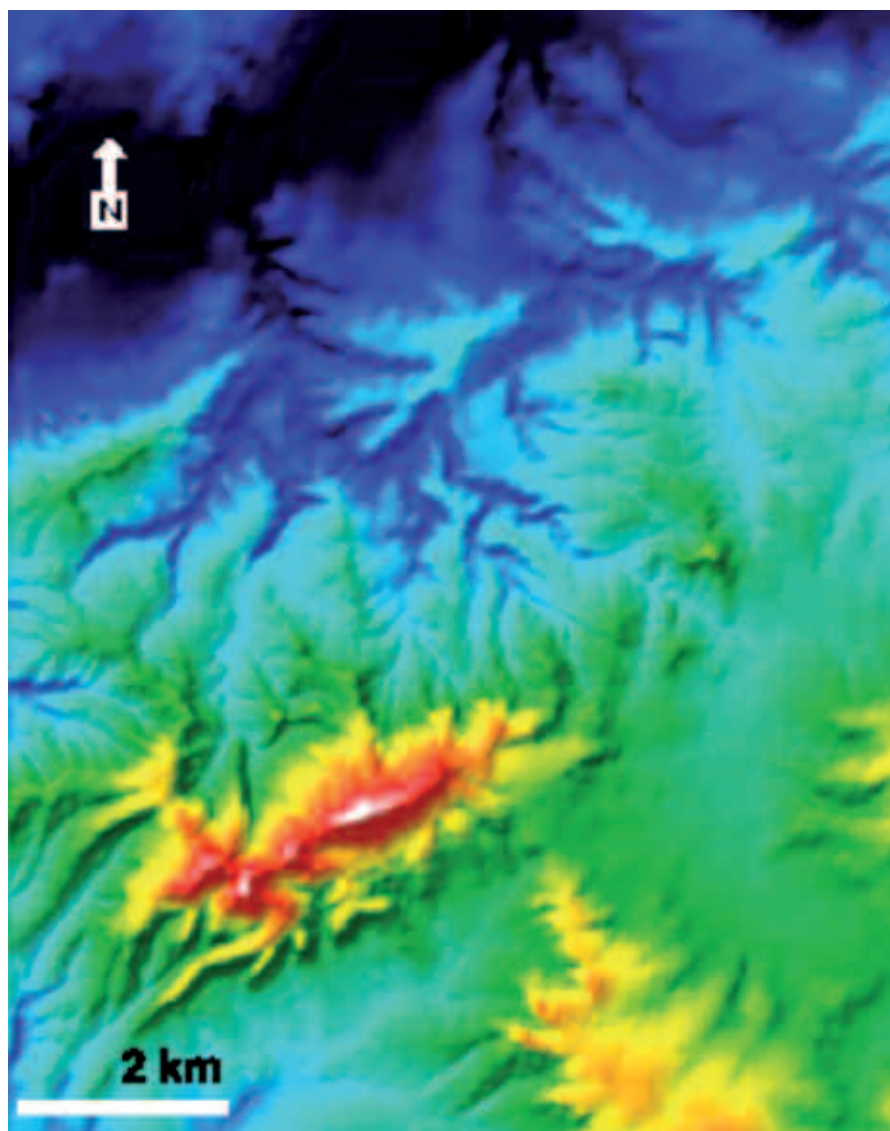


Figure 2. Modèle numérique de terrain (MNT) de Jebel el Mourra, Sud de Mejez el Bab. La résolution est de 10 m (RMSE = 1,2 m), la projection cartographique est dans le système de coordonnées UTM, zone 32. Source : carte topographique scannée n° 27, résolution raster = 300 dpi.





dures d'algèbre cartographique pour produire les cartes de relief local et de pente des deux structures géologiques. Plus de détails dans la figure 4.

## Conception du modèle GeoVRML et visualisation

### ■ La modélisation virtuelle du terrain

L'application de la réalité virtuelle pour la visualisation d'un terrain et de ses paramètres offre une nouvelle approche d'analyse tridimensionnelle dans un environnement totalement virtuel. En effet, la technologie VRML permet la création (par procédure de conversion à partir d'un fichier SIG) d'un modèle 3D du terrain géologique, la visualisation des données géospatiales (par un module de navigation VRML) et l'utilisation des services et des options Internet disponibles. Ainsi, la diffusion des modèles virtuels de MNT en 3D sur Internet devient accessible, de même que la visualisation interactive et dynamique de ces derniers. La notion de "Terrain-RV" prend naissance et occupe de plus en plus de place dans le monde scientifique ainsi que sur le Web (Honjo et Lim, 2004).

Les tentatives d'intégrations des SIG avec la RV sont nombreuses et montrent clairement que celles-ci constituent de nouvelles approches très puissantes et innovatrices, car elles permettent d'effectuer à la fois une analyse tridimensionnelle et une géovisualisation interactive dans un univers virtuel (Huang et Lin, 1999, Huang et al., 2001).

Les modèles issus du SIG (2D et principalement le 3D) sont convertis au format GeoVRML en utilisant l'une des solutions logicielles disponibles actuellement (Figure 4). Le programme dem2geoeg.exe, écrit par Dr. Martin Reddy, permet la conversion du modèle numérique de terrain (MNT) au format ASCII vers le format GeoVRML. Ce programme est disponible gratuitement sur Internet.

Le module ArcScene d'ArcGIS (ESRI, 2006) intègre la possibilité d'une conversion de ces scènes tridimensionnelles au format GeoVRML

**Figure 3.** Modèle numérique de terrain (MNT) de Jebel Kéchtitou-Jebel Jebes, Sud ouest de Mejez el Bab. La résolution est de 10 m (RMSE = 1,2 m), la projection cartographique est dans le système de coordonnées UTM, zone 32. Source : carte topographique scannée n° 27, résolution raster = 300 dpi.



En géomorphologie structurale, de nombreux paramètres de nature quantitative, qui sont qualifiés de "paramètres géomorphométriques", sont indispensables pour l'étude de la relation qui existe entre la morphologie du relief et la tectonique locale (Deffontaines et Chorowicz, 1991 ; Montgomery et Greenberg, 2000 ; Grohmann, 2004).

Il a été démontré que la configuration du relief peut exprimer cette interaction entre phénomènes endogéniques (tectonique) et exogéniques (érosion) sous forme de plusieurs paramètres morphométriques dont le relief local et la dénudation (Deffontaines et al., 1994).

Ces deux paramètres dépendent étroitement des caractéristiques tridimensionnelles du relief. La géovisualisation avec le VRML peut offrir un "environnement virtuel" d'interprétation et d'analyse des structures géologiques complexes. Plus encore, le VRML facilite la migration vers un environnement de visualisation des données géographiques géocodées (ou données géospatiales) indépendamment des plateformes SIG (Figure 4). Dans notre cas c'est le Web.

De ce fait, des modèles de relief en 3D sont ainsi générés à partir des MNT dans un environnement SIG 3D. Les analyses sont basées sur les procé-

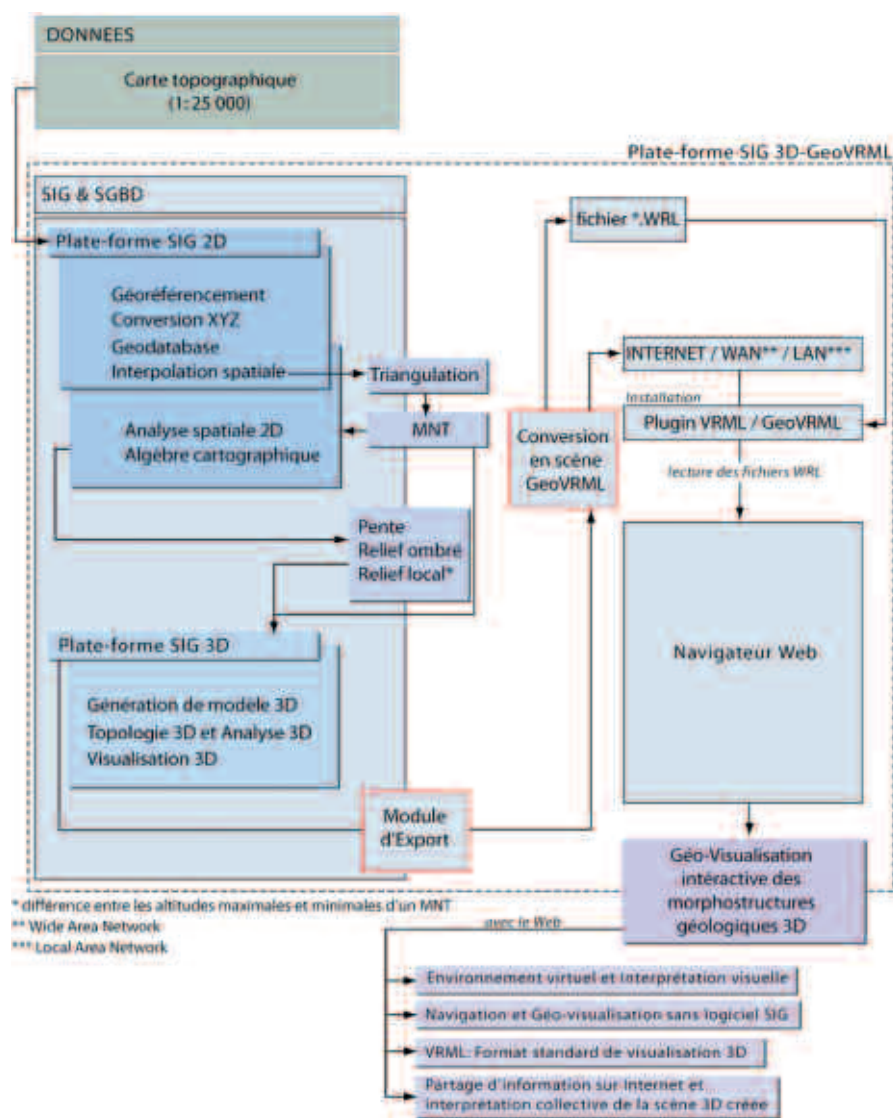


Figure 4. Organigramme simplifié montrant l'approche méthodologique utilisée dans ce travail. Une structuration en SIG 3D-GeoVRML est ainsi proposée.

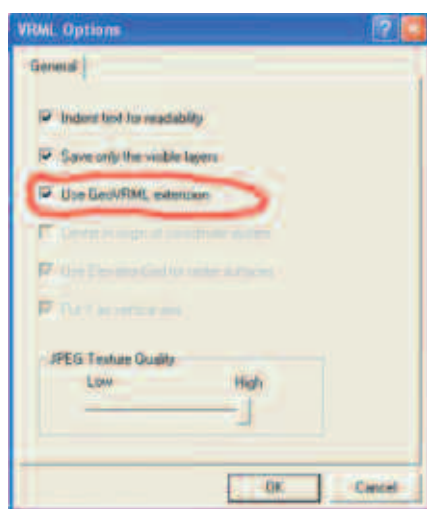


Figure 5. Module d'exportation GeoVRML d'ArcScene (ArcGIS, 2006).

(Figure 5). Cela offre d'importantes possibilités de combinaisons entre les fonctionnalités SIG 2D et 3D du logiciel et celles du moteur GeoVRML.

La nature de l'information tridimensionnelle exige une importante quantité d'informations. D'ailleurs, les fichiers MNT produits (format raster en 2D) pour le présent travail sont de grandes tailles : plus de 3 800 Ko pour le MNT de J. el Mourra et ~ 4 480 Ko pour celui du secteur de J. Kechtilou – J. Jebbs. Les modèles de triangulation de ces massifs sont également de grandes tailles (dépassant 5 Mo pour les deux fichiers générés). Les modèles 3D représentant les paramètres morphométriques de ces massifs sont aussi de tailles assez considérables.

Cependant, les fichiers GeoVRML produits (au format.wrl) montrent des tailles beaucoup plus faibles que les fichiers sources utilisés. Par exemple, le modèle GeoVRML 3D du TIN du J. el Mourra (Figure 6) est de 1 876 Ko contre 5 231 Ko du fichier TIN du même massif.

## ■ La géovisualisation interactive

Le niveau d'interactivité dans la visualisation 3D est largement préféré par les utilisateurs car elle permet une grande liberté dans le choix des paramètres de navigation dans l'espace tridimensionnel. En effet, l'angle de vue (viewpoint), la distance et la hauteur par rapport au modèle visualisé sont les principales clés de cette interactivité assez étendue (Verbree et al., 1999). La visualisation des données géoréférencées, au format GeoVRML, intègre plusieurs paramètres de la réalité géographique du terrain comme le système de coordonnées (GeoCoordinate), le niveau de détail (GeoLOD), la position géographique (GeoLocation), le système de coordonnées local (GeoOrigin) et l'angle de vue par rapport au modèle 3D de terrain (GeoViewpoint).

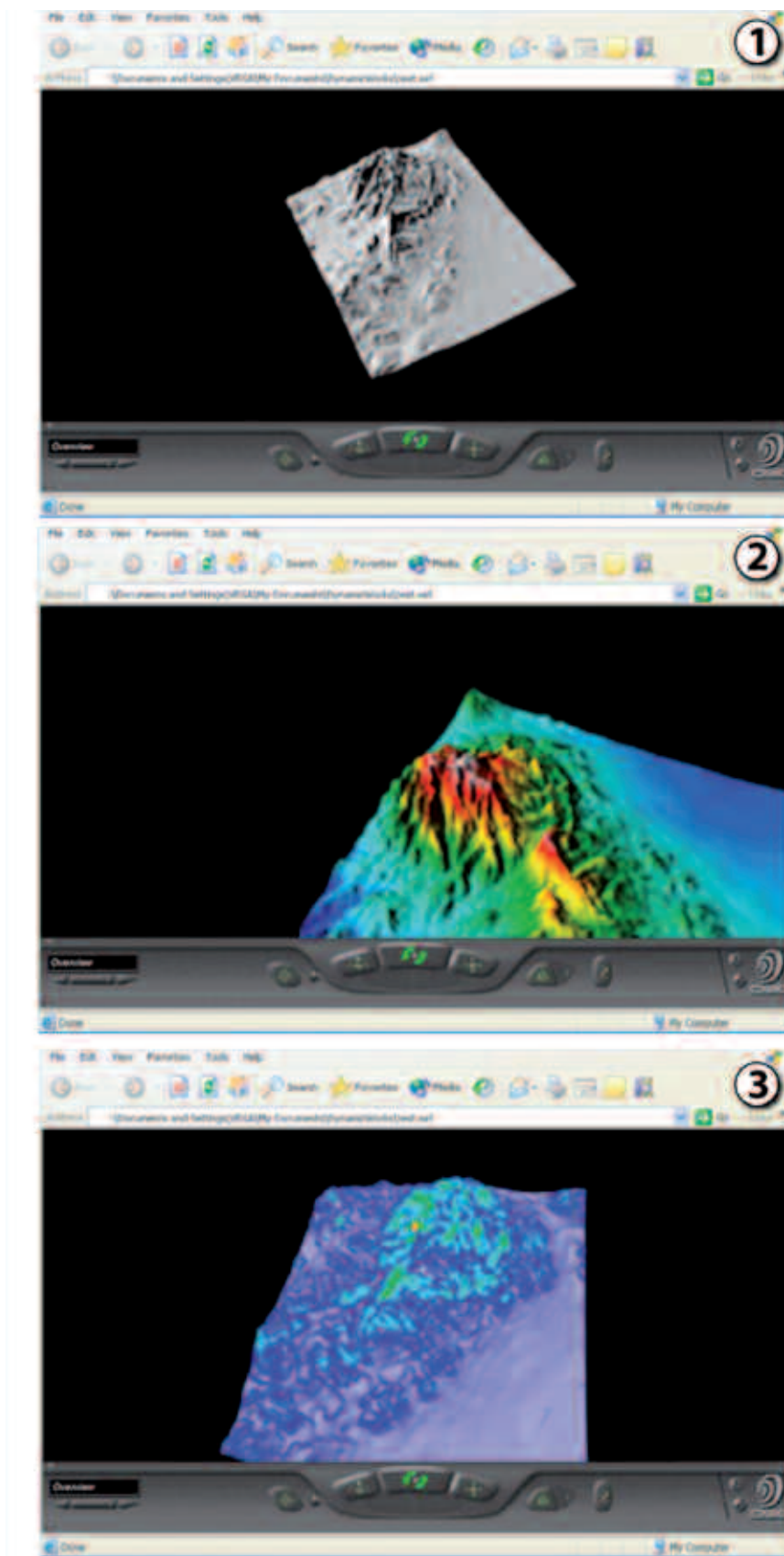
La géovisualisation des modèles GeoVRML créés est effectuée dans un navigateur Web (Explorer ou Netscape) en utilisant un navigateur VRML (Figures 6 et 7). Il existe actuellement plusieurs types de navigateurs VRML et qui sont disponibles gratuitement sur Internet, par exemple : Cosmo Player, Cortona ou WorldView. Dans notre étude nous avons utilisé Cosmo Player sous Internet Explorer (Microsoft, 2003).

Il est important de signaler que la visualisation d'un modèle GeoVRML nécessite l'installation de l'application GeoVRML 1.1.exe.

## Perspectives

Le langage VRML présente d'importantes potentialités pour décrire la géométrie et les différentes caractéristiques des objets 3D. De plus, il permet d'avoir plusieurs types d'hyper-liaisons avec d'autres documents et sources sur le Web et de représenter des interrelations entre différentes entités géo-





**Figure 6.** Visualisation des modèles GeoVRML du Jebel el Mourra en utilisant Internet Explorer et Cosmo Player. De haut en bas : les modèles 3D du relief produit par ombrage directionnel (1), du MNT (2) et du relief local produit par la soustraction du MNT à partir de sa surface des sommets (3) issus de l'analyse spatiale du massif.

graphiques qui peuvent être employées pour l'analyse et la visualisation 3D (Brown, 1999). Ce qui, en fait, facilite son intégration avec le SIG 3D (Verbree et al., 1999).

Ainsi, nos perspectives convergent principalement vers la mise en place d'une interface utilisateur (toolkit) du type JavaScript /GCI ou GUI (Graphic User Interface) permettant l'analyse spatiale 3D en intégrant les possibilités de la production de profils suivant des tracés précis sur la surface tridimensionnelle de terrain, l'analyse des bassins versants, les calculs volumétriques et l'extraction de paramètres morphométriques du terrain géologique ainsi que d'autres types d'analyses spatiales 3D.

Ce type de "toolkit" est le plus souvent mis en œuvre par le mécanisme d'intégration de la plate-forme SIG-Internet et la programmation HTML (ou le "Markup Language" d'une manière générale) sous une architecture Client-Serveur.

## Conclusion

Les deux changements les plus récents dans le domaine de la cartographie et l'analyse spatiale sont évidemment l'émergence du SIG 3D et la distribution électronique, via Internet, de l'information géospatiale tridimensionnelle. De ce fait une toute nouvelle technologie d'hypermédia prend naissance dans le monde scientifique sous la forme d'un environnement dynamique et interactif de type SIG-WEB 3D. Toutefois, la technologie de la réalité virtuelle (RV) constitue évidemment son moteur principal.

Le VRML/GeoVRML est un langage évolutif présentant de nombreuses capacités de visualisation 3D sur le Web. Sa limite est pratiquement celle de l'imagination de son utilisateur car de nombreuses fonctionnalités peuvent être ajoutées aux scènes tridimensionnelles pour plus d'interactivité et d'efficacité durant l'opération de la géovisualisation des données géographiques.

Ce travail a souligné l'importance de cette technologie émergente de la réa-



lité virtuelle qui permet aujourd'hui la visualisation des données géoréférencées sur Internet. L'intégration avec le SIG est réalisable et les possibilités d'applications sont presque sans limites.

L'analyse morphostructurale qui se base sur plusieurs paramètres et indices morphométriques extraits du modèle tridimensionnel de terrain, qui est lui aussi un domaine émergent de la modélisation numérique de terrain, trouve bien ses applications et sa place dans cet univers virtuel.

L'interaction des modèles géographiques et géologiques 3D avec la réalité virtuelle constitue le futur de l'analyse spatiale 3D. VRML/GeoVRML est considéré comme un puissant outil dont il est temps d'explorer les immenses potentialités pour visualiser et analyser les données géocodées issues d'une plate-forme SIG. ●

## Remerciements

Les auteurs remercient Monsieur le Professeur Mohamed Moncef Turki, Département de géologie à la Faculté des Sciences de Tunis, pour ses critiques et corrections de la version définitive du manuscrit.

## Contacts

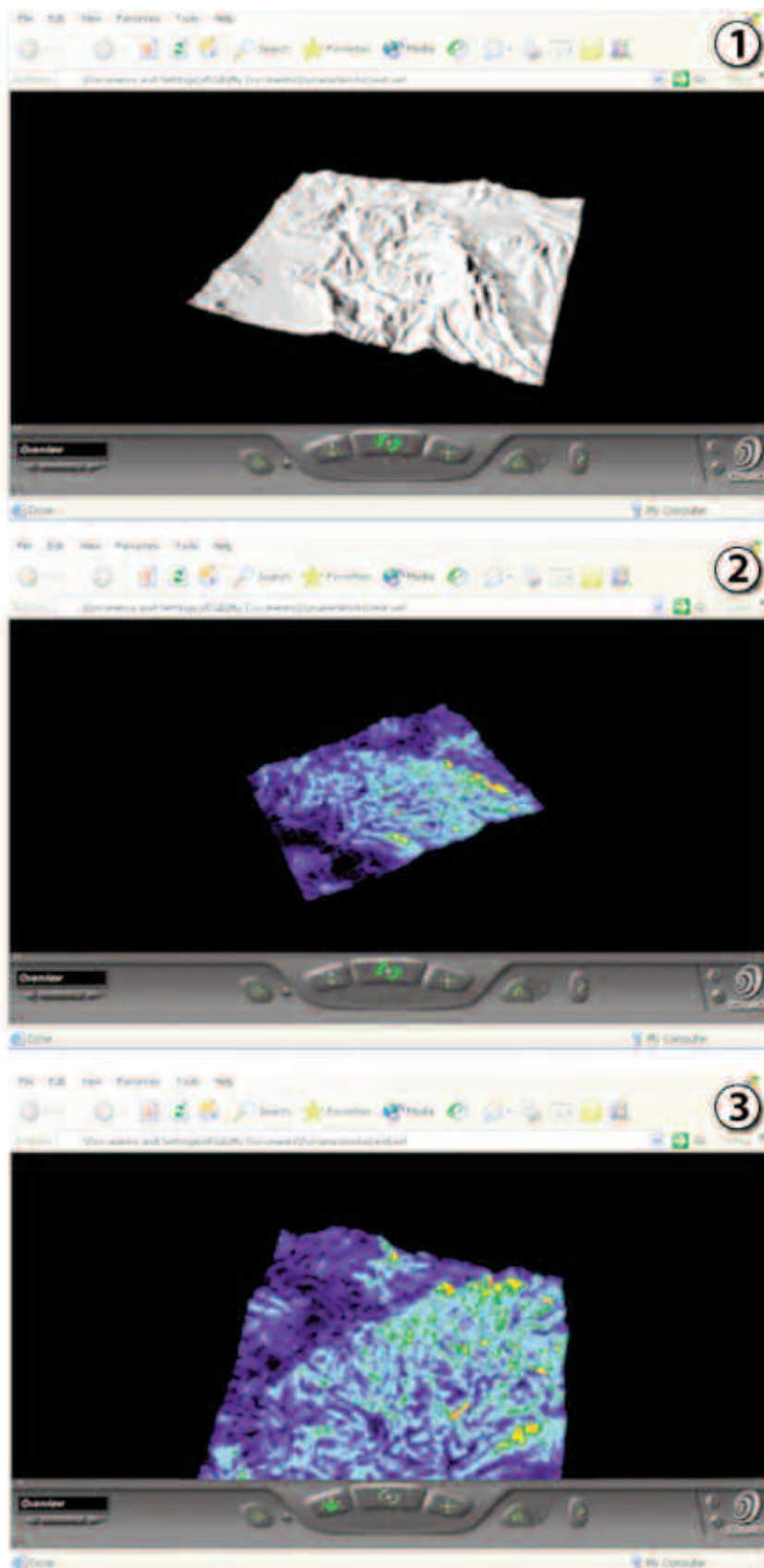
**Tarek SLAMA et Noamen REBAI**

Département de Géologie,  
Faculté des Sciences de Tunis  
trslama3d@yahoo.fr  
noamenrebai@yahoo.com

## Bibliographie

**AL-KODMANY K., 1999.** *Using visualization techniques for enhancing public participation in planning and design: process, implementation, and evaluation.* Landscape and Urban Planning, vol. 45, p.37-45.

**APPLETON K., LOVETT A., SÜNNENBERG G., DOCKERTY T., 2002.** *Rural landscape visualization from GIS data: a comparison of approaches, options and problems.* Computers, Environment and Urban Systems, vol. 26, p.141-162.



**Figure 7.** Visualisation des modèles GeoVRML du secteur de J. Kechtilou-J. Jebes en utilisant Internet Explorer et Cosmo Player. De haut en bas : les modèles 3D du relief produit par ombrage directionnel (1) et du relief local produit par la soustraction du MNT à partir de sa surface des sommets (2 et 3) issus de l'analyse spatiale du massif.



**APPLETON K., LOVETT A., 2004.** *GIS-based visualization of development proposals: reactions from planning and related professionals.* Computers, Environment and Urban Systems, (in press).

**BROWN I.M., 1999.** *Developing a virtual reality user interface (VRUI) for geographic information retrieval on the internet.* Transaction in GIS, vol. 3, p. 207-220.

Consortium Web 3D,  
<http://www.Web3d.org/vrml>, 2004.

**CRAWFORD C., 2000.** *Virtualising the 3D real world.* Geomatics Info Magazine, vol. 14, n° 9, p. 37-39.

**DEFFONTAINES B., CHOROWICZ J., 1991.** *Principal of drainage basin analysis from multisource data: Application to the structural analysis of Zaire Basin.* Tectonophysics, vol. 194, p. 237-263.

**DEFFONTAINES B., LEE J.C., ANGELIER J., CARVALHO J., RUDANT J.P., 1994.** *New geomorphic data on the active Taiwan orogen: a multiple approach.* Journal of Geophysical Research, vol. 99, p. 20243-20266.

**DOCKERTY T., LOVETT A., SÜNNENBERG G., APPLETON K., PARRY M., 2004.** *Visualizing the potential impacts of climate change on rural landscapes.* Computers, Environment and Urban Systems, (in press).

**DOYLE S., DODGE M., SMITH A., 1998.** *The potential field of Web-based mapping and virtual reality technologies for modeling urban environments.* Computers, Environment and Urban Systems, vol. 22, p. 137-155.

**FAIRBAIRN R.A., PARSLEY S., 1997.** *The use of VRML for cartographic presentation.* Computers and Geosciences, vol. 23, p. 475-481.

**GROHMANN C.H., 2004.** *Morphometric analysis in geographic information systems: applications of free software GRASS and R.* Computer and Geosciences vol. 30, p. 1055-1067.

**Grunwald S., Barak D., 2001.** *The use of VRML for virtual soil landscape modeling.* SAMS, vol. 41, p. 755-776.

**HONJO T., LIM E., 2001.** *Visualisation of landscape by VRML system.* Landscape and Urban Planning, vol. 55, p. 175-183.

**HONJO T., LIM E., 2004.** *Landscape design and visualization on the Web.* Online landscape architecture conference, Dessau, Allemagne, 13-14 mai, Anhalt University

of Applied Sciences, p. 1-9.

**HUANG B., LIN H., 1999.** *GeoVR : A Web-based tool for virtual reality presentation from 2d GIS data.* Computers and Geosciences, vol. 25, p. 1167-1175.

**HUANG B., JIAN, B., LIN H., 2001.** *An integration of GIS, virtual reality and the internet for visualization, analysis and exploration of spatial data.* International Journal of Geographic Information Science, vol. 15, n° 5, p. 440-456.

**HUANG B., LIN H., 2002.** *A Java/CGI approach to developing a geographic virtual reality toolkit on the internet.* Computers and Geosciences, vol. 28, p. 13-19.

**JONES R.R., MCCAFFREY K.J.W., CLEGG P., WILSON R.W., HOLLIMAN N.S., HOLDSWORTH R.E., IMBER J., WAGGOTT S., 2009.** *Integration of regional to outcrop digital data: 3D visualization of multi-scale geological models.* Computers & Geosciences, vol. 35, p. 4-18.

**LANGE E., 2001.** *The limits of realism: perceptions of virtual landscape.* Landscape and Urban Planning, vol. 54, p. 163-182.

**Le groupe de travail GeoVRML.**  
<http://www.geovrml.org/>, 2004.

**LIM E., HONJO T., 2003.** *Three-dimensional visualization forest of landscapes by VRML.* Landscape and Urban Planning, vol. 63, p. 175-186.

**MARTIN D., HIGGS G., 1997.** *The visualization of socio-economic GIS data using virtual reality tools.* Transactions in GIS, vol. 1, p. 255-266.

**MITAS L., BROWN W.M., MITASOVA H., 1997.** *Role of dynamic cartography in simulations of landscape process based on multivariate fields.* Computers and Geosciences, vol. 23, p. 437-446.

**MONTGOMERY D.R., GREENBERG H.M., 2000.** *Local relief and the height of Mount Olympus.* Earth Surface Processes and Landforms, vol. 25, p. 385-396.

**MOORE K., DYKES J., WOOD J., 1999.** *Using Java to interact with geo-referenced VRML within a virtual field course.* Computers and Geosciences, vol. 25, p. 1125-1136.

**MORRISON W.K., PURVES S.R., 2002.** *Customizable landscape visualization. Implementation, application and testing of a Web-based tool.* Computers, Environment and Urban Systems, vol. 22, p. 529-539.

**RAPER J., MCCARTHY T., WILLIAMS N., 1999.** *Georeferenced four-dimensional*

*virtual environment: principals and applications.* Computer, Environment and Urban Systems, vol. 22, p. 529-539.

**RHYNE T.M., 1997.** *Going virtual with geographic information and scientific visualization.* Computers and Geosciences, vol. 23, p. 489-491.

**RHYNE T.M., 1999.** *A commentary on GeoVRML: a tool for 3D representation of georeferenced data on the Web.* International Journal of Geographic Information Science, vol. 13, p. 439-443.

**SHEPPARD S.R.J., 2000.** *Visualization software brings GIS applications to life.* GeoEurope, vol. 23, n° 13, p. 28-30.

**TONINI A., GUASTALDI E., MECCHERI M., 2009.** *Three-dimensional reconstruction of the Carrara Syncline (Apuane Alps, Italy): An approach to reconstruct and control a geological model using only field survey data.* Computers & Geosciences, vol. 35, p. 33-48.

**VERBREE E., VAN MAREN G., GERMS F., TANSEN F., KRAAK M.J., 1999.** *Interaction in virtual world views - linking 3D GIS with VR.* International Journal of Geographic Information Science, vol. 13, p. 385-396.

**ZANCHI A., FRANCESCA S., STEFANO Z., SIMONE S., GRAZIANO G., 2009.** *3D reconstruction of complex geological bodies: Examples from the Alps.* Computers & Geosciences, vol. 35, p. 49-69.

## ABSTRACT

**Key words:** GIS, 3D scenes, GeoVRML, visualization, Web, morphostructures, Tunisia.

*3D GIS and virtual reality (VR) (technology) seem to be actually a powerful geospatial Web-based 3D visualization and analysis solution. In this work, numerous salt morphostructures within northern Tunisia have been studied to visualize 3D terrain models and to extract certain morphometric parameters based on their accurate DEMs. GeoVRML models are produced to enable interactive visualization into any Web navigator. 3D GeoVRML scenes show an interesting ease of use and high level of detail. The main goal of this study is to reveal the importance and the power of this tool in earth sciences and essentially in 3D spatial analysis and interactive geological cartography on the Web.*

# Evaluation ponctuelle des performances du réseau TERIA

■ Stéphane DURAND - Laurent MOREL

*La France Métropolitaine compte actuellement 3 réseaux privés proposant des services de positionnement temps réel précis : TERIA, Orphéon et S@t-info. Après un bref rappel des principes fondamentaux des modes de positionnement RTK et RTK Réseau (NRTK), nous présentons dans cet article les résultats d'une campagne de mesures mettant en œuvre ces deux types de positionnement dans le réseau TERIA. Afin de comparer ces deux modes de positionnement, nous avons fait varier la distance à la station de référence utilisée pour le mode RTK classique et utilisé les mêmes observations pour les deux calculs en temps réel. Nous avons également comparé les positions RTK à des positions RGF93 obtenues par post-traitement. Les principaux résultats montrent une répétitivité du positionnement RTK Réseau d'au moins aussi bonne qualité que le positionnement RTK classique et de l'ordre de 2 à 2,5 cm en planimétrie et en altimétrie. Nos résultats montrent également une précision de rattachement à la référence nationale RGF93 de l'ordre de 1,5 cm pour le RTK Réseau TERIA en planimétrie et en altimétrie, contrairement au mode RTK classique dont la précision se dégrade avec l'éloignement de la station de base. Les temps d'initialisation sont également similaires et proches de 30 secondes en moyenne.*

## MOTS-CLÉS

GNSS, RTK, Réseau Temps Réel, TERIA

Si la France n'a pas été pionnière en Europe dans le développement des réseaux GNSS temps réel, elle possède aujourd'hui sur tout ou partie de son territoire de trois réseaux fournissant des services de positionnement temps réel, avec des précisions allant de quelques décimètres à quelques centimètres : Orphéon, S@t-Info et TERIA. Apparus au début des années 2000 suite à des initiatives privées, ces réseaux GNSS ont pour vocations principales de faciliter les travaux de rattachement à la référence nationale RGF93 et de simplifier la mise en œuvre du positionnement GNSS temps réel.

Le positionnement RTK est basé sur le concept de positionnement différentiel : pour deux récepteurs proches (quelques kilomètres) observant simultanément le même satellite GNSS (à une altitude moyenne de 20 000 km), le trajet du signal GNSS entre le satellite et les deux récepteurs est quasiment le même. Les erreurs spatialement corrélées, principalement liées à la traversée

de l'atmosphère et aux erreurs d'orbite du satellite sont donc identiques et peuvent s'éliminer par simple différentiation des observations entre les deux récepteurs. En pratique, en positionnement RTK, le récepteur de l'utilisateur, appelé mobile, utilise comme observations fondamentales la différence entre ses propres mesures sur les satellites GNSS et les mesures réalisées au même instant sur les mêmes satellites par un autre récepteur, de position connue dans le référentiel RGF93, appelé base. Ce faisant, et connaissant les positions des satellites en RGF93, le mobile détermine son écart de position à la base et, connaissant la position de la base en RGF93, en déduit sa propre position dans le référentiel RGF93.

Le principe même du positionnement RTK amène deux remarques fondamentales. Premièrement, l'efficacité du mode différentiel diminue avec l'augmentation de la distance entre base et mobile. On considère d'ailleurs pour cette raison qu'une position RTK est

exploitable jusqu'à une distance de 15-20 km de la station de base. Deuxièmement, obtenir une position RTK implique de disposer de deux récepteurs (mobile et base) observant simultanément les satellites GNSS.

Pour le positionnement RTK Réseau (NRTK), le réseau GNSS temps réel est composé de récepteurs de position connue (bases) séparés les uns des autres d'une distance variant suivant les réseaux de 40 à 100 km. Pour l'utilisateur, il n'est donc pas question de se connecter au récepteur du réseau le plus proche pour faire du positionnement RTK classique, la précision du mode se dégradant au-delà de 15-20 km. Dans un réseau, l'idée est plutôt de modéliser ces erreurs spatialement corrélées et leur évolution dans le temps, puisque les récepteurs du réseau observent en continu les satellites GNSS. Les stations du réseau transmettent donc en temps réel leurs mesures sur les satellites GNSS à un serveur central, qui peut se charger de la modélisation et qui transmet à l'utilisateur des mesures et des valeurs interpolées des erreurs spatialement corrélées, permettant au mobile de déterminer sa position en utilisant le mode différentiel.

**L'intérêt principal d'un réseau est donc de libérer l'utilisateur des contraintes liées à la mise en œuvre d'un récepteur de base.** Contraintes financières, liées à l'achat du second récepteur et à la nécessité de le surveiller, mais surtout contraintes pratiques liées au rattachement de cette base à la référence nationale. En effet, dans un réseau temps réel tel que le réseau TERIA concerné par cette étude, les positions des stations du réseau sont préalablement déterminées en RGF93 et un utilisateur du réseau aura naturellement sa position dans ce système de référence. Cette caractéristique des réseaux temps réel est d'autant plus intéressante que





suite au décret n° 2006-272 du 3 mars 2006, le rattachement des travaux au RGF93 devient une obligation à partir du 10 mars 2009 *“pour toutes les administrations de l’Etat, les collectivités locales et les entreprises chargées de l’exécution d’une mission de service public”*.

Différentes techniques existent pour positionner un mobile dans un réseau. Les techniques VRS et FKP, détaillées plus loin, permettent une modélisation et une interpolation, à l’intérieur de la zone couverte par le réseau, des erreurs spatialement corrélées. Le concept MAC permet de transmettre au mobile les données nécessaires à cette modélisation / interpolation.

L’existence de plusieurs techniques de modélisation/interpolation a simplement une raison historique. Dans un contexte temps réel, il est impératif de transmettre à l’utilisateur l’ensemble des informations nécessaires à son positionnement en un minimum de temps. Comme il n’est techniquement pas possible de transférer directement l’ensemble des mesures des récepteurs du réseau au mobile, le serveur central a pour rôle de prétraiter les observations, afin que la quantité d’information transmise au mobile permette le positionnement avec une quantité (débit) d’informations minimum.

Le contexte français est particulièrement intéressant puisque les trois réseaux privés opérant sur le territoire mettent chacun en œuvre une technique différente pour la modélisation et l’interpolation des erreurs spatialement corrélées :

**La technique FKP** (Flächen-Korrektur-Parameter) : Il s’agit de la technique employée sur le réseau TERIA des géomètres-experts français. Le serveur central détermine, à partir d’un ensemble de 6-8 stations une modélisation des erreurs spatialement corrélées sous forme de deux plans : l’un pour les erreurs dispersives (ionosphère) et l’autre pour les erreurs non dispersives (troposphère et orbites). Les paramètres de ces plans sont envoyés à l’utilisateur et permettent de réaliser le positionnement différentiel précis en temps réel.

**Le Mode VRS** (Virtual Reference Station) : mise en œuvre sur le réseau

S@t-Info, cette technique consiste, au niveau du serveur central, à utiliser les 3 stations les plus proches du mobile afin de déterminer, par interpolation des mesures, des observations pour une station virtuelle située à proximité du mobile (typiquement, une station située à une position DGPS – à quelques mètres du mobile). Ces observations d’une station virtuelle sont envoyées directement au mobile, qui détermine sa position par méthode RTK classique. Cette technique a l’avantage d’être compatible avec d’anciens matériels GNSS RTK.

**Le Concept Maître Auxiliaire** (MAC – Master Auxiliary Concept). Utilisé par le réseau Orphéon, le concept MAC n’est pas à proprement parler une technique de modélisation ou d’interpolation des erreurs à l’intérieur du réseau mais plus une méthode permettant de transférer au niveau du mobile les observations d’un ensemble de stations alentour (cellule), en réduisant au maximum la quantité d’informations à transmettre. Le principe est dans la cellule, de sélectionner une station dite “Maîtresse” et de transmettre au mobile les observations de la station maîtresse ainsi des corrections différentielles entre les autres stations (dites Auxiliaires) et la station maîtresse. Le récepteur mobile a alors la possibilité de reconstruire les observations des stations appartenant à la cellule du réseau, et peut calculer sa position en utilisant la technique (VRS, FKP, autre...) de son choix (plus de détail dans [1]).

## Objectifs de l’étude

L’une des thématiques en recherche appliquée du Laboratoire de Géodésie et Géomatique de l’ESGT (L2G) consiste à caractériser, de manière ponctuelle dans le temps et dans l’espace, les performances des réseaux temps réel français. Après une première campagne de mesures en 2007 dans le réseau Orphéon (cf. [1]), nous avons réalisé durant l’hiver 2008 une seconde campagne dans le réseau TERIA.

Dans ces campagnes, nous étudions la précision interne du positionnement réseau, sa capacité à fournir une posi-

tion dans la référence nationale et ses performances en termes de précision par rapport à une méthode plus classique telle que le RTK.

Ne disposant pas des moyens humains et financiers nécessaires à une étude globale, à l’échelle de la France et continue dans le temps, des différents réseaux opérants sur le territoire français, nous avons consciemment préféré insister, lors de la mise en place de nos procédures de tests, sur le caractère ponctuel et reproductible de nos campagnes (deux jours de mesures, zone géographique donnée). Nous prévoyons par conséquent de réitérer nos tests dans différentes zones géographiques, à d’autres périodes et sur différents réseaux afin de compléter nos résultats. Nous espérons également que notre initiative et la méthodologie proposée pourront inciter d’autres utilisateurs à compléter ces résultats, par le biais de partenariats ou de tests indépendants, à l’instar du projet de fin d’études de Luc Straub (cf. [2]).

De ce fait, les présenter dans cet article ne constituent en aucun cas une évaluation définitive du réseau TERIA, mais des indicateurs ponctuels restant à compléter, permettant d’informer les utilisateurs actuels et potentiels sur le niveau de performance de ces réseaux.

## Description de la campagne dans le réseau TERIA

La campagne de mesures s’est déroulée sur deux jours, les 28 février et 5 mars 2008, au sud de Chartres (cf. figure 1) et a mobilisé deux personnes et deux véhicules de l’Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT).

### ■ Plusieurs zones

Afin de tester l’évolution de la qualité du positionnement en fonction de la distance à la station de référence la plus proche, nous avons sélectionné quatre zones éloignées respectivement de 13 km, 28 km, 44 km et 59 km de la station CHPH (cf. figure 1). L’un de nos objectifs étant de comparer le RTK classique et le RTK réseau quant à leur aptitude à éliminer les erreurs spatiale-

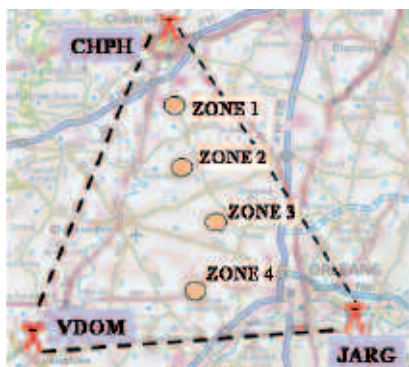


Figure 1. Localisation des zones de travail dans le réseau TERIA.

ment corrélées, nous avons choisi de faire du RTK classique avec de longues lignes de base, même si cela ne correspond pas à son mode de fonctionnement le plus classique (15-20 km maxi). Le choix des zones s'est fait autant que possible le long de la bissectrice du triangle formé par les trois stations entourant notre chantier (CHPH, VDOM et JARG). Bien que le calcul s'opère avec plus de trois stations, le triangle reste l'unité géométrique de base à prendre en compte. Ne souhaitant pas étendre notre campagne sur plus de deux jours, nous avons choisi de limiter notre étude à 4 zones. Les zones 1 à 3 sont à peu près réparties entre la station CHPH et le centre du triangle formé par les stations CHPH, VDOM et JARG. La zone 4 est délibérément au-delà du centre du triangle, donc plus proche des stations VDOM et JARG que de la station CHPH servant au positionnement RTK classique afin d'avoir un cas limite.

### ■ Plusieurs points dans chaque zone

Dans chaque zone d'étude, nous avons matérialisé différents types de points, afin d'évaluer l'influence de l'environnement sur la qualité du positionnement :

- au point rural : lieu dégagé sans masques,
- deux ou trois points urbains : lieux avec au moins un masque total dans une direction (en pratique, ces points entourent l'église du village).

### ■ Réalisation des tests

Pour cette campagne nous avons mis en œuvre pour chacune des deux personnes deux récepteurs GRX1202GG et

une antenne AX1202 mis à disposition par la société Leica Geosystems, un splitter de marque GPSNetworking afin de dupliquer les observations de l'antenne sur les deux récepteurs, un récepteur Leica GPS500, nécessaire pour le rattachement des points, deux trépieds et deux embases étalonnées (nivelle et plomb optique).

Sur chaque point mesuré, stationné par un trépied et une embase, nous avons mis en place un équipement composé d'une antenne AX1202, d'un splitter et de deux récepteurs GRX1202G utilisant simultanément les mêmes données (cf. figure 2). Pour chaque point, nous obtenons ainsi :

- un positionnement RTK classique à partir de la station TERIA. Nous disposons pour cela d'un accès temporaire aux données de la station CHPH via les serveurs du réseau TERIA ;
- un positionnement RTK Réseau à partir du réseau TERIA.

La procédure suivie sur chaque zone est la suivante, dans l'ordre chronologique :

- Mise en place de l'équipement décrit à la figure 2 sur le point rural de la zone.
- 1 - Réalisation d'une session de mesure en continu de 1 h environ, avec un masque d'élévation nul
  - 2 - Réalisation de trois ou quatre sessions de 10 mn en faisant varier le masque d'élévation de 15 à 35°, afin d'étudier l'influence de la géométrie de la constellation sur les performances du positionnement RTK et NRTK
  - 3 - Réalisation d'une série de sessions pour déterminer le temps moyen d'initialisation des modes RTK et NRTK sur le point (masque d'élévation à 0°)

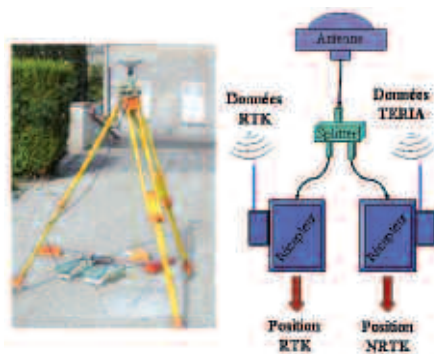


Figure 2. Equipement utilisé sur chaque point observé.

- Mise en place de l'équipement sur chacun des trois points urbains, et réalisation d'une session de mesures de 10 mn, avec un masque d'élévation nul.
- Retour de l'équipement sur le point rural, pour recommencer la procédure décrite au point 1.

Les points observés sur chaque zone ont été matérialisés à l'aide d'un trépied et d'une embase par centrage forcé. Nous les avons également matérialisés au sol à l'aide de clous d'arpenteur pour les réutiliser ultérieurement et avons mesuré la hauteur d'instrument au moins deux fois (lors de la mise en place de l'antenne et avant le passage à un autre point). Cela permet d'assurer en particulier, lors du retour sur le point rural, que l'on mesure bien le même point.

## Coordonnées de référence des points

L'un des objectifs de cette campagne étant d'apprécier la précision totale (exactitude) du positionnement NRTK, il est indispensable de disposer, pour l'ensemble des points mesurés, d'une position de référence en RGF93. Nous avons rattaché l'ensemble des points en RGF93 en utilisant les stations du RGP les plus proches en post-traitement à l'aide du logiciel Leica Skipro 3.

Pour chaque zone, le point rural est déterminé par méthode statique, avec en moyenne 3 h de données, et les points urbains, situés à moins de 100 m du point rural, sont déterminés par méthode statique rapide par rapport au point rural avec 10 mn de mesures.

Les résultats obtenus pour notre rattachement indiquent que la précision planimétrique des points de la campagne dans le RGF93 est de l'ordre de 0,7 cm et que la précision altimétrique est de l'ordre de 1,5 cm. Ces résultats sont de très bonne qualité, voire optimistes en planimétrie, compte tenu de la précision actuelle du réseau RGP (1 à 2 cm) et montrent que le rattachement à la référence nationale se réalise très bien dans ce réseau même avec certaines lignes de base très longues.

Point	Durée	PDOP Min	PDOP Max	Nb RTK	Nb NRTK	Planimétrie				Hauteur Ellipsoïdale			
						RTK		NRTK		RTK		NRTK	
						STD (cm)	EMQ (cm)	STD (cm)	EMQ (cm)	STD (cm)	EMQ (cm)	STD (cm)	EMQ (cm)
Z1R (13 km)	50 mn	2,20	2,60	2960	2919	0,7	0,9	0,8	0,9	1,4	2,5	1,3	1,5
Z2R (28 km)	52 mn (3 h) 50 mn	1,60	3,63	5614	5512	1,1	1,7	1,0	1,1	1,5	1,6	1,2	1,5
Z3R (44 km)	51 mn (3 h) 50 mn	1,60	3,80	4394	4283	1,1	2,0	1,2	1,4	1,6	1,8	1,5	2,3
Z4R (59 km)	60 mn	2,10	3,53	3227	3173	1,4	2,9	1,0	1,3	1,5	2,4	1,1	1,4

Tableau 1. Résultats des positionnements RTK et NRTK sur les points ruraux.

## Résultat des comparaisons RTK / NRTK

Le tableau 1 résume, pour les points ruraux, les résultats obtenus sur les positionnements RTK et NRTK. Pour chaque point, on trouve, dans l'ordre des colonnes, la durée de la (ou des) session(s) de mesure (avec entre parenthèses, l'intervalle de temps séparant deux sessions), les valeurs du PDOP minimum et maximum, le nombre de positions RTK et NRTK enregistrées au cours des sessions, l'écart-type (STD) et l'erreur moyenne quadratique (EMQ) par rapport à la position de référence RGF93 en RTK et NRTK pour la planimétrie, puis pour l'altimétrie.

### ■ Etude de la répétitivité

Etudier la répétitivité, autrement dit la dispersion, revient à analyser la capacité d'une stratégie de positionnement (RTK ou NRTK) à retrouver au cours du temps la même position. Pour cela nous étudions les écarts-types de toutes les sessions (cf. tableau 1).

En planimétrie, comme illustré par la taille des nuages de points des figures 3 et 4, on note que la répétitivité du NRTK est inférieure à 1,2 cm (1,0 cm en moyenne pour les 4 points ruraux), quelle que soit la zone, avec des valeurs de PDOP relativement bonnes (entre 1,60 et 3,80 cm). Dans le cas du RTK, les valeurs de répétitivité sont assez similaires, et en moyenne légèrement supérieures (1,1 cm en moyenne pour les 4 points). Pour la hauteur ellipsoïdale, la répétitivité moyenne sur les 4 points ruraux est proche de 1,3 cm en NRTK et de 1,5 cm en RTK (cf. figures 5 et 6). A noter que les valeurs de répétitivité pour le RTK sont dans tous les cas supérieures à

celles du NRTK (écart jusqu'à 0,4 cm en zone 4) et restent similaires quelle que soit la zone.

### ■ Etude de la précision

L'examen des EMQ du tableau 1 permet de quantifier la qualité du positionnement RTK et NRTK en RGF93 au cours de notre campagne. Ces EMQ se rapportent à la position de référence calculée en statique dans le RGP.

En planimétrie, au vu des résultats du tableau 1, la qualité du rattachement temps réel au RGF93 dans le réseau TERIA est en moyenne de 1,2 cm, variant de 0,9 cm à 1,4 cm. En RTK, le rattachement est moins précis car il est en moyenne de 1,9 cm, variant de 0,9 à 2,9 cm. On remarque une dégradation importante de la précision avec l'augmentation de la distance à la station émettrice, atteignant 2,9 cm pour la zone 4 (cf. figures 3 et 4). On remarque également sur ces figures un décalage au Nord-Ouest du nuage de points des positions RTK par rapport au point de référence. Cette caractéristique est systématique pour tous nos résultats et,

mis à part la zone 4, n'excède pas la précision planimétrique de nos points de référence (1 à 2 cm).

En altimétrie, la précision du positionnement NRTK TERIA est en moyenne de 1,7 cm variant entre 1,4 cm et 2,3 cm quelle que soit la zone pour les sessions dont les valeurs de PDOP restent inférieures à 4 (cf. figure 5). En RTK, la précision moyenne est plus élevée (2,1 cm). La plupart du temps les valeurs des précisions sont légèrement supérieures au NRTK mais contrairement à la planimétrie, on n'observe pas en altimétrie une aussi nette dégradation de la précision avec l'augmentation de la distance à l'émetteur.

Pour conclure sur ces analyses de précisions interne et totale, on peut dire que lors de notre campagne de tests, le NRTK s'avère un positionnement d'aussi bonne, voire de meilleure qualité que le RTK classique, aussi bien en planimétrie qu'en altimétrie, avec une précision de l'ordre de 2 à 2,5 cm. On remarque que le positionnement RTK s'est avéré être aussi de très bonne qualité, mais avec une dégradation de sa

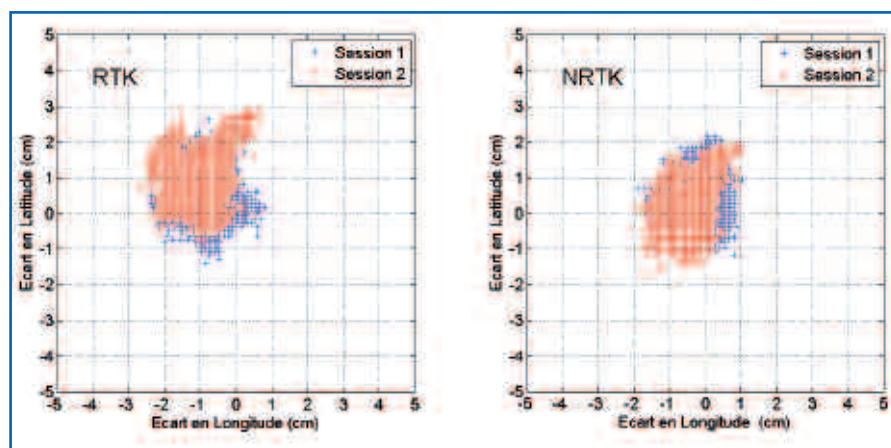


Figure 3. Écarts planimétriques du positionnement RTK et NRTK en zone 2 (relativement à la position de référence calculée en statique dans le RGP).



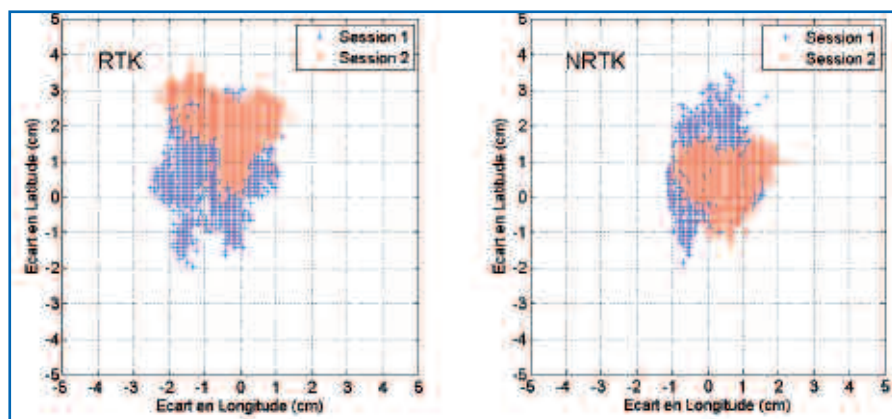


Figure 4. Ecart planimétriques du positionnement NRTK et RTK en zone 3 (relativement à la position de référence calculée en statique dans le RGP).

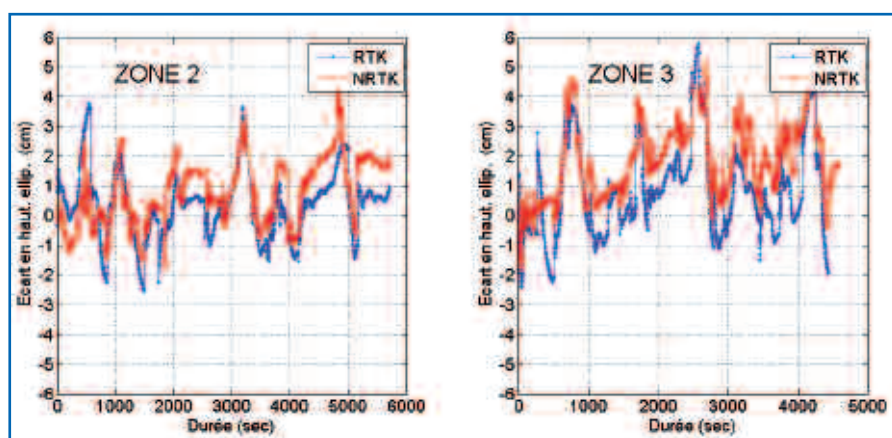


Figure 5. Ecart altimétriques du positionnement NRTK et RTK en zones 2 et 3 (relativement à la position de référence calculée en statique dans le RGP).

précision totale, surtout en planimétrie, avec l'éloignement à la station émettrice RTK. Bien entendu, ces mesures ont été réalisées de manière ponctuelle et localisée et ne permettent pas de conclure définitivement sur les performances comparées des méthodes RTK classique et NRTK TERIA.

### ■ Temps d'initialisation

Par définition, le temps d'initialisation correspond au temps nécessaire au récepteur temps réel pour obtenir une position dite fixée (de précision centimétrique). Ce temps d'initialisation est fortement lié à la problématique de la résolution des ambiguïtés entières sur la mesure de phase GPS, et aux erreurs résiduelles (atmosphère, orbite) qui en complique la résolution.

L'objectif de cette étude est de comparer les modes RTK et NRTK TERIA quant à leur rapidité de résolution des ambiguïtés. On peut en effet penser que le mode NRTK, en modélisant et interpolant les

erreurs spatialement corrélées, permet une meilleure modélisation des doubles différences de mesures et donc une plus rapide résolution des ambiguïtés.

Pour ces tests, nous avons pour chaque zone réalisé plusieurs phases d'arrêt puis de redémarrage du récepteur et analysé les trames NMEA en sortie. L'un des avantages de l'équipement détaillé sur la figure 1 est que nous sommes assurés de disposer, au niveau des deux récepteurs, des mêmes données provenant de la même antenne.

De plus, l'utilisation de deux récepteurs

identiques pour le RTK et le NRTK permet d'assurer le même calcul pour la résolution des ambiguïtés. Nous avons pris soin, au cours de ces tests, d'arrêter puis de redémarrer les deux récepteurs au même moment, afin d'avoir des conditions les plus identiques possibles. Nous avons fait le choix de ne pas réinitialiser complètement les récepteurs entre chaque test, leur permettant ainsi de conserver en mémoire les positions approximatives des satellites avec pour conséquence un positionnement plus rapide, afin de nous placer dans des conditions plus proches de leur utilisation sur le terrain par un professionnel.

Nous avons considéré dans ces essais que le temps d'initialisation correspondait au niveau des trames NMEA à la différence temporelle entre l'apparition de la première position RTK ou NRTK et la première position en mode absolu. Les résultats obtenus pour chaque zone sont résumés dans le tableau 2 et illustrés par la figure 6. Pour le NRTK, le temps d'initialisation moyen pour l'ensemble des zones est de 27,4 s. La variation du temps d'initialisation ne semble pas liée à la zone choisie. Pour le RTK, la valeur moyenne du temps d'initialisation est de 27,6 s, très proche de celle du NRTK. Il n'apparaît aucune liaison entre temps d'initialisation et distance à la station émettrice RTK.

En conclusion, le mode NRTK ne semble pas apporter de réelle amélioration au niveau du temps d'initialisation par rapport au mode RTK classique.

## Conclusion

Après avoir explicité le fonctionnement du mode de positionnement RTK, nous avons présenté dans cet article les principes et les intérêts du

Point	Nombre de tests	Temps d'initialisation (secondes)					
		RTK			NRTK		
		Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.
Z1R (13 km)	14	15	48	27,4	16	54	29,8
Z2R (28 km)	14	12	48	23,3	15	55	23,6
Z3R (44 km)	13	21	47	31,3	21	44	30,4
Z4R (59 km)	12	14	52	28,4	15	50	25,9

Tableau 2. Valeurs des temps d'initialisation RTK et NRTK sur les points ruraux.



positionnement RTK Réseau (NRTK) ainsi que les 3 solutions techniques (FKP, VRS et MAC) exploitées en France par des opérateurs privés pour fournir des services de positionnement temps réel.

L'objectif principal de notre campagne d'observation est de comparer le mode RTK classique, réalisé à partir de la station CHPH, et le mode NRTK dans le réseau TERIA, en termes de précision interne et totale.

Nous avons montré que les répétitivités en RTK et NRTK étaient très similaires et de l'ordre de 1 cm en planimétrie et altimétrie, quel que soit l'éloignement à la station émettrice RTK.

L'analyse des précisions par rapport aux coordonnées de référence montre que la précision du NRTK dans le réseau TERIA est en moyenne de 1,2 cm en planimétrie et 1,7 cm en altimétrie. En comparaison, la précision du RTK est en général moins bonne, avec une nette dégradation lorsqu'on s'éloigne de la station de référence CHPH.

Pour les temps d'initialisation, ils apparaissent quasiment identiques et de l'ordre d'une trentaine de secondes aussi bien pour le RTK que le NRTK et ce, quelle que soit la zone d'étude. Ce résultat est surprenant car en RTK on pourrait s'attendre à une augmentation du temps d'initialisation avec la distance à la station émettrice, du fait de la décorrélation des erreurs spatialement corrélées. Ce résultat peut s'expliquer d'une part par les bonnes conditions météorologiques que nous avons rencontrées au cours de nos tests (faibles différences de conditions météorologiques sur la région étudiée) et d'autre part, par une faible activité ionosphérique au moment des mesures. Nous nous trouvions en effet au mois de mars 2008 dans une période encore calme du cycle d'activité solaire, principal responsable du contenu électronique de la ionosphère.

Il convient pour finir de rappeler que les résultats obtenus au cours de cette campagne ne représentent qu'un état des performances des modes RTK et NRTK TERIA dans une région particulière et sur une période très courte (2 jours).

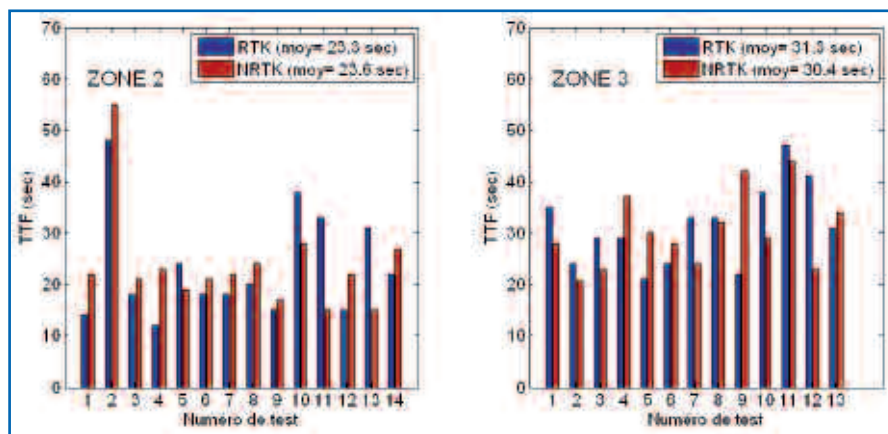


Figure 6. Temps d'initialisation du positionnement NRTK et RTK en zones 2 et 3.

Notre objectif est bien entendu de reproduire cette étude, sur différents réseaux, en différents lieux géographiques et à différents temps, afin d'affiner notre connaissance des performances des réseaux temps réel français. ●

## Remerciements

Cette étude, conduite par le laboratoire L2G de l'ESGT, n'aurait pu avoir lieu sans le concours et l'aide précieuse de différents acteurs que nous tenons à remercier tout particulièrement :

- La société Exagone, gestionnaire du réseau TERIA, et plus particulièrement Daniel Jouannet son Président et Patrick Di Renzo son directeur commercial ;
- Daniel Ganieux, pour son aide technique dans la mise en œuvre des accès aux données TERIA ;
- La société Leica Geosystems, et plus particulièrement Farouk Kadded, responsable support technique, pour le prêt de récepteurs GNSS ;
- L'Ordre des Géomètres-Experts, par l'intermédiaire d'Anne Fantuzzi, pour la mise à disposition d'abonnements TERIA.

## Contacts

### Stéphane DURAND

ESGT - Laboratoire de Géodésie et Géomatique (L2G)  
stephane.durand@esgt.cnam.fr

### Laurent MOREL

ESGT - Laboratoire de Géodésie et Géomatique (L2G)  
laurent.morel@esgt.cnam.fr

## Bibliographie

[1] Morel L. et Durand S., *Comparaison du positionnement temps réel classique RTK et du positionnement GPS temps réel réseau Mise en œuvre dans le réseau ORPHEON*, Revue XYZ, n° 115, pp 29-38, 2<sup>e</sup> trimestre 2008.

[2] Straub Luc, *Etude de Lél@, premier réseau GNSS permanent de l'île de la Réunion*, Projet de Fin d'Etude INSA Strasbourg, 2008.

## ABSTRACT

Nowadays, three french permanent GPS networks providing real-time positioning services are available: TERIA, Orphéon and S@t-info. Computation strategies are either in Real Time Kinematics (RTK) or GPS Network RTK (NRTK). In a first part, a brief overview of their principles is presented. The results of a campaign which uses both methods for precise positioning in the TERIA network come next. Their consistencies has been assessed w.r.t. the distance from the reference station (critical for classical RTK positioning). This parameter has been increased from 10 km up to 50 km with the same data in each case. Results, in terms of positions, are in the national RGF93 frame and their accuracy performed by comparing them to postprocessed positions. The main result is a repeatability of the NRTK method at least as good as classical RTK one: ~2cm for both horizontal and vertical components. Expressed in the RGF93, our results indicate an accuracy of ~1.5 cm for NRTK while classical RTK accuracy depends on the distance from the base station. Initialization times are similar with the two methods and close to 30 seconds.

# Thermographie aérienne des villes

## Mythes et réalités

■ Jean-Baptiste HENRY - Sylvain PIERRARD - Pascal RIDOUX

*La thermographie infrarouge par voie aérienne pour l'évaluation des pertes thermiques des parcs immobiliers connaît un essor important depuis quelques années, sous l'impulsion des incitations aux réductions de consommation d'énergie issues d'initiatives comme les Agenda 21 ou les résolutions du Grenelle de l'Environnement.*

*La forte médiatisation de ce type d'opération a conduit parfois à survendre les capacités de la technique à une société civile soucieuse de réduire son impact sur l'environnement. L'objectif de cet article est de replacer la thermographie aérienne dans son contexte scientifique et technique pour mieux préciser ce qu'il est possible d'en attendre et comment en exploiter au mieux les résultats.*

### MOTS-CLÉS

thermographie  
infrarouge, bâtiment,  
déperditions  
thermiques

### Introduction : ce que l'on voudrait connaître

La mise en œuvre de "Plan Climat", d'Agenda 21 ou plus simplement la volonté de pouvoir disposer d'outils d'évaluation pour une meilleure distribution de la subvention publique a conduit les collectivités territoriales à mener des opérations de thermographie aérienne pour mieux connaître leurs parcs immobiliers et approcher plus particulièrement leurs niveaux de déperditions thermiques.

L'objectif des donneurs d'ordre au travers d'une opération de thermographie aérienne est d'obtenir une mesure des déperditions thermiques globales des toitures, seul élément de bâtiment visible. On s'intéresse plus particulièrement aux déperditions à travers les parois représentées par le coefficient de transmission thermique U, quantité fonction de la résistance thermique des composants des toitures. Ce coefficient quantifie la chaleur traversant une surface unitaire d'un mètre carré pendant une seconde, lorsque la différence de température de l'air de part et d'autre de cette surface est de 1 °C.

La forte médiatisation de ce type d'opération a conduit parfois à survendre les capacités de la technique à une société civile soucieuse de réduire son impact sur l'environnement. L'objectif de cet article est de replacer la thermographie aérienne dans son contexte scientifique et technique pour mieux préciser ce qu'il est possible d'en attendre et comment en exploiter au mieux les résultats.

### Ce que l'on peut connaître... ou pas

Le coefficient U n'est pas accessible par mesure directe car il s'agit en fait d'un calcul dont les paramètres sont en grande partie inaccessibles par principe à la thermographie, comme à la télédétection en général. De même la température des toitures est délicate à approcher car les principales grandeurs d'influence (telles que l'émissivité, l'humidité de l'air ou les coefficients de transmission) pour la calculer sont mal estimées. Elle est finalement déterminée avec une erreur trop importante pour être d'un quelconque intérêt.

La luminance reçue par le détecteur peut en première approximation être considérée comme proportionnelle au

flux radiatif perdu par la toiture. Ce flux mesuré par thermographie ne permet pas de quantifier les déperditions dans leur ensemble mais d'établir une classification entre les déperditions radiatives par les toitures des bâtiments. La thermographie aérienne permet de s'intéresser à l'identification et à la localisation de défauts d'isolation tels que des glissements de laine de verre ou un défaut d'étanchéité majeur. Ces défauts sont généralement difficiles à détecter par les moyens au sol.

Lors de la phase de publication des résultats et de communication vers le public, il est capital de ne pas se livrer à une interprétation a priori des images. En effet, sans connaissances de l'aménagement du bâtiment, la figure 1 illustre qu'à niveau équivalent de déperdition les contributions des trois modes de transfert varient très fortement :

- (a) Le bâtiment est isolé sous comble et chauffé de façon homogène. Les déperditions se répartissent à proportions égales entre rayonnement, convection et ventilation.
- (b) Le bâtiment présente des combles perdus et est isolé par la dalle. Les combles ne sont pas chauffés. Les pertes par ventilation sont alors prépondérantes, le rayonnement et la convection réduits à égales contributions.
- (c) Le bâtiment a un toit plat. Les pertes par ventilation sont faibles, le rayonnement et la convection se répartissent à parts égales.

Ainsi, les interprétations consistant à déclarer trop chauffé ou mal isolé un bâtiment apparaissant très émissif dans l'image sont simplistes et potentiellement erronées. Il est absolument indispensable que l'interprétation particulière sur un bâtiment se fasse en compagnie



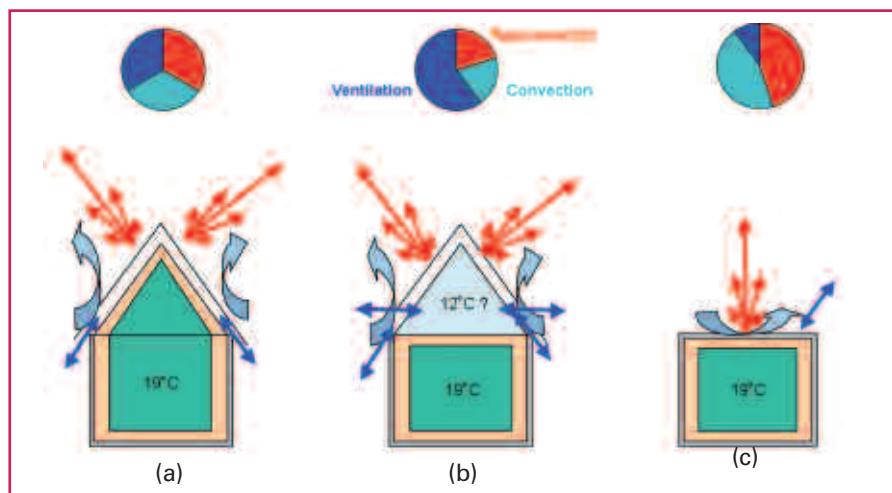


Figure 1. Trois typologies de bâti et structure correspondante des déperditions thermiques



de personnes le connaissant suffisamment pour procéder à une lecture raisonnable de l'image.

La thermographie aérienne permet d'accéder à des informations sur la toiture mais ne permet pas de disposer d'une mesure significative des déperditions par les façades. Tout d'abord parce que l'émissivité est dépendante de l'angle de vue, qui est favorable sur les toits mais très défavorable sur les éléments verticaux que sont les façades (figure 2). De plus, une façade comporte de nombreux éléments aux émissivités variées tels que les huisseries, les fenêtres ou les différents types de revêtement. La réponse thermique d'une façade est donc fortement composite. Enfin, les différences d'inertie thermique des maçonneries (brique, parpaing, pierre, murs-rideaux...) influent considérablement sur les instants où sont atteints les extrêmes et sur leur amplitude. Ces derniers phénomènes sont regroupés sous les termes d'amortissement et de déphasage.

D'autre part, la thermographie infrarouge, tout comme la télédétection dans d'autres bandes spectrales, ne permet pas d'accéder à d'éventuelles "anomalies environnementales" ou pollution des sols par des métaux lourds ou hydrocarbures. Les résultats scientifiques sur le sujet sont issus d'études menées en laboratoire (Gaft et al., 2002 ; Laville et al., 2006), dans des conditions fort éloignées de celles rencontrées par les capteurs embarqués sur des vecteurs aéroportés.

## Le prix de la connaissance

L'utilisation d'un capteur aux caractéristiques radiométriques et géométriques parfaitement connues, et d'un système de positionnement GPS complété d'une centrale inertielle, permet de localiser chaque acquisition avec une précision totale décimétrique. Une

modélisation mathématique rigoureuse du capteur est un préalable indispensable à une orthorectification des images, permettant la bonne localisation de l'information thermique à une résolution variant de 30 à 50 cm, selon l'altitude de vol (environ 500 m au-dessus du sol). Le travail à des résolutions spatiales plus élevées (pixel inférieur à 30 cm au sol) ne présente pas d'intérêt particulier compte tenu des formes et des échelles de rendu généralement adoptées pour la communication vers le public. La production d'une orthomosaïque thermique est une garantie de qualité et de cohérence de l'ensemble des traitements appliqués sur la zone couverte, en rapport notamment avec l'ajustage des images et les corrections d'ambiance.

L'accès à des valeurs indicatives des pertes thermiques des bâtiments se fait au prix de certaines hypothèses simplificatrices, qui rendent possible l'acquisition de données par télédétection aéroportée. La classification des déper-

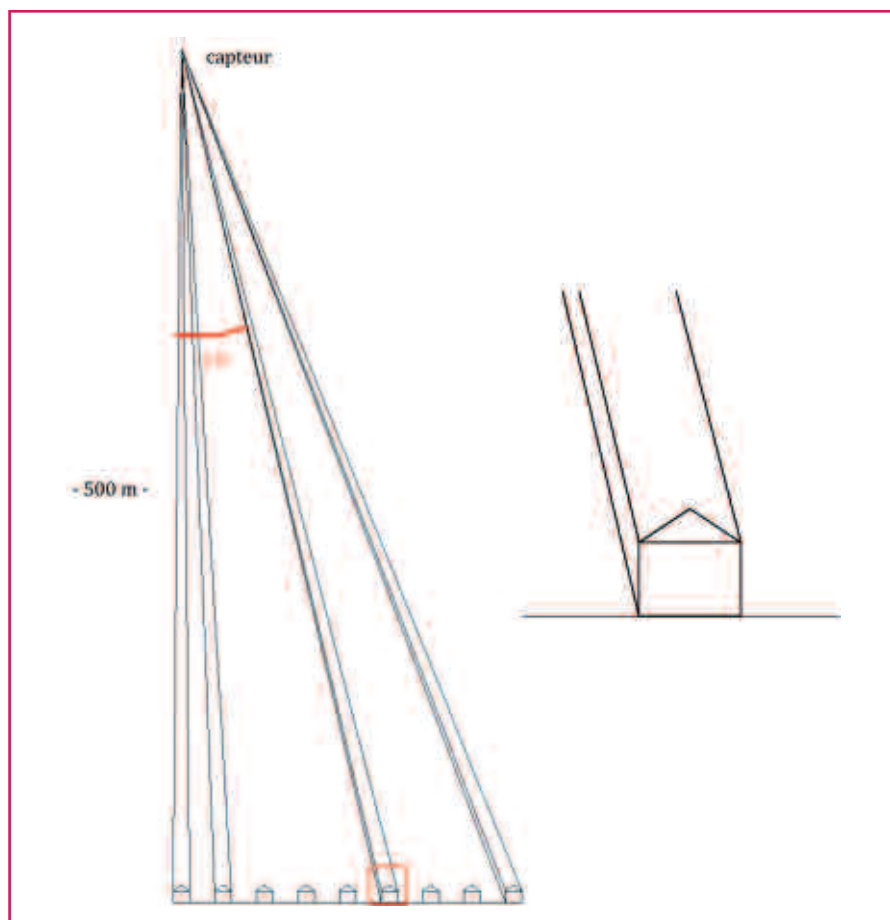


Figure 2. Représentation à l'échelle de la géométrie de l'acquisition de l'information sur un bâtiment d'environ 10 mètres de haut.



ditions doit poursuivre l'objectif d'être robuste dans le temps et l'espace. Cela signifie qu'il faut tenter de s'affranchir de la variation temporelle des déperditions (la phase d'acquisition dure plusieurs heures, éventuellement sur plusieurs jours, les capteurs dérivent...) et les variations de conditions de températures sur la superficie de la ville sont significatives. C'est pourquoi, nous proposons quelques hypothèses assez strictes :

1. Les déperditions par convection sont en régime établi ;
2. Les déperditions passent effectivement par la couverture (transmission au travers des composants de la toiture) ;
3. Les toitures sont lambertiennes aux longueurs d'ondes utilisées (i.e. même luminance rayonnée dans toutes les directions) ;
4. Le régime thermique est établi (bâtiment et conditions aux limites).

*L'hypothèse 1* est vraie tant que le vent (duquel dépend fortement le coefficient d'échange par convection) est faible voire nul. Ainsi, il y a peu ou pas d'effet de masque, de venturi et les variations du coefficient d'échange par convection sont faibles pendant la durée des acquisitions, et approximativement constants, au regard des échanges par rayonnement.

*L'hypothèse 2* dit simplement que les déperditions par infiltration-ventilation ne sont pas quantifiées. Aussi, la classification n'aura pas de sens pour les locaux fortement ventilés. L'exploitation et l'interprétation des images doivent en tenir compte.

*L'hypothèse 3* est régulièrement admise pour bon nombre de matériaux classiques du bâtiment vus sous des incidences inférieures à 45°.

*L'hypothèse 4* n'est jamais rigoureusement vérifiée car complètement dépendante du scénario d'occupation/chauffage des bâtiments. La toiture des bâtiments individuels, du fait de leur faible inertie thermique, est assez facilement en régime établi pour peu que les températures intérieures et extérieures varient peu. Dans ces conditions, les déperditions par rayonnement permettent de comparer les

déperditions globales de deux toitures différentes sans pour autant conclure quant à la qualité de leur isolation. Les acquisitions au lever du soleil, lorsque la demande en chauffage est la plus forte, sont donc moins favorables car c'est précisément le moment où les températures extérieures et intérieures varient le plus.

Dans de telles conditions, l'utilisation de la thermographie aérienne comme moyen de comparaison des bâtiments est acceptable pour les municipalités demandeuses d'information. La thermographie n'a pas vocation à fournir de mesures absolues de déperditions mais bien une classification qui permet de définir des priorités dans l'action politique.

## Quel bilan pour la thermographie aérienne de villes ?

Il faut concevoir la thermographie comme un outil au service de la compréhension du fonctionnement général du bâtiment et de son état. L'interprétation de l'image doit être confiée à un expert formé à la compréhension des images infrarouges. Ce travail est notamment réalisé par les conseillers info énergie qui s'appuient sur la description du bâtiment pour analyser et comprendre la thermographie, information qui leur permet alors d'affiner la connaissance du comportement du bâtiment.

Il importe également que les compétences présentes dans les services techniques des collectivités soient pleinement valorisées dans ce type d'opérations. En effet, les services SIG et bâtiment sont trop souvent oubliés par les services de la communication ou du développement durable alors qu'ils possèdent l'expertise nécessaire à la bonne spécification des besoins comme à l'évaluation des propositions et des rendus.

Les retours d'expérience de la part des collectivités s'étant engagées dans une démarche de diagnostic par thermographie sont rares ou systématiquement positifs. C'est le principal écueil à l'établissement d'une méthode fiable, car il faut comprendre les réticences :

quel maître d'ouvrage ayant engagé des sommes importantes, ayant sollicité les lumières des médias pourra se permettre de s'avouer déçu par une prestation qu'il a lui-même choisie ? L'expérience la plus significative se constitue lors des formations des personnels des services techniques qui confrontent ce qu'ils savent de leurs bâtiments avec ce que leur apprend la thermographie.

On peut néanmoins tirer quelques grandes règles concernant les limites du diagnostic thermographique au service du diagnostic thermique. Il est évident de constater que la thermographie des toitures ne présente aucun intérêt pour des logements collectifs de plusieurs étages. Ces logements proposent, à partir de R+3 globalement, des surfaces de façades largement supérieures à la surface de toiture, des équipements en toiture qui masquent en grande partie les déperditions par l'enveloppe, etc... pour cette typologie de bâtiment, le diagnostic au sol reste le seul moyen d'accéder à une information pertinente au regard de la structure du bâtiment.

Comme dit précédemment, la constitution du niveau directement sous toiture peut s'avérer rédhibitoire à l'emploi de la thermographie : un comble non isolé et fortement ventilé apparaîtra comme bien isolé au regard du capteur. La thermographie ne "visualise" que les déperditions par rayonnement ; la prise en compte de la convection est simplifiée et les pertes par infiltrations / exfiltrations sont simplement ignorées.

Certaines vertus attribuées à la thermographie ne font pas l'unanimité chez les professionnels et l'absence de certification des opérateurs sous une quelconque forme constitue une lacune patente pour garantir le niveau des prestations. Le seul terme de thermographie n'est donc pas suffisant pour définir la méthode car si la simple "photographie thermique" est utile pour analyser des phénomènes locaux à l'échelle d'une toiture, elle demeure insuffisante pour établir une classification globale et pertinente d'un parc immobilier dans son ensemble. La thermographie aérienne demeure un outil valable d'alerte et de sensibilisation des





populations à la problématique des économies d'énergie mais elle est une opération à forte technicité et ne peut être réduite à la seule communication qui doit l'accompagner. Cette prestation mérite donc l'intérêt d'une large communauté d'utilisateurs au sein des services techniques et doit faire partie d'une démarche globale en faveur de la réduction des consommations énergétiques. ●

## Contact

### Jean-Baptiste HENRY

ingénieur topographe ENSAIS et docteur en géographie physique, est chef de projet "Information géographique" au département Télédétection du LNE.  
Jean-Baptiste.Henry@lne.fr

### Sylvain PIERRARD

ingénieur thermicien, est chef de projet "Intégration de systèmes" au département Télédétection du LNE.

### Pascal RIDOUX

docteur en physique spécialité échanges thermiques, est responsable

du département Télédétection du LNE.

## Références

**Gaft M., Seigel H., Panczer G., Reisfled R., 2002, Laser-induced time-resolved luminescence spectroscopy of Pb<sup>2+</sup> in minerals**, European journal of mineralogy, Vol. 14 (6), pp. 1041-1048.

**Laville S., Vidal F., Chaker M., Sabsabi M., 2006, Laser-induced breakdown spectroscopy : Investigation of Pb resonant excitation and decay paths**, Proceedings of SPIE, International Society for Optical Engineering, International Conference on Applications

**Le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE)** est un laboratoire de référence en métrologie, un organisme de formation et un centre de R&D. Il est à l'origine du développement méthodologique de la thermographie aérienne en France depuis la fin des années 1970, tant sur les applications de cartographie de déperditions thermiques du bâtiment que sur d'autres applications environnementales telles que le rejet de centrales électriques, détection de pollution marine (systèmes POLMAR des douanes françaises), suivi de l'auto-combustion de terriils...

of Photonic Technology No8, Quebec PQ, Canada, Vol. 6343 (2), pp. 634321.1-634321.8.

**Pierrard S., 2007, La thermographie aérienne appliquée aux diagnostics de toiture. Possibilités et limites**, Thermogram'2007, Première journée nationale de thermographie du bâtiment, Châlons-en-Champagne, pp. 111-128.

## ABSTRACT

**Key words:** infrared thermography, buildings, thermal losses

*Aerial infrared thermography to evaluate heat losses of dwellings has recently met an important success in France, partly because of different governmental initiatives to make citizens aware of their own energy consumption and their personal environmental responsibility. Strong media coverage tends to oversell the actual capabilities of the technique. This paper aims at replacing aerial thermography within its scientific and technical backgrounds to better understand what is possible and how to use its results.*

### 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*



# Intégration de l'analyse multidimensionnelle dans la gestion d'un réseau d'auscultation géométrique

■ Aïcha DERKAoui - Boualem GHEZALI

*Le présent article illustre l'intérêt de l'outil statistique d'analyse multidimensionnelle des données issues de la mise en place d'un canevas géodésique destiné aux études d'auscultation d'ouvrages d'art ou de sites industriels.*

*La gestion des données variant dans le temps et d'un volume important, repose sur le concept DataWarehouse. Il s'agit d'une collection de données orientées sujet, intégrées, non volatiles, historisées, et organisées comme support d'un processus d'aide à la décision. L'outil d'analyse multidimensionnelle utilisé est le système OLAP (Online Analytical Processing) qui a l'avantage d'analyser l'information facilement et rapidement. L'application porte sur la gestion et l'analyse du réseau d'auscultation de six bacs de stockage du complexe GP 1/Z de la Sonatrach.*

## MOTS-CLÉS

Réseau géodésique, auscultation, multidimensionnel, DataWarehouse, OLAP

La structuration et l'exploitation d'une quantité importante de données dynamiques rendent nécessaire, voire indispensable, de disposer d'outils d'intégration permettant l'accessibilité, la manipulation et l'analyse multidimensionnelle des informations. A cette fin, le concept d'entrepôt de données proposé est la collection d'informations orientées sujet, intégrées, non volatiles et historisées, et organisées comme support d'un processus d'aide à la décision. (W.H. Inmon 1995, Prism. Volume 1). L'analyse de cette définition point par point montre l'intérêt de cette technique par rapport à la gestion des données.

Si les DataWarehouses ou les DataMarts sont les lieux de stockage des données analytiques, le système OLAP permet aux applications clientes d'y accéder efficacement et présente de nombreux avantages pour les utilisateurs analytiques, notamment :

- un modèle de données multidimensionnel intuitif qui permet de sélectionner, de parcourir et de maîtriser plus facilement les données ;

- un langage de requête analytique puissant qui permet d'explorer les relations complexes entre les données de l'entreprise ;
- le pré-calcul des données fréquemment interrogées permettant d'accélérer le temps de réponse pour les requêtes concernées.

Le travail présenté à travers cet article consiste à l'intégration de l'analyse multidimensionnelle dans la gestion d'un réseau d'auscultation qui comporte trois grandes étapes.

## Inventaire des données

L'application porte sur le réseau d'auscultation géométrique du site industriel représenté par six bacs aériens de stockage de gaz liquéfié du complexe GP1/Z d'Arzew (Sonatrach). L'opération a été étalée sur deux campagnes d'observations spatiales (GPS) et terrestres, espacées de deux ans.

## Présentation du réseau d'auscultation

Le réseau d'auscultation géométrique des bacs de stockage est composé d'un (figure 1) :

- **Réseau de base** (référence) ou réseau de garde, constitué de deux points géodésiques (BD09 et BC12) supposés stables, qui sert d'ossature pour tous les travaux ultérieurs réalisés dans le cadre de l'auscultation géométrique des bacs.
- **Réseau d'auscultation** appuyé sur le réseau de base constitué de 24 bornes bien réparties.



Figure 1. Schéma de la configuration du canevas d'auscultation.

- **Réseau de cibles** distribuées de façon homogène (maillage approprié) et matérialisées sur l'ouvrage et sur son voisinage immédiat. Il est composé de 23 cibles collées sur le couronnement de chaque bac et de deux cibles supplémentaires placées sur la plate-forme extérieure.

### ■ Observations et traitements

Plusieurs opérations d'observations et de traitements sont réalisées pour le suivi de l'évolution des bacs et de leurs voisinages :

- **Opération 0 (époque T<sub>0</sub>)** : observation GPS et ajustement des coordonnées tridimensionnelles des points des réseaux d'auscultation et de cibles. Les positions de ces points par rapport au réseau de base constituent la configuration de référence.
- **Opération i (époque T<sub>i</sub>)** : détermination de la position des points des réseaux d'auscultation et de cibles à partir d'une nouvelle session d'observations et de traitements pour quantifier les déplacements des bacs et de leurs voisinages par rapport à la configuration de référence. La nouvelle configuration ainsi déterminée (opération i) sert de configuration de référence pour l'opération d'auscultation suivante (i+1). La fréquence d'intervention est définie en fonction de l'exploitation et varie selon l'amplitude des déformations, la vitesse de déplacement et par suite d'événements naturels (séisme, glissement de terrain...).

La méthodologie développée pour la mise en place du canevas d'auscultation est basée sur l'exploitation de mesures de :

- la phase des signaux GPS en modes statique et statique rapide,
- nivellement de précision,
- cheminements planimétriques,
- rattachements par intersections et rayonnements,
- intersections spatiales.

Les coordonnées des points de l'ensemble du réseau de cibles pour les deux phases, espacées d'une année, constituent les données de base pour l'évaluation des mouvements reposant sur la détermination des vecteurs de déplacement et des tenseurs de déformation. Les interprétations géodésiques s'effectuent suivant les tendances des déformations et des déplacements.

### Modélisation des données

La modélisation des données repose sur le concept d'entrepôt de données permettant d'intégrer et d'exploiter les données jugées pertinentes.

Un entrepôt de données est orienté sujet et doit permettre d'analyser des données suivant plusieurs dimensions, à la différence des bases de données relationnelles classiques. Il permet d'effectuer des traitements sur des données en prenant en compte plus de deux axes : les données ne sont pas modélisées sous forme tabulaire mais sous forme d'hyper-cubes (ou cube de données).

Les données utilisées, issues de deux opérations d'auscultation, pour la validation du modèle, sont celles du réseau de cibles.

Un sujet est défini par un ensemble de mesures et un ensemble de dimensions. Dans le cas étudié, les mesures du point correspondent aux coordonnées cartésiennes (X,Y,Z) et l'étude comme l'analyse reposent sur leurs valeurs numériques. Les dimensions sont : la période, le lieu et le type de coordonnées. Ce sont les points de vue depuis lesquels les mesures peuvent être calculées.

La dimension est la liste d'éléments organisés de façon hiérarchique : la granularité d'une dimension est son nombre de niveaux hiérarchiques. Pour la dimension période la hiérarchie est la suivante : année, mois et jour, soit trois niveaux. Les axes des dimensions doivent fournir des règles de calculs d'agrégat pour chaque mesure (figure 2).

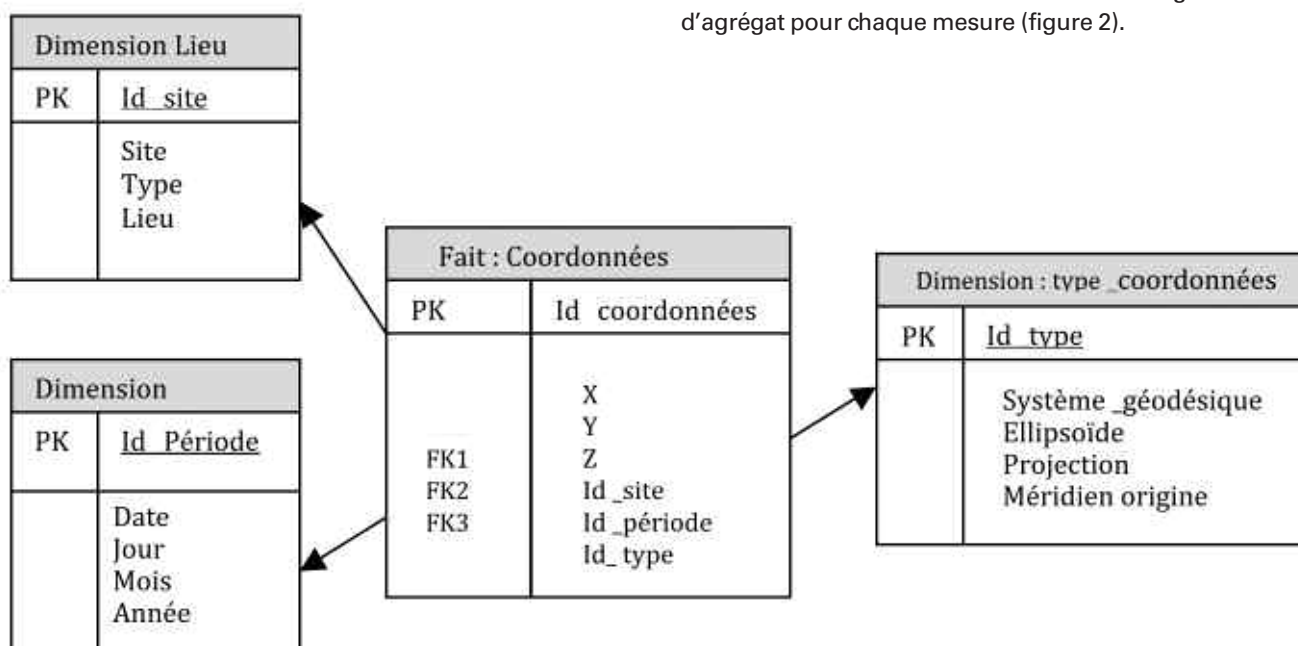
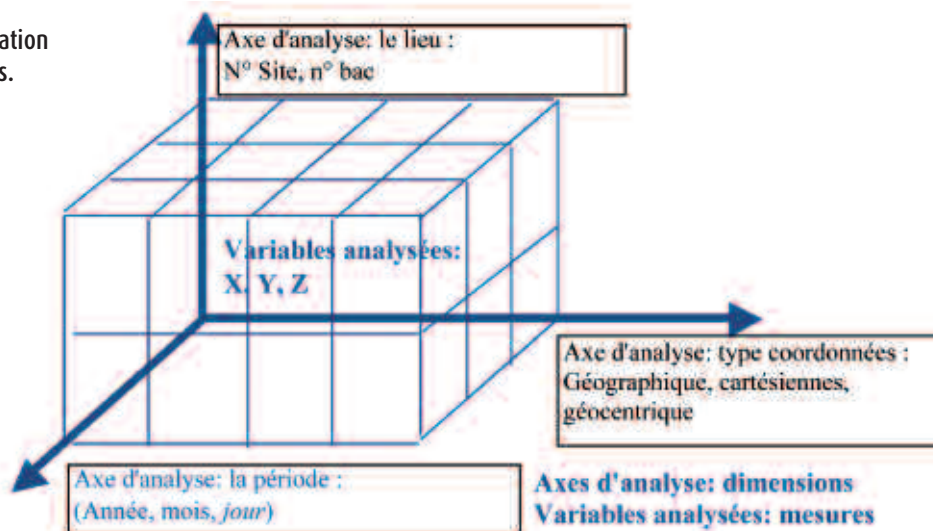


Figure 2. Modélisation de l'entrepôt à l'aide d'un schéma en étoile.

Figure 3. Représentation du cube de données.



Ces différents mécanismes permettent de placer les données dans des matrices multidimensionnelles de forme cubique (Figure 3). Les données sont interrogées directement et facilement sur n'importe quelle combinaison de dimensions, sans utiliser de requêtes trop complexes.

Passer d'une hiérarchie de dimension à une autre est réalisée facilement dans un cube de données par la technique de pivot, de rotation. Par cette technique, le cube peut être pivoté pour afficher différentes orientations des axes.

Les opérations slice et dice permettent respectivement d'extraire une tranche du cube et un sous-cube selon des prédicats sur les dimensions. Ces opérations sont illustrées respectivement par les figures 4 et 5.

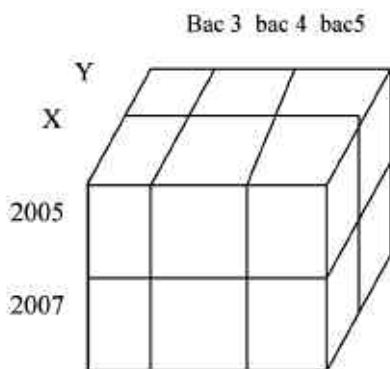


Figure 4. Opération dice, extraction d'un sous-cube.

	Bac 3	Bac 4	Bac 4	Bac 5	Bac 7	Bac 8
X						
Y						
Z						

Figure 5. Opération slice Coupe sur 2005.

D'autres opérations importantes sont possibles sur les bases de données multidimensionnelles : le roll-up et le drill-down. Ces deux opérations permettent de naviguer dans les hiérarchies de dimensions.

- **Le roll-up** : permet d'agréger les données suivant une dimension.
- **Le drill-down** : permet de faire le contraire, c'est-à-dire de détailler les données.

## Analyse de données

Il existe deux types d'analyse de données : le datamining (ou fouille de données) et l'analyse multidimensionnelle (OLAP).

**La fouille de données (datamining)**, appelé aussi Extraction de Connaissance (ECD), permet de mettre en évidence des corrélations éventuelles dans un volume important de données afin de dégager des tendances. Elle s'appuie sur des techniques d'intelligence artificielles ou sur des techniques statistiques afin de mettre des liens cachés entre les données et ainsi de prévoir des tendances (figure 6).

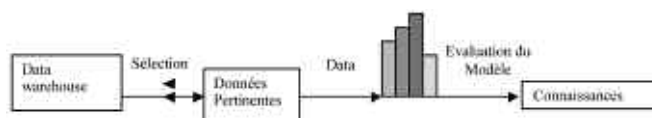


Figure 6. Processus d'extraction de connaissance.

Cette technique permet d'extraire les informations nécessaires (non triviales, implicites, non connues précédemment et potentiellement utiles).

Le résultat du modèle de mining dans le cube constitue une nouvelle dimension de ce cube, c'est une dimension virtuelle. Les données relatives au modèle de mining sont alors consultables à travers le cube virtuel regroupant le cube de départ et cette nouvelle dimension.

**Online Analytical processing (OLAP)**, c'est le terme qui désigne les bases de données multidimensionnelles destinées à l'analyse et il s'oppose au terme OLTP qui désigne les systèmes transactionnels.



	X	Y	Z
+ 3286	0,000	0,000	0,000
+ 3287	-0,001	-0,001	0,001
+ 3288	0,001	0,001	-0,001
+ 3289	-0,001	-0,001	-0,001
+ 3290	0,001	0,001	0,001
+ 3291	-0,001	-0,001	0,001
+ 3292	0,001	0,001	-0,001
+ 3293	-0,001	-0,001	-0,001
+ 3294	0,001	0,001	0,001
+ 3295	-0,001	-0,001	0,001
+ 3296	0,001	0,001	-0,001
+ 3297	-0,001	-0,001	-0,001
+ 3298	0,001	0,001	0,001
+ 3299	-0,001	-0,001	0,001
+ 3300	0,001	0,001	-0,001
+ 3301	-0,001	-0,001	-0,001
+ 3302	0,001	0,001	0,001
+ 3303	-0,001	-0,001	0,001
+ 3304	0,001	0,001	-0,001
+ 3305	-0,001	-0,001	-0,001

Figure 7. Extrait de la table des déplacements.

Le concept OLAP est appliqué au modèle virtuel de représentation de données (le Cube). Il existe ensuite plusieurs déclinaisons qui permettent d'adapter le stockage des données sur différents types de bases de données pour implémenter le concept OLAP :

**R-Olap** : technique de modélisation et de stockage des données basée sur une structure relationnelle.

**M-Olap** : un OLAP optimisé pour l'analyse multidimensionnelle.

**H-Olap** : est un hybride entre le R-olap et le M-Olap.

Le choix du M-Olap dans ce cadre est dû à ce que la base M-Olap est l'application physique du concept Olap qui convient le mieux à l'étude. Il s'agit réellement d'une structure multidimensionnelle et les bases M-Olap sont rapides et performantes et proposent des fonctionnalités particulièrement élevées.

La possibilité de création des membres calculés ; **définis à l'aide d'une combinaison de données de cube, d'opérateurs arithmétiques, de nombres et de fonctions**, dépendant des membres existants dans le cube ou aussi d'autres membres calculés définis, nous permet de faire des calculs assez facilement tel le calcul des déplacements en X,Y et Z et aussi de savoir sur quelle direction le déplacement est le plus important. La figure 7 illustre les données relatives aux déplacements.

Le cube Olap donne accès à des fonctions d'extraction de l'information (visualisation, analyse et traitement), et à des fonctions de requêtes en langage MDX.

Le langage MDX similaire au langage SQL pour les SGBD est un autre moyen d'interrogation du cube et permet d'exécuter des requêtes MDX simples ou complexes.

Le langage MDX offre la possibilité d'exécuter facilement des requêtes statistiques pour le calcul de la covariance et de la corrélation. En d'autres termes, il permet le calcul de la corrélation entre les données ou encore même d'ajouter des fonctions définies par l'utilisateur lui-même.

## Conclusion

Les entrepôts de données et leurs outils deviennent indispensables pour la structuration, l'exploitation et l'analyse multidimensionnelle d'une quantité importante de données dynamiques.

Le but de l'étude est la mise en place d'un processus permettant l'analyse et l'exploration du cube de données. L'entrepôt de données a été schématisé par un modèle en étoile. L'exploration de cet entrepôt a été effectuée par des opérateurs d'analyse OLAP.

L'application a été enrichie par la conception de cet entrepôt de données avec des outils offrant des possibilités d'analyse et d'exploration des cubes de données avancées et non supportées par les systèmes SGBD classiques. ●

## Contacts

Aicha DERKAOU, Boualem GHEZALI

Centre des Techniques Spatiales

Division de Géodésie Spatiale

BP 13, 31200 Arzew, Algérie.

derkaouia@hotmail.com

## Références

**BEDARD Y. (2002)** *Introduction aux systèmes SOLAP*. Cours sujet spécial. Centre de recherche en géomatique : Université de Laval.

**BEDARD Y & PROUX M-J. (2004)** *Comparaison de l'approche transactionnelle des SIG avec l'approche multidimensionnelle pour l'analyse de données spatio-temporelles*. Article : (colloque géomatique 2004).

**CARON P-Y. (1998)** *Etude du potentiel d'OLAP pour supporter l'analyse spatio-temporelle*. Mémoire de maîtrise. Département des sciences géomatiques, faculté de foresterie et géomatique : université LAVAL.

**KONNEN J. (2004)** *Couplage d'un ERP et d'un datawarehouse avec un SIG : le mariage d'un monde multidimensionnel avec la cartographie*. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme post grade en informatique et organisation : Université de LAUSANNE.

[Microsoft Corporation, 2000] : Microsoft SQL Server 2000 : Analysis Services Didaticiel.

**VERHAEGEN B. (2006)** *Requêtes OLAP sur une base de données XML native*. Mémoire de licence en informatique : Université Libre de Bruxelles. Belgique.

**ZIANI S. (2000)** *Auscultation topographique par technique GPS*. Mémoire d'ingénieur d'état en sciences géodésiques et travaux topographiques : Centre National des Techniques Spatiales. Algérie

## ABSTRACT

**Key words:** Geodetic network, auscultation, multi-dimensional, DataWarehouse, OLAP.

*The present paper illustrates the statistical tool interest of multi-dimensional data analysis data issued from the setting up of geodetic canvas intended to auscultation studies of art or industrial sites.*

*The management of data varying in the time and important volume, rests on the DataWarehouse concept. It is about data collection oriented topic, integrated, non volatile, historized, and organized like support of a help process to the decision. The tool of multi-dimensional analysis used is the OLAP system (Online Analytical Processing) that has the advantage to analyze information easily and quickly.*

*The application is about the management and the network auscultation analysis of six storage tanks of the Sonatrach complex GP1/Z.*

# Historique de la géomatique et des Systèmes d'Information Géographique (SIG)

■ Paul COURBON

*Cet essai fait suite aux quatre articles parus dans les n°110 à 113 d'XYZ qui retraçaient cinquante ans d'évolution topographique. Comme l'a écrit Jean-Pierre Maillard, ils s'intègrent dans un devoir de mémoire. Ici, il ne s'agit plus de topographie pure, mais sans doute, de l'application majeure de la topographie. Bien que le développement des SIG soit déjà bien avancé, il fera encore l'objet de grands progrès dans les années à venir. En ce qui concerne la topographie pure, Michel Kasser laissait pressentir que nous étions arrivés près du sommet de la courbe de la révolution technique, ne laissant entrevoir que des améliorations ou perfectionnement des outils existants. Par contre avec les progrès incessants de l'informatique et de ses capacités de mémoires, les applications de la topographie vont certainement connaître encore des évolutions très importantes. En ce qui concerne les SIG, nous entrons aujourd'hui dans la phase de développement des troisièmes et quatrièmes dimensions, qui mérite un état des lieux "2008".*

## La géomatique

Pour Laurent Polidori, c'est "un terme récent qui regroupe un ensemble de techniques géographiques, souvent anciennes et développées séparément, auxquelles une mise en œuvre numérique permet de cohabiter dans un environnement informatisé".

D'une manière plus précise, la géomatique regroupe l'ensemble des outils et méthodes permettant de collecter, d'intégrer, de représenter et d'analyser des données localisées dans un cadre géographique. Elle collecte dans ce but des données graphiques et alphanumériques géoréférencées qu'elle traite pour les gérer et les lier entre elles d'une manière logique qui permettra de les analyser et de les exploiter au mieux. Elle les met ensuite en forme pour une bonne visualisation et étudie éventuellement comment les diffuser.

Le traitement de toutes ces données peut être effectué par un logiciel spécialisé appelé Système d'Information Géographique (SIG en Français, GIS en Anglais).

## ■ Récriminations d'un francophone

Le terme Géomatique m'amène à une réflexion qui sort peut-être du sujet, mais qu'il me tient à cœur d'exprimer. Il y eut une époque où la France était bien présente dans l'industrie informatique. Je renvoie les lecteurs à l'XYZ n°112 où l'on parle de Bull et où ils verront que le Micral, premier micro-ordinateur, fut imaginé par le Français Gernelle en 1973. Malheureusement, comme dans d'autres pays européens, les bons choix ne furent pas faits et la puissance novatrice et financière américaine submergea tout. Cependant, les théoriciens français s'étaient penchés sur cette discipline naissante pour créer une terminologie réfléchie et logique. C'est ainsi que l'on vit apparaître les mots "informatique, ordinateur, logiciel, géomatique, etc", beaucoup plus précis et, pour une fois, souvent plus concis que les termes anglais. Le terme anglais "computer", par exemple, manque de la précision donnée par le terme "ordinateur"; ne parlons pas du terme "informatique" et de sa traduction anglaise. Que penser de software dont la traduction littérale pourrait donner "quincaillerie douce" ou "ustensile doux", rien à voir avec la justesse de "logiciel"! On a parfois laissé les techniciens américains créer un jargon ayant plus de rapport avec le slang qu'avec leur langue qui, comme le français, sait faire appel aux racines grecques ou latines dès qu'elle veut exprimer un terme élaboré.

Aussi, je réagis mal quand dans un article écrit par un français dans une revue française, je vois apparaître des sigles ou mots américains alors que le terme français correspondant existe. Bien sûr, les échanges internationaux exigent maintenant une codification du langage, mais doit subsister un respect de notre langue, quitte à rappeler le mot anglais entre parenthèses.

## Le début des Systèmes d'Information Géographiques (SIG)

Ce terme a été créé après que l'informatique ait accompli diverses étapes permettant l'arrivée des outils de gestion de bases de données et des outils de dessin assisté par ordinateur (DAO).

Pourtant, sans cette dénomination spécifique, le principe existait depuis longtemps. Sans faire appel à l'Antiquité, comme certains l'ont fait, je citerai simplement les répertoires géodésiques ou de nivellement de l'IGN des années 1950. Le répertoire comprenait une carte sur laquelle étaient représentés des points géodésiques ou des repères de nivellement. Plus loin, on retrouvait des fiches associées où figuraient toutes les données qui complétaient la représentation cartographique du point : matricule, coordonnées, altitude, description, croquis, année d'observation, itinéraire d'accès, etc. Il en est de même pour le cadastre qui constituait dès sa conception en 1807, une véritable base de données géographiques où la représentation graphique de la parcelle est complétée par des tables attributaires (matrice, état de section...). C'était déjà, mais sur support papier, ce qui, avec l'informatique, a généré le SIG !



Répertoire de nivellement sous sa forme actuelle, téléchargeable sur Internet. Malgré l'informatique, le principe est resté le même : une fiche sur le repère est associée à la carte où il est positionné.

### ■ Les prémices

La gestation des SIG dépendant de l'informatique, elle ne pouvait aller plus vite et ses progrès décisifs ne vinrent qu'avec ceux de cette dernière discipline. Je renvoie le lecteur au XYZ n°112 dans lequel je décrivais la naissance et l'évolution de l'informatique. Le premier prototype d'écran comme périphérique de sortie fut conçu en 1963, la première carte graphique couleur en 1973 avec le prototype Alto de Xerox. Mais la généralisation des logiciels graphiques interactifs n'arriva qu'avec l'éclosion et le développement des micro-ordinateurs début 1980, puis surtout avec l'apparition de l'Apple Macintosh en avril 1984 et de Microsoft Windows 1.0 en novembre 1985, tous deux utilisables avec une souris. Les logiciels de gestion de données standardisés arrivèrent à la même époque. Rappelons que le premier Macintosh sorti en 1984 valait 2500 dollars aux Etats-Unis, soit 25000 francs en France, 7500 € d'aujourd'hui en tenant compte de l'érosion monétaire !

On fait souvent référence aux Etats-Unis pour tout ce qui concerne les avancées technologiques modernes. S'il est vrai que dès 1965, le "Bureau of the budget" américain inventoriait des applications pour l'aménagement du territoire, en France dès 1969, le Ministère de l'Équipement commandait une réflexion pour la constitution d'un modèle de Banque de Données Urbaines (BDU).

La même année 1969, un chercheur de Harvard créait l'ESRI (Environmental System Research Institute), au départ association à but non lucratif engagée dans un conseil en environnement, mais qui aura plus tard un rôle important dans le développement des SIG. En 1970, puis en 1972, se déroulent à Ottawa les deux premières conférences abordant explicitement le thème de la gestion des données géographiques. Au début, faute de pouvoir exploiter une composante de visualisation graphique non encore au point, on s'orienta vers la constitution de banques de données. En France, dès 1971, la Direction Générale des Impôts (DGI) commence le fichier FINATO qui devient ensuite le répertoire informatique des voies et lieux-dits. En 1973, la même administration se lance dans la numérisation du plan parcellaire de Paris et du cadastre de plusieurs grandes villes. Il était prévu d'associer ces deux tâches à un répertoire géographique urbain (RGU) et des parcelles (RGP). Mis en œuvre par l'INSEE pour les recensements de 1974 et 1982, ils se montreront peu convainquants, grevés par leur aspect pionnier nécessitant de nombreuses améliorations et mises au point. Il faut dire qu'à cette époque de recherche, les logiciels, "faits maison" par des chercheurs isolés, ne correspondaient pas à un modèle général d'échange qui aurait facilité leur utilisation.

Il faut signaler, aussi, les BDU de Lille et Marseille entreprises dès 1971, la seconde avec la Société d'Economie Mixte ICOREM. Nous en reparlerons plus tard avec l'utilisation des SIG dans les communes françaises et verrons le rôle pionnier de la ville de Marseille.

Mais au départ, nous n'avions qu'une gestion descriptive d'objets, sous forme de lignes, faite par des Systèmes de Gestion de Bases de Données (SGDB) propriétaires. Nous n'en étions pas encore à la liaison de tous ces attributs avec un objet géographique. De plus, durant cette période de recherche, il n'y avait pas encore de standardisations des données ni des systèmes d'exploitation, elles n'arrivèrent qu'au début des années 1980.

### ■ L'arrivée de la composante graphique en informatique

Nous avons vu que l'apparition du premier écran comme périphérique de sortie ne se fit qu'à la fin des années 1960 ; mais sur les photos d'ordinateurs de l'époque, on ne voit sur ces premiers écrans que des informations alphanumériques ! Petit à petit, apparaissent des programmes de dessin se limitant au début à des représentations simples : semis de points avec chiffrage, vecteurs, parcellaires, cotes des contours de la parcelle, profils. Autocad apparut sur MS/DOS en 1982-83, tout d'abord destiné au dessin industriel. Mais il fallut attendre 1985 et l'apparition de Windows avec interface graphique pour voir les logiciels de dessin exprimer toutes leurs possibilités.

Entre-temps, ESRI a pris de l'importance, développant des outils d'application utilisables sur un environnement informatique et faisant de l'analyse d'informations géographiques pour la ville de Baltimore ou pour la compagnie Mobil Oil. Travaillant au début sur des données graphiques cellulaires, la société s'oriente sur les données vecteurs en 1975. En 1981





et 1982 la société tient ses premières conférences des usagers, lançant cette dernière année son premier logiciel appelé ArcInfo. Il combinait l'affichage d'images géographiques avec un outil de gestion de bases de données. Destiné à fonctionner sur micro-ordinateur, on peut le considérer comme le premier logiciel ouvrant la voie au développement des SIG. Nous quittons enfin le stade des recherches éparées et non coordonnées entre elles, pour trouver sur le marché un outil de travail. Ce premier outil allait en appeler d'autres et créer une émulation, sinon une concurrence, qui, conjuguée aux progrès incessants de l'informatique allait permettre une nette avancée des Systèmes d'Information Géographique. Il faut signaler le cas de la ville de Marseille et d'ICOREM, dont le logiciel CARINE fut opérationnel en 1981. Toujours à partir du début des années 1980, il est intéressant de signaler la mise en place, petit à petit, dans un certain nombre d'endroits (commune de Rennes par exemple) d'une amorce de SIG à partir de logiciels topo avec intelligence (Ascodes, Star).

## La consolidation et la mise en place du système

N'étant pas un géomaticien, mon propos n'est pas de décrire dans le détail les améliorations incessantes qui ont accru le potentiel des SIG et rendu leur emploi plus accessible. Dans les années 1970, l'informatique était encore lourde et onéreuse, apanage des grosses structures ou des grosses collectivités. Le développement du micro-ordinateur, au début des années 1980, allait permettre l'accès de l'informatique à des structures légères, puis aux particuliers. Il fallait donc la rendre plus conviviale, plus facile d'emploi, créer des logiciels mieux adaptés à un usage par des non-informaticiens. Qui plus est, bien que ces logiciels demandent une longue étude et une longue mise au point, il fallait que leur prix reste accessible à un plus grand nombre d'utilisateurs. Il fallait bousculer les mentalités, bousculer les usages, les méthodes de travail et la "mayonnaise informatique" mit du temps à prendre. Alors que les premiers micro-ordinateurs faisaient leur apparition sur le marché en 1977, fin 1981 on n'en comptait que 2 millions dans le monde entier. Aujourd'hui, il s'en vend presque autant en France chaque année et notre parc national frôle les 10 millions d'unités!

En ce qui concerne les SIG, dès qu'il est apparu que cette application de la topographie était une activité porteuse, elle a attiré, non seulement de nombreux chercheurs, mais aussi la création de plusieurs sociétés qui concurrencèrent ESRI. En Amérique on peut surtout citer Mapinfo en 1986, ou Intergraph, spécialisé au début dans les domaines de la sécurité, de l'offshore ou des administrations. En France, nous avons parlé précédemment d'Ascodes, devenu un Système d'Information Géographique tridimensionnel ouvert développé et commercialisé par JSInfo ; cette société créée en 1973, est également éditeur de TopStation. Il faut encore citer APIC, dès 1983, qui connut son développement grâce à son partenariat avec la ville de Metz et proposait des concepts novateurs. Geoconcept, quant à lui, apparut en 1990. Ce sont les plus connus dans l'Hexagone, mais il y en a d'autres.

Dans la mouvance de la généralisation et de la convivialité d'emploi des logiciels, on voit apparaître en avril 1987 la version 1.1 de Mapinfo qui se targue d'être le premier logiciel à donner latitude et longitude pour les détails d'une rue ou de pouvoir créer la carte thématique de cette rue ! En 1990, ESRI lance sa série Arcview, d'un prix abordable et d'un emploi convivial. Nous verrons ultérieurement la même démarche suivie par les logiciels de base de données Excel et Access. Les améliorations constantes vont suivre. J'avais eu à me servir du logiciel Arcview 3.2 paru vers 1995, quand j'ai assisté à une démonstration de la version ArcGIS 9 parue en mai 2004. Certains principes de base étaient restés les mêmes, mais il n'y avait plus rien à voir entre les applications et les possibilités des deux logiciels qui, comme l'informatique avaient évolué très vite.

## ■ Les types de logiciels de SIG

- Nous avons cité précédemment plusieurs logiciels SIG. Ces logiciels du marché ont adopté des configurations variées par leurs choix techniques, leur complexité et leurs performances. Certains ont développé des qualités propres sur certains points. Je citerai APIC l'un des pionniers de l'information temporelle ; Arcinfo qui offre une gestion élaborée de la topologie dans l'acquisition et la gestion des données ; Geoconcept qui propose une ergonomie conviviale avec des tables d'attribut bien organisées et agréables à regarder ; Geomédia qui a développé un concept d'interopérabilité. Cependant, tous ces logiciels restent généralistes en proposant des modules complémentaires.
- Le logiciel libre se distingue des "logiciels propriétaires" précédents, qui habituellement ne comportent que des droits d'usage ; il est en effet expressément interdit d'en modifier le code exécutable, de les redistribuer. Différemment, la licence du logiciel libre, gratuite, permet au bénéficiaire d'étudier le fonctionnement du logiciel, de modifier le logiciel pour un usage particulier et de faire connaître à la communauté des utilisateurs les modifications ou améliorations effectuées sur le logiciel. Nous verrons avec les communes françaises le type de problème posé par les SIG libres.

## Rappel des composantes d'un SIG

Avant d'aller plus loin, il m'a paru nécessaire de faire quelques rappels qui nous permettront mieux de comprendre l'évolution des SIG. Comme nous l'avons vu, le SIG allie des données images avec des données alphanumériques, toutes les deux géoréférencées. Les progrès des logiciels ont permis petit à petit des transformations faciles qui permettent aisément de passer de coordonnées planes à des coordonnées géographiques. Ces dernières sont universelles et conviennent mieux à un SIG couvrant un pays à cheval sur plusieurs zones de projection UTM, par exemple. Mais, les logiciels de SIG ont mis du temps à bien assimiler ce problème, je renvoie à l'argument de Mapinfo en 1987.



## ■ Les données alphanumériques ou attributaires

Ce sont des données descriptives qui auront été modélisées et réunies dans une Base de Données (BD) ou un Système de Gestion des Bases de Données (SGBD). Par l'intermédiaire de tables associées à des couches graphiques, elles vont permettre de fournir toutes les informations relatives à un objet sélectionné sur le plan. Par exemple après sélection d'un compteur d'eau, va apparaître une table d'attributs donnant le nom de l'abonné, le numéro du compteur, sa marque, sa date d'installation, etc. (figures 1 et 2).

Mais cet exemple est une fonction simple. Le SIG doit permettre ce que l'on appelle une Requête (Query en anglais), par exemple *quelles sont les conduites d'eau en fonte installées avant 1980 ?* Sur le plan, les conduites intéressées sont mises en surbrillance et un tableau correspondant va apparaître. Cependant, ce type de requête est simple. On peut imaginer la gestion des salles de cours d'une université, le problème devient plus complexe car il faut établir des relations entre l'emploi du temps des élèves, des professeurs et l'occupation des salles de cours, il faut donc établir des "bases de données relationnelles". Ces bases de données relationnelles peuvent être manipulées ou interrogées par un langage de requête tel le SQL (Structured Query Language), langage informatique normalisé.

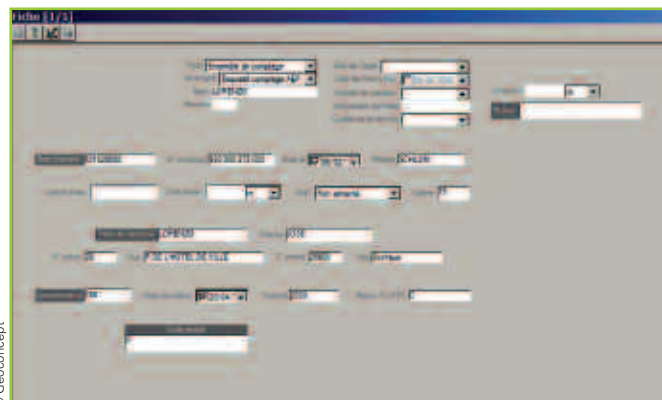


Figure 1. Type de fiches très conviviales qui apparaît quand on double-clique un objet. Ici, la fiche d'un compteur d'eau (objet ponctuel).

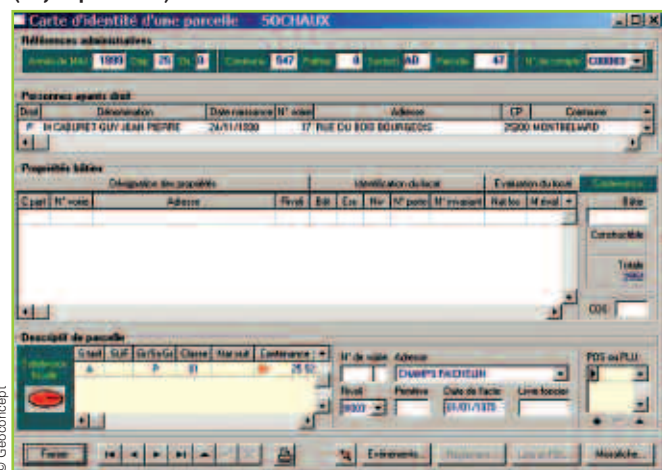


Figure 2. Toujours une fiche conviviale concernant une parcelle de terrain (objet polygonal).

- Dans les années 1970, les utilisateurs partaient de zéro, sans outils spécifiques et sans standardisation des données. Il fallut attendre 1979 pour voir apparaître sur le marché le Système de Gestion de Bases de Données (SGBD) relationnelles ORACLE, développé par la société américaine Relational Software. Ce système ne permettait pas encore les transactions, mais il implémentait les fonctions SQL basiques de requêtes et de jointures. En 1983, apparaissait la version suivante réécrite en langage de programmation C et permettant les transactions. On peut citer aussi la société américaine Ashton-Tate qui, au début des années 1980 édite dBase, SGBD destiné à faire partager un fichier de données à plusieurs utilisateurs ; à la fin des années 1980, dBase III devient un véritable gestionnaire de bases de données relationnelles. En 1991, la société est rachetée par Borland. D'autres concurrents ne tarderont pas à suivre. A Marseille, ICOREM avait créé le système Carine qui fut abandonné en 1997.

- Comme nous l'avons dit, au départ les SIG étaient l'apanage de grosses structures. Mais avec le développement des micro-ordinateurs et la démocratisation des logiciels, il fallait créer des bases de données plus simples :

En 1985, Microsoft met au point Excel. Au début, il ne s'agissait que d'un tableur destiné à effectuer des calculs répétitifs dans un tableau de type comptabilité composé de cellules groupées en lignes et colonnes. Ses capacités de pseudo-base de données, fonctionnant avec des tables – comme des tableaux – ne sont apparues que plus tard. Utilisable seulement sur Macintosh il était destiné à concurrencer Lotus 1-2-3. En 1987, Microsoft sort sa version 2 pour Windows ; en 2007, nous en sommes à la version 11 ! Jusqu'à la version 2007, ce logiciel pouvait créer des tableaux comptant jusqu'à 256 colonnes et 65.536 lignes. Excel permet d'établir des calculs dans les colonnes. De plus, on peut établir des relations en créant une colonne commune qui permet de lier deux tableaux différents.

En 1992, Microsoft commercialise Access, base de données relationnelles (SGDB), beaucoup plus adaptée aux SIG qu'Excel lequel s'apparente plus à un tableur. Un fichier Excel peut être importé dans Access. Cependant Access est limité en nombre d'utilisateurs et en 2007 sa capacité était limitée à 2 Go. Les grosses structures préfèrent donc utiliser des logiciels comme ORACLE.

De nombreuses autres bases de données existent aujourd'hui, il serait fastidieux de toutes les citer. Je me limiterai à File maker pro, produit par Claris Corporation, destiné aux petites structures et PME. On peut aussi mentionner l'essor important des bases de données libres telles MySQL, ou encore mieux dans le domaine des SIG PostgreSQL/PostGIS qui sont aujourd'hui de véritables solutions alternatives – PostgreSQL/PostGIS est une BD spatiale avec des opérateurs spatiaux apportés par la composante PostGIS.

- On ne peut passer sous silence l'apparition des métadonnées en 1995, liées au développement des échanges de données. Qualifiées aussi de données sur les données (données décrivant un lot de données géographiques), elles

aident à exploiter et échanger les données multisources en gérant leur structure, leur contenu et même des niveaux différents de qualité. (figure 3)

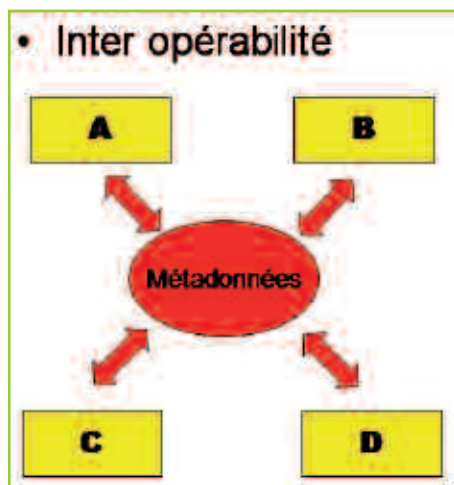


Figure 3. Les métadonnées permettent de gérer les différentes sources de données.

### ■ Les données graphiques (ou images)

Elles peuvent être composées de données raster ou matricielles. Ce sera une carte scannée ou un orthophotoplan. Nous avons vu qu'au début, Esri travaillait sur des données cellulaires avant de se tourner, en 1975, sur des données vectorisées. Au début, l'usage de données raster était limité car on ne peut y sélectionner que des points constitués par des pixels indépendants les uns des autres. La télédétection et les orthophotoplans leur ont apporté l'utilité qu'elles n'avaient pas. Un orthophotoplan joint à un parcellaire vectorisé, lui apporte de nombreuses informations et le rend plus facile à lire. Bien que la production des orthophotoplans ait été possible dans les années 1980, leur utilisation courante permise par les progrès de l'informatique et des procédés techniques moins onéreux n'arriva que beaucoup plus tard. Nous rappelons que l'IGN ne se lança dans sa BDortho qu'en 1998. C'était hier !

Les progrès de la télédétection sont eux aussi liés à ceux de l'informatique. Il faut citer le logiciel IDRISI développé à partir de 1987 par le département de géographie de l'Université Clark (USA) et qui travaille sur une base graphique raster. Le traitement des images par un certain nombre de fonctions mathématiques et statistiques permet d'étudier l'occupation du sol.

Il faut quand même préciser que l'on peut vider, à partir d'une base de données ou d'un GPS, tout un semis d'objets points sur un plan raster. Les outils de dessin du SIG permettent de les faire apparaître avec un signe conventionnel approprié. Ces outils de dessin permettent aussi de dessiner manuellement des lignes ou et des objets ponctuels, mais cette dernière possibilité reste d'un intérêt limité si on doit rajouter beaucoup de détails.

- Une donnée graphique peut être encore vectorielle : ce sera une carte vectorisée ou un plan issu d'un logiciel de DAO

dans un format compatible (dxf semble le format prépondérant). Cela permet de sélectionner des objets ponctuels, linéaires, ou polygonaux. Avec la modélisation 3D apparaîtront les objets volumiques. La vectorisation permettra, par exemple, de travailler sur un réseau, ce que ne permet pas un plan raster. C'est sur ce type d'objets que travaillent les logiciels courants. Il faut cependant préciser que le SIG pose des contraintes à l'image graphique 2D, il n'admet pas une superposition d'objets telle celle qui résulte des signes conventionnels des cartes. Certaines techniques seront mises au point, tel le buffer, pour pouvoir adapter des images non conformes à un bon emploi.

- Comme pour les bases de données alphanumériques, d'autres systèmes sont nécessaires pour la gestion des bases graphiques. La plus connue en France, APIC créée par des chercheurs français et distribuée aujourd'hui par STAR APIC permet l'exploitation des bases de données géographiques relationnelles à travers la consultation, la mise à jour, l'analyse et l'édition cartographique.

### ■ La structuration des SIG

- Un élément fondamental des SIG est la structuration des données, qui permettra de définir un groupe de couches pour chaque thématique, puis de couches comportant un seul type de géométrie (points, lignes, parcelles). A chacune de ces couches graphiques sera associée une table de données attributaires (alphanumériques). Cela signifie que les données devront être parfaitement pensées et organisées au moment de la conception d'un Système d'Information Géographique. En particulier, si un demandeur d'ordre commande un plan destiné à un SIG, il devra veiller à ce que les couches de DAO correspondent à celles qui sont gérées ou doivent être gérées par le SIG. (figures 4 et 5).

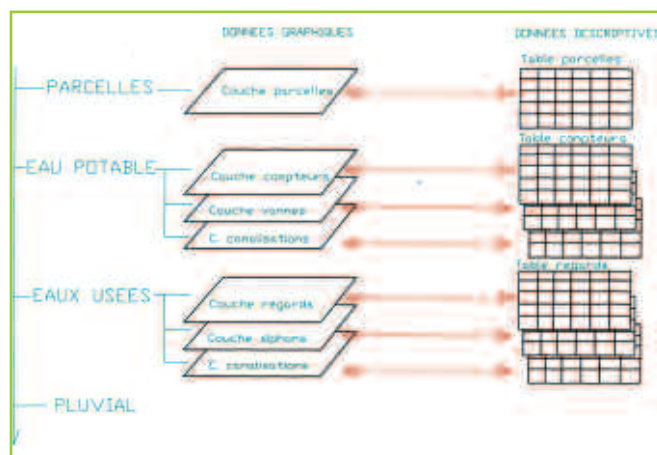
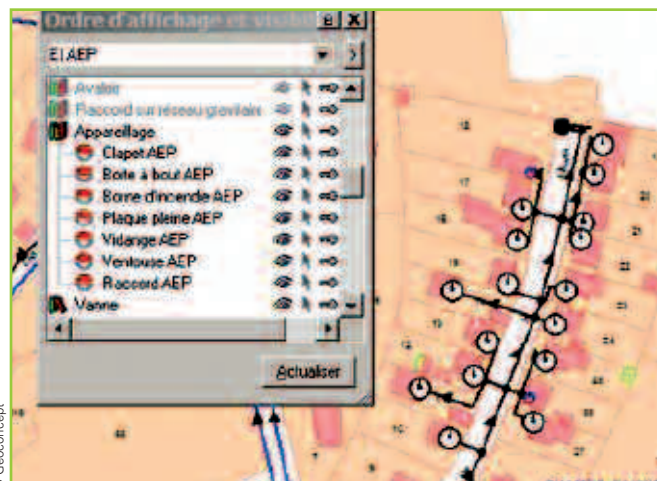


Figure 4. La constitution d'un SIG doit être précédée d'une longue réflexion sur l'organisation des données en fonction des besoins de l'utilisateur. A chaque couche graphique va correspondre une table de données descriptives (attributs). Le double clic sur un objet de l'écran fera apparaître une fiche issue des données de la table. Les tables permettent de faire des requêtes, des relations entre les tables permettent des requêtes plus complexes (SQL). A ces fonctions de base s'ajoutent d'autres applications ou modules.





**Figure 5.** Sur la couche du plan parcellaire de Montbéliard apparaissent les couches d'eau potable et des compteurs. En bas de l'écran, les onglets permettent de choisir un thème.



**Figure 6.** On voit ici l'arborescence qui montre l'organisation de l'adduction d'eau potable (AEP). Dans l'appareillage, différentes couches correspondent aux différents types d'objets.

Toutes ces couches sont organisées en arborescence. Par exemple, dans la gestion des réseaux d'une ville, une branche concernera le réseau d'eau potable, laquelle va se diviser en appareillages et conduites ; la branche appareillage va elle-même se subdiviser en compteurs d'eau, en vannes, etc. A chacun de ces types d'objet sont associées une couche et la table d'attributs correspondante. Voir les figures 4 et 6 qui illustrent cette arborescence.

- Cette structuration réalisée, l'utilisation d'un SIG va bien au-delà du geste de cliquer un objet graphique pour obtenir ses données attributaires. Les progrès des ordinateurs, des logiciels, des bases de données et une plus grande expérience ont amené à poser des questions de plus en plus complexes et exigeantes, relevant souvent de l'analyse. Nous avons vu, précédemment, les bases de données relationnelles ; l'utilisateur devra créer lui-même les relations correspondant à ses besoins propres, ce que le logiciel ne fera pas à sa place. Ainsi, à la première requête spatiale simple "où sont ?" qui interroge une composante géométrique par sa composante sémantique, ont succédé des questions d'un niveau supérieur, telles que : "comment ?" nécessaire à la prise de décision, "Et si ?" nécessaire à la simulation.

La question "Quand ?", un peu négligée au tout début, a vu son importance croître avec l'avancée en âge et les mises à jour des bases de données. Là aussi, à la première question simple "Quand a été installé ce type de compteur ?" ont suivi des questions d'analyse beaucoup plus complexes.

- Un autre aspect doit être abordé : pour les objets linéaires, un outil de DAO tel Autocad, ne permet pas d'effectuer des calculs d'itinéraire ou de propagation. Il faudra alors introduire une topologie de réseau qui décrit une relation entre une polyligne et ses sommets. Cela va amener des relations

spatiales telles que la connexion ou l'intersection. On associe à chaque côté de la polyligne (ou arc), les identifiants de son sommet initial et de son sommet final, ce qui permet en outre d'orienter les arcs. On peut alors calculer une propagation le long d'un réseau, qu'il soit routier, électrique, d'eau potable, ou autres.

La théorie des graphes a permis cette gestion des réseaux dans les SIG. Comme vu dans la topologie évoquée précédemment, le graphe est constitué par un ensemble de points (sommets) et un ensemble de flèches (arcs) reliant deux points. Bien que son concept soit plus ancien, Claude Berge en pose les bases dans les années 1960 avec Graphes et hypergraphes. Depuis, François Bouillé a apporté une grande contribution aux applications de cette théorie. Dans de nombreux problèmes, la notion de graphes est restrictive car limitée à des relations binaires sur les ensembles. Apparaît alors la notion d'hypergraphes.

- Il faut aussi parler de la topologie de voisinage qui va gérer les relations entre les surfaces ou entre les surfaces et les arcs. Cette topologie est nécessaire quand on veut effectuer des analyses spatiales impliquant des relations de voisinage ; par exemple, si on modifie la superficie de la parcelle A, quelle sera la conséquence sur la parcelle B voisine ? Cette topologie permettra aussi, entre autres, de prévenir un no man's land entre deux parcelles, dû à un défaut de numérisation. Elle va aussi induire une information comportementale, telle que l'influence de la fermeture d'une vanne sur un réseau d'eau.

## La 3D dans les SIG

Nous avons vu que ESRI avait lancé la première version d'ArcInfo en 1982. Au milieu des années 1980 était édité le premier module pour travailler en 3D sur ArcInfo. Ce module s'appelait TIN (pour Triangulated Irregular Network). Il travaillait à partir de semis de points ou de matrices d'altitudes, permettant de créer des modèles numériques de terrain et de réaliser des calculs de pente, des profils ou de déterminer des



zones d'exposition. Il préfigurait ce qui allait devenir les 3D actuels. Il a ensuite évolué pour devenir 3D Analyst associé à Arcview 3 en 1992. Objet de perfectionnements constants, 3D Analyst est toujours produit et distribué comme extension de la gamme ArcGIS : ArcGIS 8, sorti en 2000 aux Etats-Unis et 2001 en France, ArcGIS9 sorti en 2003 aux Etats-Unis et en mai 2004 en France. Mais ESRI n'est plus le seul producteur de logiciels 3D pour les SIG, on peut citer : Saphir+ logiciel d'analyse spatiale et de cartographie thématique édité par Geomedia, Stone Earth, STAR GIS, CARIS GIS, GeoMap GIS, AutoCad Map 3D... Cependant, bien que les premiers outils aient existé plus tôt, il a fallu attendre l'explosion des capacités mémoire et la constitution des données cartographiques 3D, au début des années 2000, pour que la composante 3D des SIG prenne son essor avec la modélisation généralisée du bâti urbain.

La troisième dimension, la 3D comme il est plus facile de l'appeler, est un concept qui a beaucoup de succès aujourd'hui. Réelle utilité ? Jeu d'informaticiens dans la même lignée que tous les jeux électroniques Nitendo et autres ? De plus, paradoxe amusant à relever : en informatique, les représentations 3D se sont faites longtemps sur un écran plat, lui-même en 2D ! Seule la photogrammétrie où l'on observe avec des lunettes polarisées un couple de photos monté sur l'écran permettait une véritable vision du relief... Mais, avec les améliorations incessantes, il existe aujourd'hui des visualiseurs qui permettent la visualisation des données 3D en anaglyphe, par exemple, ArcScene d'ESRI.

### ■ Pourquoi la 3D ?

Pour quelqu'un qui a été amené à rédiger une carte ou un plan altimétrique, ou qui a reçu une formation pour les lire, ces documents sont une mine d'informations qui, souvent, dispensent d'une représentation 3D. Mais, avec ses signes conventionnels destinés à faire ressortir les détails importants, sa représentation conventionnelle du relief par courbes de niveau, la carte n'est pas un document intuitif accessible à tout le monde. De plus, dans les zones urbaines où tout l'espace dessina-ble est occupé par le bâti, il est difficile de représenter les courbes de niveau. Il y a une vingtaine d'années, quand l'IGN avait décidé de se lancer dans une nouvelle politique de production et de commercialisation de ses cartes, puis de reprendre à son compte la diffusion des cartes routières abandonnée à Michelin, une étude avait été faite. On s'était aperçu que seulement 15% des Français étaient capables de lire correctement une carte. Et encore, je crois qu'il s'agissait simplement de cartes routières ! Il faut le reconnaître, la représentation 3D est bien plus facile à comprendre qu'un plan, surtout en ville ; comme l'image photo, elle est intuitive.

Or, dans les prises de décision par les municipalités ou les collectivités locales, les élus et les responsables administratifs n'ont pas toujours la formation pour lire correctement un plan. Une représentation 3D devient alors un meilleur outil de prise de décision. Il faut aussi ajouter que dans certains cas, l'option 3D est devenue un outil remarquable qui dépasse largement les possibilités de la 2D. Je pense en par-

ticulier à l'étude de l'impact d'un projet immobilier sur l'environnement paysager ou sur l'environnement architectural existant. Hors toute polémique, le Centre Beaubourg aurait-il été construit tel que nous le connaissons, si le Président Georges Pompidou avait pu voir en perspective 3D son impact sur l'architecture traditionnelle environnante ?

## Modélisation des objets urbains

En D.A.O., les premières études de représentation 3D furent faites en 1967 à l'université de l'Utah. Mais il fallut attendre 1984-85 pour voir la 3D prendre son essor avec l'arrivée de Macintosh et Windows. C'est à ce moment qu'arriva le premier module 3D dans les SIG. En 1986, avant la fermeture des chantiers navals de la Seyne-sur-Mer, j'avais visité leur bureau d'études où sur les écrans d'ordinateurs apparaissaient une représentation 3D des réseaux électriques et divers qui, sur un navire, se croisent et se superposent dans un espace restreint. Quant aux architectes, ils savent depuis longtemps construire le modèle 3D d'un bâtiment.

Mais le grand développement de la 3D dans les SIG est arrivé avec son application aux villes. Quand il s'agit d'une ville comptant des dizaines ou centaines de milliers de bâtiments, il faut trouver une méthode de modélisation plus rapide et moins onéreuse. Le premier souci du 3D urbain fut donc la recherche d'une modélisation "industrielle". Bien que la composante 3D ait été envisagée dans les SIG dès 1985, avec le module TIN d'ESRI, dans le milieu des années 1990 la 3D exigeait des configurations informatiques spécifiques et coûteuses qui restreignaient son usage à quelques spécialistes. Il fallut attendre le début des années 2000 pour voir son explosion avec la modélisation des villes.

### ■ La modélisation 2D1/2

La prise en compte de la 3D n'est pas simple, ni en ce qui concerne l'acquisition des données, ni en ce qui concerne le logiciel qui va les utiliser. Il faut dépasser la solution la plus simple qui consiste à utiliser un modèle 2D avec un z en attribut. L'utilisation en est trop restreinte : à quelle profondeur est ce regard, à quelle hauteur est cette maison, on pourra aussi en déduire un profil. Mais elle sera inadaptée à l'étude de l'impact visuel sur l'environnement.

On a eu recours en premier à la 2D1/2 qui s'appuie sur un modèle numérique de terrain, ce que les versions de logiciel SIG savaient faire depuis longtemps. Cela permet d'avoir une vision perspective du terrain naturel et de faire des simulations d'intervisibilité. Mais à chaque point (x,y) ne peut être associé qu'un z unique, incompatible avec la représentation d'un bâtiment.

Une variante plus évoluée permet d'associer deux z à tout point (x,y) : un z issu du MNT et un second z issu d'une autre source. En photogrammétrie classique, pour restituer les maisons d'une ville, le restituteur est obligé de suivre le contour des toits des maisons, le bas des maisons étant en partie occulté par la perspective. Cela permet d'avoir un Modèle Numérique d'Élévation (MNE), qui associé aux





Figure 7. Comparaison entre un modèle 3D élaboré (Versailles) et un modèle 2 D1/2

altitudes au sol du MNT donne les deux  $z$  nécessaires. Déjà, à la fin des années 1970, l'IGN avait proposé le logiciel TRAPU, le premier à obtenir par la restitution photogrammétrique la décomposition des bâtiments en polyèdres. On obtient alors une représentation urbaine 3D simplifiée, dont les bâtiments sont constitués de parallélépipèdes ou de figures géométriques simples. Cela permet d'obtenir différentes vues perspectives utiles à de nombreuses études. Cependant, une structure complexe, comme un échangeur autoroutier à trois niveaux, échappe à ce type de représentation.

Au début des années 2000, une question se posait en France : le passage à une représentation 3D véritable, avec toutes les études, mise au point de nouveaux outils, mesures nécessaires à la modélisation se justifie-t-il ? Des pays comme l'Allemagne, l'Autriche ou la Suisse ne se posèrent pas ce type de question.

### ■ La modélisation 3D

Le premier souci pour l'utilisation de la 3D dans les SIG a été celui de la modélisation. Mais la modélisation posait un double problème : celui des mesures à effectuer pour pouvoir la créer et celui du rendu sur l'image. Le Modèle Numérique du terrain naturel (MNT) étant créé, il fallait savoir comment déterminer le Modèle Numérique d'Élévation (MNE) ; deux solutions se présentaient. On pouvait penser à une restitution photogrammétrique plus poussée que celle effectuée pour la réalisation d'une carte 2D et exploitée en 2D1/2. Cela nécessitait alors de restituer non seulement le contour des toits, mais aussi toutes les arêtes, de manière à ne pas obtenir de simples parallélépipèdes. On pouvait penser aussi à la technique nouvelle du laser LIDAR aéroporté avec un nuage de points assez dense pour rendre correctement les toitures. L'avantage du LIDAR était de fournir un nuage de points aussi autour des maisons, donc d'obtenir un MNT souvent meilleur que celui existant.

Autre souci, celui des façades des maisons. La solution la plus économique trouvée a été celle de prises de vues aériennes obliques. La Mairie de Montpellier, par exemple, a fait faire des prises de vues où le recouvrement des photos est de 66% de photo à photo et aussi de bande à bande, ce qui permet d'avoir huit points de vue différents d'un bâti-

ment. Ensuite, le problème est de trouver un algorithme pour caler automatiquement l'image d'une façade déformée par la perspective sur la véritable forme de la façade déduite des verticales à partir du toit (extrusion).

En fonction de ce que nous venons de voir, il existe plusieurs procédés de modélisation géométrique des objets 3D et il est certain que ces procédés vont conditionner l'utilisation que l'on va pouvoir en faire. On échappe à la facilité des images vectorielles nécessaire à la 2D. Il existe trois grands types de modélisation 3D géométrique (en ne faisant aucune référence à la topologie) : les modèles volumiques, les modèles surfaciques et la modélisation par balayage.

**Modélisation par balayage** : le principe de cette modélisation repose sur l'association d'une surface 2D et d'une trajectoire. Le déplacement de la surface 2D le long de la trajectoire permettant d'aboutir à une forme 3D.

**Modélisations surfaciques** : elles peuvent offrir une modélisation 3D à part entière. Les modèles surfaciques ne modélisent pas le volume d'un objet, ils modélisent le contour ou l'enveloppe de cet objet.

**Modélisations volumiques** : elles s'appuient sur des associations et des combinaisons de primitives de dimension trois (volumiques). Les objets ne sont plus représentés par leurs contours, ils sont représentés par leurs volumes.

Cependant, modéliser n'est pas tout, encore faut-il que les données issues de la modélisation soient stockées dans un format standardisé. En effet, le développement des technologies 3D a donné naissance à de nombreux logiciels, parfois incompatibles. Plusieurs formats se sont imposés qui constituent des standards, la transformation d'un format à l'autre étant possible. Le plus connu semble être le VRML (Virtual Reality Mark-up Language) paru en 1994 et dont le format X3D de Web 3D semble être le successeur, il serait fastidieux de tous les énumérer. Je cite seulement 3D Studio Max, Blender, Lightware 3D, etc.

En ce qui concerne la modélisation à partir d'image satellite à haute résolution, une norme ISPRS 3D pour les 3D City models, a été créée en 1995.

Outre-Rhin a été proposée en 2003 la norme CityGML dont l'objectif est de créer un format lisible pour stocker et représenter les villes en trois dimensions. Elle a été conçue par Geodata Infrastructure North-Rhine Westphalia qui regroupe chercheurs, entreprises et municipalités allemandes en vue du développement et de l'exploitation commerciale de modèles 3D interopérables. Quatre niveaux de détail du rendu des bâtiments ont été proposés. Une fois modélisée, la ville peut être visualisée avec des outils spécialisés : GML-tool, entre autres.

Il est d'ailleurs amusant de constater que cette visualisation avec navigation dans un espace 3D ne vient pas de recherches liées à des impératifs topographiques, mais de recherches liées aux jeux vidéo !

Actuellement, certains chercheurs envisagent de dépasser la modélisation de l'enveloppe extérieure des bâtiments pour s'intéresser aux pièces qui les composent (Modèle 4 de





CityGML en 2007). Mais, si cette modélisation est très séduisante pour un projet architectural limité, elle semble difficile à étendre à toute une ville.

D'autres modélisations sont en cours à partir des images satellitaires comme nous le verrons plus loin avec Google Earth et Virtual Earth. Elles avaient déjà été entrevues dans la seconde moitié des années 1990, sans aboutir.

### ■ *La gestion des données dans un SIG 3D*

La modélisation et la standardisation des données images 3D ne suffisent pas, il faut pouvoir gérer toutes les autres données sur le modèle 3D. Un SIG 3D doit présenter les mêmes caractéristiques et fonctionnalités qu'un SIG 2D mais en portant chacune d'elle (fonctionnalité) à un niveau supérieur, car la gestion d'objets spatiaux, y compris les volumiques doit se faire dans un référentiel 3D. Cela implique une gestion de la topologie 3D des objets, une analyse spatiale 3D (intersection de volumes, etc.) et une indexation spatiale 3D.

La gestion d'objets volumiques et des trois types d'objets vus dans les SIG 2D ne peut se faire simplement et il faut imaginer une autre logique de conception et de liaison entre les données descriptives (ou attributaires) et le modèle. L'intégration d'un système de gestion de l'information 3D à la modélisation de l'espace urbain nécessite encore des recherches complexes. La notion de modèle simple est dépassée. Il faut repenser entièrement le concept du SIG pour développer un meta modèle générique de l'information 3D urbaine. Quant à la navigation à travers les rues du modèle, comme on le ferait en voiture, elle allie la 3D au mouvement, lequel est fonction du temps. Certains en ont fait la 4D alors que les jeux vidéo, ou l'armée dans les simulateurs de vol l'utilisent depuis longtemps !

Début 2008, aucun logiciel de SIG ne peut être qualifié de 3D et n'est en mesure de proposer des outils d'analyse 3D comparable à ce qui existe en 2D. On a des SIG à deux composantes : un SIG classique pour tous les objets au sol (voirie, parcellaire, etc.) et des options 3D pour les simulations d'impact architectural et certaines études techniques liées à l'altitude. Il faut d'ailleurs se rappeler que par sa définition, la surface d'un terrain est mesurée sur le plan horizontal. On voit ici la complémentarité de fait qui existe entre la 3D et la 2D.

### ■ *Mise à jour d'un SIG urbain*

La mise à jour est l'un des impératifs d'un SIG : une ville évolue en permanence et sa gestion nécessite que cette évolution soit prise en compte sans tarder. Chaque nouveau projet immobilier fait l'objet de plans et de simulations qui sont transmis aux services urbains. Ces projets sont réalisés en DAO, Autocad ou Microstation, entre autres, permettant de les représenter en 3D, il faudra donc les intégrer dans un format compatible avec la mise à jour du SIG. Tout comme des photographies de façades devront pouvoir être introduites dans le SIG lors de projets de rénovation. Les prises de vues aériennes doivent elles aussi être suffisamment fréquentes. Le plan parcellaire pose l'un des gros problèmes de la mise à jour, le cadastre ayant souvent du retard dans toutes les modifications de ses plans suivant un partage ou une rectification.

### ■ *Gestion des réseaux*

C'est sans doute l'un des aspects qui prendra le plus d'importance dans l'avenir. Mais, le positionnement des réseaux souterrains n'est pas aisé, car beaucoup de négligences ont été commises et beaucoup de réseaux anciens n'ont pas fait l'objet d'un plan précis lors de leur installation. Il est facile, lors d'un lever urbain de positionner les bouches à clef, les plaques d'égout, les bornes à incendie, mais dans de nombreux cas, leur jonction par les conduites enterrées n'a pas été relevée au moment des travaux et certaines communes sont très en retard dans la constitution d'un SIG fiable. Certaines sociétés telles EDF, GDF ou France Télécom ont été plus rigoureuses exigeant des entreprises un plan 1/200 lors des travaux d'installation de câbles ou de conduites enterrées. Mais, pour des questions de responsabilité, elles préfèrent ne pas diffuser les banques de données de leur réseau qui ne font l'objet que d'échanges d'informations très localisées avec les communes lors de travaux.

Cette gestion des réseaux, si elle veut être efficace, demande une précision meilleure que celle des objets externes. Elle devrait être de l'ordre de 10 cm et parfois centimétrique en Z (écoulement gravitaire de l'eau usée ou de l'eau pluviale en zone plate), ce qui n'est pas toujours le cas. Donnée trop négligée ou souvent estimée et non mesurée : la profondeur. Certaines communes (Rennes) préfèrent avoir une altitude, ce qui lève toute ambiguïté quand le sol au-dessus d'un réseau a fait l'objet de modifications (terrassement ou rechargement du revêtement d'une rue). Dans le cas d'un SIG 2D, cette altitude Z doit être un attribut du point XY concerné.

## Les SIG dans les communes françaises

Nous avons vu qu'en 1973, avait commencé la numérisation du plan parcellaire de Paris et du cadastre de plusieurs grandes villes françaises.

La numérisation du parcellaire dans les villes fut donc le premier début de la constitution des banques de données qui allait permettre avec les progrès de l'informatisation graphique de donner naissance aux SIG urbains. Cependant, il faut avouer que le cadastre français, avant tout document fiscal, manquait de la rigueur quant à sa mise à jour et la précision graphique des limites de parcelles. Sa superposition à des documents plus précis posera des problèmes que nous verrons plus loin. Aujourd'hui, bien que le Plan Cadastral Informatisé (PCI) permette de constituer un SIG répondant aux principes modernes des bases de données géographiques relationnelles, il souffre d'un handicap majeur : le géoréférencement et la continuité géographique n'avaient pas été prévus dans sa conception initiale toujours en vigueur. Signalons que de très nombreux géomètres rédigent encore leurs documents de partage parcellaire sur support papier, avec l'assentiment du cadastre (figures 8 et 9).

En 2002, si 34 villes françaises de plus de 100 000 habitants étaient dotées d'un SIG, 6 ne l'étaient pas encore ! En ce qui concerne les 72 villes de 50 à 100 000 habitants, seules 55 avaient un SIG. Pour les petites communes, on tombait à 5 %





**Figure 8.** Discordance entre une feuille du cadastre (en jaune) et une autre (en bleu), le calage des constructions n'est pas parfait, une voie n'a pas été régularisée.



**Figure 9.** Cadastre mis en cohérence avec l'orthophotoplan.

des communes de 5 à 10 000 habitants disposant d'un SIG ; il est évident que ce pourcentage a beaucoup augmenté en 2008.

- Il faut parler de Virtuel City, société implantée dans le Doubs où elle participe à une SEM (Société d'Economie Mixte) avec certaines collectivités de Franche-Comté. Elle est partenaire de l'IGN sur certains projets et devrait avoir couvert 48 villes françaises en 3D, en mai 2008. Elle propose une haute et une moyenne définitions, un géoréférencement d'une précision de  $\pm 15$  cm en XYZ, une interopérabilité des SIG et des données fournies en formats 3DSM, KML, VRML, DXF, X3D.
- Les logiciels libres : nous en avons parlé précédemment, il s'agit de logiciels gratuits développés dans les universités. Des SIG libres existent qui présentent des fonctionnalités tout à fait satisfaisantes pour des petites structures (petite commune par exemple). Une action avait été développée pour leur utilisation par les collectivités territoriales, ce qui aurait dû leur permettre d'éviter le coût d'un logiciel. Mais, leur habillage, leur ergonomie, leur adaptation aux besoins de l'utilisateur imposent l'appel à un spécialiste, ce qui ne représente pas toujours une économie. Le plus connu de ces



**Figure 10.** Comparaison entre les orthophotoplans de résolution 50 cm et 20 cm.

logiciels est Grass, Microsoft a aussi développé Open Source et certaines petites structures informatiques ont amélioré ou développé ces logiciels libres pour les commercialiser !

- Nous traitons ci-après, le cas de sept grandes villes qui représentent bien l'évolution des SIG dans les communes françaises. Nous verrons aussi que la cohérence recherchée dans la précision des données graphiques amènera ces communes à reprendre la numérisation du cadastre et pour certaines à se doter d'autres orthophotoplans que ceux de la BDOrtho IGN.

## ■ Marseille

Avec la communauté urbaine de Lille, Marseille est la première ville française à s'être lancée dans la constitution de bases de données qui débouchèrent ensuite sur un SIG. Dès 1971 est constituée la société d'économie mixte ICOREM, chargée dans un premier temps d'analyser ce qui est possible. Une convention est aussitôt signée avec la DGI et la numérisation des 960 planches cadastrales de la ville est entreprise. Parallèlement est utilisée une photogrammétrie 1/1000 pour bien cadrer ce cadastre et caler les bâtiments. Dans la zone urbaine, il en résultera un cadastre à l'échelle 1/500 de bonne facture, donnant l'appartenance des clôtures (mitoyenne ou privée). Parallèlement, ICOREM développe le logiciel CARINE qui va permettre non seulement de stocker les bases de données images et descriptives, mais aussi de les gérer. En 1981, le système devient opérationnel, alors qu'aucun logiciel de SIG n'a encore été mis sur le marché. Marseille, pionnière en SIG, devient un exemple visité par les représentants de nombreuses villes françaises ou étrangères. La même année, la ville transmet son savoir-faire à Toulouse. ICOREM sera absorbé par la ville en 1997. Au début des années 2000, le logiciel Geoconcept remplace CARINE qui sera tout de même utilisé pour la gestion des bases de données jusqu'en 2004. La ville ne gère pas les réseaux EDF, GDF et France Télécom. Marseille, qui s'étend sur une superficie de 240 km<sup>2</sup> et compte 800 000 habitants va s'intégrer à partir de 2001 dans la communauté d'agglomération MPM (Marseille Provence Métropole), 600 km<sup>2</sup> et 1 000 000 d'habitants. L'effort actuel est porté sur une mise en cohérence entre le cadastre et l'orthophotoplan avec une précision de 0,18 m. Début 2008, il n'y a pas encore de modélisation 3D de l'agglomération.



## ■ Nice

Nice est une des villes qui peut être citée en exemple dans sa rigueur de gestion d'un SIG. En 1994, commencent la numérisation du cadastre et le lever des corps de rue de la ville au 1/200. La ville ne tarde pas à mettre en place une station GPS fixe pour permettre aux géomètres de travailler dans un système de référence unique. Le SIG, géré par Arcview devient pleinement opérationnel en 2000. C'est l'une des rares villes à gérer tous ses réseaux : eau potable, eaux usées, eaux pluviales, éclairage public, électricité, gaz. Seuls les réseaux téléphoniques de France Télécom échappent à sa gestion. Une mise à jour continue par la cellule topographique est assurée par une liaison permanente avec les services chargés des travaux. La modélisation 3D est en cours depuis 2006.

## ■ Toulon

Un projet de SIG a été lancé en 1990 et il commença à être opérationnel en 1995. Le logiciel employé est un logiciel libre et non un logiciel propriétaire, ce qui laisse plus de liberté de choix et de méthode. Aujourd'hui, Toulon-Provence-Méditerranée (TPM), communauté d'agglomération de onze communes d'un total de 420 000 habitants supervise la structure toulonnaise, prenant à son compte l'occupation des sols (orthophoto), le parcellaire (cadastre) et l'altimétrie. L'action est mise sur la cohérence des différents documents graphiques pour obtenir partout une précision de 20 à 25 cm. La numérisation du cadastre des 33 communes de la région de Toulon est en cours, dans un format normalisé. Quant à la modélisation 3D, l'acquisition des données cartographiques a commencé en 2006 et 700 km<sup>2</sup> étaient livrés en 2007. Début 2008, 20 km<sup>2</sup> sont opérationnels. Cependant, chaque commune de l'agglomération garde ses gestions spécifiques (patrimoine, voirie, réseaux). (figure 11)



Figure 11. Schéma du SIG géré par l'agglomération de communes Toulon-Provence-Méditerranée. Chaque commune gère indépendamment son patrimoine et ses réseaux.

## ■ Le Havre

Le SIG de la ville a été envisagé dès 1990-91 et les premières acquisitions se sont faites en 1992, en particulier avec la DGI pour la numérisation normalisée du cadastre qui ne terminera ce travail qu'en 2002. Ce SIG commencera à devenir

opérationnel qu'en 1996. La modélisation 3D a été envisagée dès 1999 et les premières acquisitions sont faites à partir de 2001 lors de projets urbains, en particulier en 2002 lors de la rénovation de la partie historique de la ville. Le logiciel 3D studioMax compatible avec Autocad est alors utilisé pour être intégré au SIG ArcGIS. Soixante projets immobiliers seront ainsi inclus dans le SIG entre 2001 et 2007. Ces modèles 3D réalisés lors des projets urbains ont permis de mieux définir les spécifications techniques et le modèle 3D de la ville est opérationnel en 2006. En 2007, les 60 km<sup>2</sup> de territoire restitués comptent 65 661 bâtiments totalisant 360 000 facettes de toit ! La précision des points est de 0,4 m.

## ■ Montpellier

Montpellier est sans doute la grande ville française qui a la plus forte expansion démographique. Paradoxalement, c'est l'une de celles qui est restée le plus à la traîne pour les SIG. La numérisation normalisée du cadastre par la DGI ne commença que vers 1996. Au début des années 2000, l'arrivée de M. Perdrizet qui venait de lancer la modélisation 3D du Havre, allait permettre de passer directement à la constitution d'un SIG avec modélisation 3D. Dès 2003, des prises de vues aériennes étaient prises en vue d'une restitution détaillée de la ville étalée sur trois ans avec une précision des pointés de 0,1 m. 57 km<sup>2</sup> de territoire étaient couverts.

Différemment de la ville neuve du Havre, la vieille ville de Montpellier comporte beaucoup de rues étroites interdisant les prises de vues aisées des façades. Méthode innovante, les prises de vues aériennes comportent un recouvrement de 66 % dans les deux sens, ce qui permet de voir un bâtiment de huit points de vue différents. Opérationnel depuis 2007, le SIG placé sur intranet permet une visualisation par les différents services de la commune et il sera visible sur Internet fin 2008 - début 2009. Une prise de vue aérienne annuelle est prévue pour une mise à jour.

## ■ Saint-Quentin-en-Yvelines

Regroupe une communauté d'agglomération de sept communes d'un total de 150 000 habitants et couvrant 72 km<sup>2</sup>. Le SIG a été mis en place à partir de 1990 avec le logiciel STAR APIC qui gère aussi les documents graphiques et Oracle pour les données alphanumériques. Ce qui semble une première en France, il a été disponible sur Internet à partir de 1998. La modélisation 3D initiée en 2002 commence à être opérationnelle en 2004, elle touche 35 000 bâtiments et 35 000 arbres. Elle s'est faite à partir de points lidar (4 par m<sup>2</sup>) et de photogrammétrie. Elle est complétée au fur et à mesure par les modèles plus élaborés issus des nouveaux projets. Zone d'urbanisation récente, l'installation des nouveaux réseaux en tranchées permet à la communauté d'avoir tous les réseaux, y compris ceux de l'EDF-GDF et France Télécom, différemment de nombreuses autres communes ou agglomérations.

## ■ Rennes

Rennes compte parmi les villes pionnières en matière de SIG. Dès le début des années 1980, une collecte des informations



► géographiques était faite sur Ascodes de JS Info. En 1991 ESRI (ArcGIS, ArcInfo 6-7) est adopté pour gérer les éléments de moyenne précision (0,5m) tels que le plan cadastral (PCM), l'urbanisme (PLU), les plans généraux. Ascodes est conservé pour gérer les données fines issues des levés de voirie 1/200 et des levés de réseaux faits au cours des travaux avec leur composante altitude. On peut estimer que 50% des réseaux de la ville entrent dans cette base de données. Son domaine public, 450 km de voies urbaines mais aussi les écoles, espaces verts, cimetières, etc. est totalement décrit dans une base de données unique de la précision des levés 1/200 (terminés en 1999) et réactualisé en temps réel. Choix politique délicat, car coûteux au moment de son déploiement, le SIG a prouvé depuis son efficacité. Il sert en interne aux services gestionnaires du patrimoine de la ville de Rennes, mais aussi à des partenaires externes (services de police, SDIS, etc.) et surtout aux gestionnaires de réseaux partenaires (FranceTélécom, EDF, Veolia, etc.) qui participent à l'enrichissement de la base de données. Dans le cadre actuel du projet de construction d'une nouvelle ligne de métro de 12 km, cet outil sert aux études préalables pour dévier les réseaux situés dans l'emprise de l'ouvrage. Le SIG 3D en cours croise une topologie des toits sur Ascodes avec les plans généraux et le MNT.

## Les bases de données IGN

Regroupées sous le Référentiel à Grande Echelle (RGE), l'IGN a constitué les bases de données suivantes :

### La BD Topo

Dans le cadre de la mise en place du référentiel à grande échelle (RGE), l'IGN se lance dans la BD TOPO en 1988, base topographique informatisée de précision métrique, inspirée par la volonté d'en déduire la carte 1/25000 par voie logicielle. En 1998, seuls 27 % du territoire ont été couverts, on entreprend alors la recherche de méthodes plus rapides et moins onéreuses, la France est couverte en 2005. L'utilisation de la composante BD Alti permet d'obtenir la perception du relief. Toutes les bordures de toit ont été numérisées, qui associées au MNT permettront d'avoir des perspectives urbaines 3D sur Géoportail. La DB TOPO est utilisable sur les SIG Geoconcept, Arcview et Mapinfo, tandis que Edigeo doit permettre des échanges avec d'autres SIG.

### La BD Ortho

La numérisation des photos, les progrès techniques concernant l'industrialisation des orthophotos permettent à l'IGN de se lancer dans la BD ORTHO en 1998. La couverture de la France est terminée début 2004, date à laquelle les caméras argentiques sont remplacées par des numériques. Dans les zones urbaines, la précision est de l'ordre de 0,5 m et de 0,25m dans une dizaine de villes. Ailleurs, elle est métrique avec une fourchette de 1,5 à 3 m en montagne. Cela explique que certaines communes aient fait faire leurs propres orthophotoplans.

### La BD Adresse

En 2001, l'IGN entreprend en collaboration avec la Poste une BD ADRESSE géoréférencée, associée à la base de GEOROUTE.

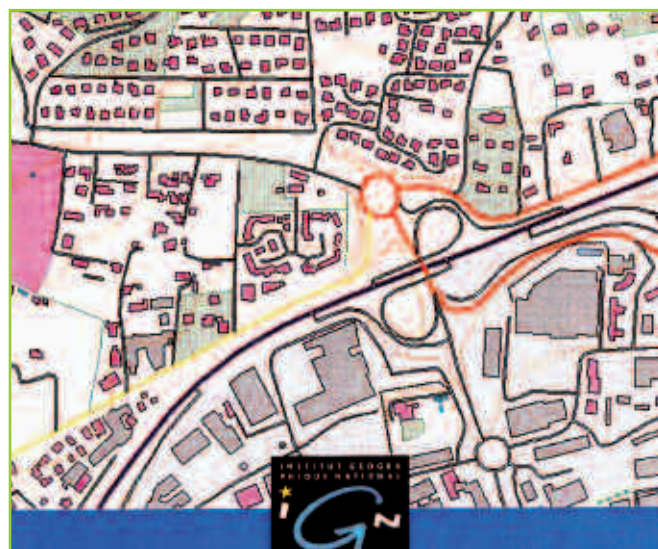


Figure 12. La BD topo telle qu'elle apparaît après avoir ouvert plusieurs couches qui se superposent. En cliquant l'un des objets (segment de route, maison) on peut faire apparaître une table attributaire que l'on peut compléter ou corriger en fonction de ses besoins.

### La BD Parcellaire

En 2001, est signée une convention de coopération entre l'IGN et la DGI pour la constitution de la BD parcellaire. La DGI fournit les plans vectorisés ou scannés à l'IGN qui les rattache au système de coordonnées national quand ils ne le sont pas, qui réalise la meilleure continuité possible entre ces données et qui assure la cohérence de ces données avec les composantes topographiques et orthophotographiques. Cette composante parcellaire est terminée en 2007. Mais, elle ne correspond pas toujours à ce qu'en attendaient certaines communes visant une meilleure précision et un emploi plus souple. Le programme 2008-2011 de l'IGN prévoit d'achever la vectorisation de cette BD parcellaire et la mise en œuvre de la convergence entre le plan cadastral informatisé (PCI) de la DGI et la base de données parcellaire de l'IGN, ce ne sera pas facile.

### GEOROUTE

La version 2 de cette base a été lancée en 1999 et décrit le réseau routier ouvert à la circulation en milieu urbain avec une précision métrique. Elle s'appuie sur la BD topo.

### GEOPORTAIL

Géoportail est un site destiné à être consulté librement sur Internet, il couvre toute la France métropolitaine ainsi que les départements et territoires outre-mer. Il a été décidé par décret le 22 novembre 2004. Mais déjà, depuis 2002, on pouvait consulter gratuitement le site IGN donnant les points géodésiques et les répertoires de nivellement de la France. Lancé en 2005, le site est entièrement opérationnel en décembre 2007 avec la composante 3D qui permet de voir les villes en perspective. Cette vision 3D peut être obtenue par le chargement gratuit du logiciel Terra Explorer.

Géoportail comporte des couches qui peuvent être superposées, telle la carte IGN, le plan parcellaire ou l'orthophoto-

The screenshot shows the Géoportail website interface. At the top, there is a header with the logo and the text "le portail des territoires & des citoyens". Below the header is a navigation bar with tabs: ACCUEIL, VUES, RECHERCHE, CATALOGUE, and SYMBOLES. A search bar is located in the center of the navigation bar. To the right of the search bar is a button labeled "Rechercher". Below the navigation bar is a sidebar on the left with a category list. The main area of the page displays a map of Toulon, France, with various geographical features and a red line indicating a specific route or boundary. The map is labeled "TOULON" in large letters.

## MAPPY - PAGES JAUNES

Il aurait été injuste de ne pas citer Mappy créé en 1987 et édité par la filiale de Wanadoo/France Télécom, tout d'abord disponible sur minitel. Il est aujourd'hui filiale des Pages Jaunes ; cela permet d'expliquer que l'on puisse cliquer la localisation d'un numéro de téléphone trouvé dans la consultation des Pages Jaunes. Mappy permet de prévoir et de calculer un

[illegible]

itinéraire routier avant un voyage ou encore de localiser graphiquement une adresse dans une localité. Grâce à une base de 6 000 000 de photos, la vue de nombreuses rues est associée à cette localisation. En 2006 un partenariat est signé avec l'IGN pour la couverture photo de la France entière. Au point de vue routier, Mappy couvre aujourd'hui 27 pays européens. Avec près de 6 000 000 de visiteurs uniques par mois, c'est l'un des sites français les plus fréquentés. Quel internaute ne l'a pas utilisé pour calculer un itinéraire avant de partir en vacances ou de se rendre à une adresse pour la première fois ?

■ *Hors de France*

Les pays pionniers dans la 3D et les SIG en Europe sont l'Allemagne et la Suisse. Ce sont justement ces pays, membres très actifs de l'ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) qui ont et continuent de développer et de proposer des structures 3D. Il faut aussi mentionner les Pays-Bas et l'Autriche également très actifs dans ce même registre et qui font partie des nations européennes les plus en avance. A titre d'exemple, je citerai ce qui s'est fait en Autriche.

A Vienne, la 3D et la modélisation de la ville ont commencé en 2004 pour être opérationnelles dans sa partie centrale (30 000 bâtiments en 2005). Aujourd'hui, 200 000 bâtiments sont modélisés ainsi que l'intégralité du métro, avec les normes CityGRID. Le modèle 3D de Vienne a été généré par une triangulation automatique des toits, puis par une extrusion des façades vers le sol. Le tout fonctionne avec ArcGIS. Le modèle 3D de la ville est utilisé en combinaison avec les éléments 2D du sol. Pour la visualisation en 3D, les éléments 2D sont adaptés au modèle de terrain.

A Klagenfurt, 30 000 bâtiments ont été modélisés aux normes CityGRID. La modélisation qui avait commencé en 2006 a été opérationnelle en 2007 pour le centre de la cité (15000 bâtiments). Le SIG fonctionne sous Geomedia.

A Linz, la modélisation du centre historique de la ville (1 000 bâtiments) faite durant l'été 2007 aux normes CityGRID est maintenant terminée. Le modèle sera étendu prochainement aux 50 000 bâtiments de la ville. (d'après Gerald Forkert)

### ■ Google earth et virtual earth

Initialement connu sous le nom de Earth Viewer, le produit a été développé par la société Keyhole, Inc. qui a été rachetée par Google en 2004. Il a été renommé Google Earth en 2005 et est depuis disponible pour les ordinateurs personnels équipés de Microsoft Windows 2000 ou XP, Mac OS X 10.3.9 ou supérieur, Linux (depuis le 12 juin 2006), et FreeBSD. C'est un logiciel permettant une visualisation de la terre avec un assemblage de photographies aériennes ou satellitaires. Il permet à tout utilisateur de survoler la Terre et de zoomer sur un lieu de son choix. Payant dans sa version Keyhole, son usage est maintenant gratuit. Plusieurs grandes villes peuvent être observées avec une résolution suffisamment élevée



► pour pouvoir distinguer individuellement chaque immeuble, maison et même voiture. Dans certaines villes telles que Paris, Londres, Washington et Seattle, il est même possible de distinguer les gens dans la rue. La résolution d'observation maximale des lieux géographiques dépend de leur intérêt, cependant toute la surface de la Terre a été photographiée avec une résolution d'au moins 15 mètres.

En 2006, Microsoft rachète la société Vexcel spécialiste en photogrammétrie tridimensionnelle. C'est ainsi qu'est né le projet Virtual Earth qui, début 2008 couvre une quinzaine de grandes villes américaine tandis qu'une centaine d'autres sont en cours de saisie.

## Conclusion

Aujourd'hui, les SIG ont acquis droit de cité et sont enseignés dans de nombreuses universités. En 2007, le Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM) a créé sa chaire de géomatique. Cela ne pourra qu'accélérer les recherches et de nombreux développements sont à prévoir dans un avenir proche. Cela m'amène à deux conclusions.

La première est optimiste. Tous les exemples traités ci-dessus, se rapportent aux grosses structures, soit étatiques (IGN, DGI), soit à des grandes communautés urbaines, soit encore à une diffusion des données à grande échelle. Mais avec le développement et la démocratisation qui ont suivi la micro-informatique, les Systèmes d'Information Géographiques sont devenus accessibles à des petites structures, telle une PME qui veut répertorier et classer ses clients par adresse, ou même à des particuliers. Je citerai à titre d'exemple le fichier sur cédérom des cavités karstiques du Var, réalisé par des spéléologues et qui regroupe actuellement 2000 grottes et gouffres. Il est rédigé sur le logiciel de base de données File Maker Pro sous sa forme runtime, ce qui permet à l'utilisateur de le consulter sans logiciel spécifique. Il comprend une fiche de renseignement et une topographie pour chaque cavité. Le géoréférencement des cavités permet de les télécharger sur le 1/25 000 numérisé Cartoexplorateur et le fichier sera bientôt consultable sur internet. Il concrétise l'importance que les SIG pourront prendre dans la société de demain. C'est pourquoi je le cite dans la bibliographie, afin de montrer les possibilités qu'offrent les applications informatiques d'aujourd'hui, même à un échelon modeste.

La seconde est pessimiste. Entre les chercheurs qui doivent justifier leur statut et la concurrence de plus en plus vive que se livrent les sociétés, les poussant à innover constamment pour prendre une avance sur les autres, ne sommes-nous pas engagés vers une fuite éperdue en avant ? Certaines innovations seront-elles guidées par une utilité réelle ou parce qu'elles sont techniquement possibles ? Je pense au malheureux exemple de l'avion supersonique Concorde. Aurons-nous des temps de pause suffisants pour assimiler les nouvelles techniques ou en amortir le coût ? Comme le sommeil, ces pauses sont nécessaires à l'équilibre humain. Attention à la névrose du "toujours nouveau" de notre société consumériste ! Malgré les bons côtés du progrès,

son emballement ne nous fait-il pas jouer les apprentis sorciers ? ●

## Remerciements

MM. Jacques Gaubert (Marseille), Michel Bernard (Esri France), Marc Bernard (Spot Image), Rolland Billen (Université de Liège), Olivier Banaszak (Le Havre), Laurent Charrier (St-Quentin-en-Yvelines), Denis Delerba (Nice), Alain Dupé (Toulon-Provence-Méditerranée), Rani el Méouche (ESTP), Gerald Forkert (Geodata Autriche), Franck Perdrizet (Montpellier), Joseph Morel (Rennes), Mathieu Koehl (INSA Strasbourg) pour ses commentaires lors de la lecture de la première mouture de l'article, ainsi que Roger Serre et Patrice Gaubert pour leurs commentaires.

## Bibliographie

**DENEGRE Jean, SALGE François, 1996, *Les Systèmes d'Information Géographique*, PUF, coll. Que sais-je ?, Paris**

**PAPARODITIS Nicolas, 1998, *Reconstruction 3D de paysages péri-Urbain en Imagerie Stéréoscopique Satellitaire Haute Résolution*, thèse soutenue à Cagnes-sur-Mer.**

**BORDIN Patricia, 2002, *SIG concept outils et données*, Lavoisier, Paris**

**COURBON Paul, LUCOT Jean-Pierre, 2005, *Le fichier sur cédérom du Var*, Spelunca n°100.**

**COURBON Paul, 2007, *Cinquante ans d'évolution topographique, l'informatique et le traitement des données*, XYZ n°112, pp. 29 à 36.**

XYZ n°114, 2008, dossier SIG : vers la généralisation de la 3D, avec les articles suivants :

**LAURINI Robert, SERVIGNE Sylvie, *Panorama des potentialités SIG en 3 dimensions : vers un modèle 3D virtuel des villes*.**

**BOUILLE François, *Méthodologie d'un montage de SIG 3D par des étudiants*.**

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

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

**BANASZAK Olivier, KOEHL Mathieu, *SIG et 3D au service des collectivités territoriales : l'expérience de la ville du Havre*.**

## Contacts

**Paul COURBON**  
paul.courbon@yahoo.fr

*Cet essai s'inscrit dans un devoir de mémoire. Il souligne et rappelle les percées technologiques actuelles qui ont demandé de longs efforts, de longues réflexions et une longue mise au point. Il sera prochainement disponible sur le site Internet de l'A.F.T. Aussi, toute remarque, critique, ajouts et compléments de la part de spécialistes seront les bienvenus.*



## Le 11 décembre 2008, l'AFT a célébré son trentenaire

C'est par un déjeuner servi le 11 décembre 2008, dans le salon Monge du restaurant des Arts du somptueux hôtel particulier des Ingénieurs des Arts et Métiers, 9 bis avenue d'Iéna à Paris, que le Conseil de l'AFT a célébré le trentenaire de l'Association.

Les membres du Conseil provisoire, élus lors de l'Assemblée Générale constitutive de l'Association tenue au siège de l'EDF il y a trente ans, le 15 décembre 1978, y avaient été conviés. Au nom du Président Michel Kasser (IGN-ENSG) empêché, MM. André Bailly (GDF) et Robert Vincent (Sté Fr. de Stéréotopographie), membres du Conseil actuel et déjà membres du Conseil de 1978, ont eu le plaisir d'accueillir M. Maurice Daugé (Sté du Canal de Provence) et Mme, M. Jean Puycouyol (Sté Wild, aujourd'hui Leica) et M. Jacques Fuhrer (Géomètre-Expert à Meudon).

Ces membres fondateurs ont été heureux de faire connaissance avec les conseillers actuels et de constater que l'Association qu'ils avaient créée était toujours active.

M. Louis Catinot (EDF) et Mme, et M. Raymond D'Hollander (IGN-ENSG) et Mme, empêchés au dernier moment, avaient



© Mme Daugé

De gauche à droite, au premier rang : Jean Puycouyol, Robert Vincent, Jacques Fuhrer, au second rang : Maurice Daugé, Edmond Barbacanne, André Bailly.

adressé une lettre pour s'associer à la fête. Le souvenir des regrettés disparus a été évoqué : M. Roger Schaffner (AFTRP), André Ménier (Géomètre-Expert et photogrammètre à Meylan-Grenoble) et Yves Alajouanine (Sté Wild, Lyon). ●

### COMITÉ DE LECTURE

**BAEHR Hans-Peter**, Université de Karlsruhe  
**BAILLY André**, Ingénieur ESTP  
**BILLEN Roland**, Université de Liège  
**BORDIN Patricia**, ENSG  
**BOTTON Serge**, ENSG  
**BOURGOIN Jean**, Ingénieur Général Hydrographe  
**BRETAR Frédéric**, Laboratoire MATIS, IGN  
**CHRISMAN Nicholas**, Université Laval, Québec  
**DEBARBAT Suzanne**, Astronome Observatoire de Paris  
**DISSARD Olivier**, ENSG  
**D'HOLLANDER Raymond**, Ingénieur Général Géographe, IGN  
**DONNAY Jean-Paul**, Université de Liège  
**DRAP Pierre**, Chargé de recherches CNRS  
**DUQUENNE Henri**, IGN  
**DUQUENNE Françoise**, IGN  
**DURAND Stéphane**, ESGT  
**FERHAT Gilbert**, INSA de Strasbourg  
**GRUSSENMEYER Pierre**, INSA de Strasbourg  
**HENO Raphaële**, ENSG  
**HENRY Jean-Baptiste**, LNE

**HOMBROUCK Laurent**, Ingénieur ENSAIS, Grenoble  
**KASSER Michel**, Directeur ENSG, IGN  
**KOEHL Mathieu**, INSA de Strasbourg  
**LANDES Tania**, INSA de Strasbourg  
**MAILLARD Jean-Pierre**, Urbaniste, Géomètre-Expert Foncier  
**MAYOUD Michel**, Ingénieur ESGT  
**MERMINOD Bertrand**, Professeur EPFL, Lausanne  
**MOREL Laurent**, ESGT  
**NATCHITZ Emmanuel**, ESTP  
**NICOLAS Joëlle**, ESGT  
**PANTAZIS N. Dimos**, Technological Education Institution (TEI), Athènes  
**POLIDORI Laurent**, Directeur de l'ESGT  
**RAVEZ Bertrand**, Bouygues TP  
**REIS Olivier**, Ingénieur ENSAIS  
**RIFFAULT Jacques**, Directeur Commercial  
**ROCHE Stéphane**, Université Laval, Québec  
**RUAS Anne**, Chef du Cogit, IGN  
**VINCENT Robert**, Ingénieur ECP  
**WILLIS Pascal**, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées

### PUBLICATIONS DE L'AFT

- *Sciences géographiques dans l'Antiquité*  
Raymond D'Hollander - 55,10 €
- *Mesurer la Terre 300 ans de géodésie*  
Jean-Jacques Levallois - 41,10 €
- *Lexique topographique* - 15,20 €

Après déménagement et suite au reclassement de ses archives L'AFT dispose de plusieurs collections complètes de la revue XYZ du n° 1 au n° 117 disponible à la vente.

**Les personnes intéressées sont invitées à se renseigner au 01 43 98 84 80 le mardi et le jeudi de 10 h à 12 h et de 14 h à 18 h ou par courriel : [info@aftopo.org](mailto:info@aftopo.org)**

## De Lussigny : la musicalité du carré Di Suvero : l'œil sur la poutre

■ Jean-Pierre MAILLARD

*Dany Boon et son film "Les Ch'tis" ont changé le regard de bon nombre sur la région du Nord-Pas-de-Calais et ce n'est que justice. Les amateurs d'art, eux, connaissent depuis longtemps la richesse patrimoniale et culturelle des deux départements notamment héritée des temps glorieux de la Flandre et de l'Artois.*

Dans cet élan, même le domaine de l'art et de la géométrie est tout autant foisonnant d'artistes et de lieux d'exposition qui leur sont consacrés. XYZ s'est déjà intéressé au fonds Auguste Herbin du musée Matisse au Cateau-Cambrésis et à l'espace public de Valenciennes jalonné de sculptures géométriques notamment réalisées par Norman Dilworth, Mark di Suvero et Jean-Bernard Métais.

Le musée d'art moderne de Villeneuve-d'Ascq et celui d'art contemporain de Dunkerque recèlent aussi leurs lots d'œuvres construites et méritent une visite. Pourtant il convient en premier de faire connaissance avec celui de Cambrai. En effet son musée municipal et la ville elle-même constituent tout autant un des lieux significatifs de l'abstraction géométrique, dont le rayonnement déborde largement la région. Pour sa part et fort de ces trois cent quatre-vingt-cinq œuvres, l'équipement culturel s'honore, dans cette spécialité, d'avoir atteint le quatrième rang au niveau national après le centre Pompidou à Paris, le musée de Grenoble et l'espace de l'Art concret de Mouans-Sartoux (Alpes-Maritimes). Cette vocation s'est finalement imposée avec la volonté des édiles locaux et finalement l'acceptation par la municipalité de deux donations, respective-



Musée municipal de Cambrai.

ment celles d'Eva-Maria Fruhtrunk et André Le Bozec. Liés à des artistes s'exprimant par l'art construit respectivement Günter Fruhtrunk et Guy de Lussigny, ce dernier justement originaire de Cambrai, les deux mécènes ont chacun constitué une collection au cours des cinquante dernières années, chacune faisant aujourd'hui le bonheur du musée de Cambrai. L'origine allemande de Mme Fruhtrunk apparaît nettement dans ses choix d'œuvres étant cependant observé que le recouplement des collections met en évidence un intérêt commun pour une trentaine d'artistes. (1) Chacune affectée à une collection, deux salles du musée sont réservées à la présentation d'une sélection des réalisations d'"Art construit – Art concret" (pour reprendre la terminologie retenue) ensembles de peintures et sculptures qui reflètent le goût des donateurs. L'abstraction géométrique est complétée dans une troisième salle par l'accrochage de peintures de Geneviève Claisse, autre enfant du département.

La collection d'André Le Bozec fait la part belle aux œuvres de Guy de Lussigny dont il était l'ami. A partir de la ligne droite, du carré et en faisant jouer

la couleur, de Lussigny crée à partir d'un langage plastique sobre et précis, une peinture faite d'élégance, de discrétion et de poésie. Le goût de l'artiste pour le carré est manifeste puisque nombre de ses toiles s'inscrivent dans ce format. Dans plusieurs tableaux, le peintre joue largement avec la figure dont la répétition apparemment aléatoire est perçue comme autant de notes sur une partition moyenâgeuse évanescence. Dans ces œuvres, on remarque souvent la présence d'un carré de couleur discordante pour appeler à la réflexion et celle d'un trait fin, rehaut du sujet, sorte de baguette du chef d'orchestre donnant le ton. Ainsi, la référence à la musique est explicite notamment à celle du compositeur Claude Ballif dont il écoutait les compositions en peignant. Dans une estime réciproque, Claude Ballif, élève d'Olivier Messiaen puis professeur reconnu du conservatoire de Paris de 1971 à 1990, aimait à s'entourer de peintures de Guy de Lussigny qui, au travers d'une recherche d'équilibre et d'une harmonie tout en nuances, invitent à la méditation. Le musicien s'est fait connaître par son ouvrage : Introduction à la métatonalité et par son attrait pour la musique sacrée.

L'observation attentive du travail du plasticien montre son respect de la peinture ancienne en ayant le soin comme ses maîtres d'effacer jusqu'à la trace du pinceau. De même il joue sur l'épaisseur des couches de chaque surface unitaire pour faire apparaître des bas-reliefs naissants.

Une toile signée Guy de Lussigny retient l'attention du géomètre.

(1) Les deux collections font chacune l'objet d'un catalogue disponible au musée de Cambrai  
[www.villedecambrai.com](http://www.villedecambrai.com)



## Sans titre "Ref. 127 MI"

Présentée horizontale, l'œuvre pourrait mieux s'inscrire dans les critères de musicalité développés ci-dessus. Sa verticalité renvoie tout autant à la mesure, sans rapport avec le solfège, mais métrique cette fois. Au-delà de la composition ton sur ton mise en valeur par un cadre américain, composition qui pourrait se suffire à elle-même, il est difficile de ne pas voir la partie d'une mire dépouillée de l'indication de ses cotes, un prétexte du code-barres.

## Guy de Lussigny

Guy de Lussigny est né à Cambrai en 1929 et mort à Paris en 2001. Il commence à peindre dès 1950 en s'inscrivant dans la lignée de Piet Mondrian, Kazimir Malevitch ou Auguste Herbin qui décomposent la toile en formes colorées jouant sur les rythmes plastiques et les équivalences formelles. Dès 1960 il expose en France et à l'étranger. De 1969 à 1975, il travaille aux côtés de la galeriste parisienne Denise René dans le but de rendre accessible à de nouveaux publics la

création la plus contemporaine. En 1996, de Lussigny reçoit le Prix Dumas-Millier attribué par l'Institut de France et l'Académie des Beaux-Arts. Jusqu'à la fin de sa vie, Guy de Lussigny a recherché par la peinture à exprimer la sérénité et l'apaisement comme pour exorciser son état tourmenté. Son invitation à la contemplation lui survit. Une autre manifestation de la culture contemporaine s'expose dans l'espace public.



## Pour le poète inconnu

En centre-ville, on peut observer, place Saint-Sépulcre, une nouvelle œuvre en acier qui démontre la force, la rigueur et finalement l'esthétisme du dessin industriel. La couleur rouge de l'installation rehausse la perception de la place richement bordée de trois édifices remarquables : la cathédrale Notre-Dame, la chapelle du grand séminaire et la maison espagnole, siège de l'office de tourisme. L'équerre et le cadran sont les formes de base de la sculpture composée de trois éléments métalliques pesant chacun environ 600 kg. Créée en 1996 au chantier naval de Chalon-sur-Saône elle a été mise en dépôt en 2007 pour quelques années.

## Mark di Suvero

Né en 1933 à Shanghai de parents italiens d'origine vénitienne Mark di Suvero a un parcours autodidacte formé à la dure école du bâtiment et des chantiers navals à San Francisco où ses parents se sont installés après la deuxième guerre mondiale. Son approche de la sculpture passe également par une période globe-trotter à vélo, en bateau jusqu'à s'y consacrer pleinement. Sa vie d'artiste s'organise alors autour d'ateliers, en réalité des chantiers avec grue, leur embranchements fer ou la proximité d'une rivière : Petaluma en Californie, Chalon-sur-Saône et Long Island city à New York, son actuel port d'attache. François Barré résume bien la réussite de Mark di Suvero : *"L'Unité (de ses pièces) naît de la rencontre fondatrice d'éléments hétérogènes, nœuds, cercles, fuseaux, équerres, croix, ellipses, tétraèdre, dont la pérennité ne saurait être hors de cette union. Une syntaxe, une langue se construisent. L'oubli de l'un, son léger déplacement remettrait en cause la totalité, le ferait disparaître".* C'est dire l'aboutissement d'un créateur "hors d'échelle" qui continue à arpenter le monde en implantant ici puis là ses installations.

Avec Guy de Lussigny, Geneviève Claisse et Mark di Suvero, Cambrai vit avec son temps. Déjà haut lieu de la confiserie avec ses célèbres bêtises, l'archevêché du Nord pourrait bien devenir celui de l'art de la géométrie. ●

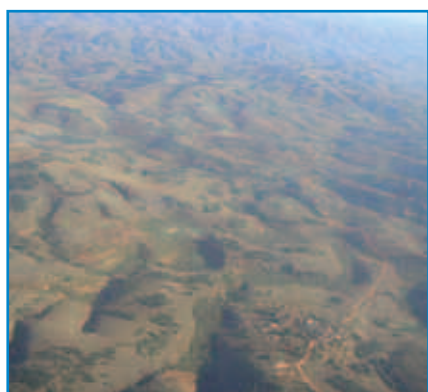


# Géomètres Sans Frontières : dépaysement et aventure humaine assurés

■ Claire GALPIN

*Généreux et passionnés sont les étudiants de Geotopo international. Trois groupes de 4 à 8 étudiants de l'ESGT préparent leur départ estival pour Madagascar, Burkina Faso et Burundi, destinations que GSF soutient cette année.*

## Madagascar



Voilà un échange qui perdure depuis plusieurs années. Il se compose de deux volets : d'une part le partenariat avec l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA) qui permet d'assurer des travaux pratiques et d'autre part le volet aide au développement qui conduit le groupe à réaliser des travaux topographiques pour une association caritative locale tout en intégrant des étudiants malgaches de l'ESPA. Cette année il s'agit d'une équipe de 8 étudiants soutenant deux associations, ASA et IDEES.

Les années passées ils ont amené du matériel topographique et des logiciels collectés auprès de généreux donateurs (géomètres-experts, fournisseurs, etc.)

Les informations ne sont pas très encourageantes pour le moment mais la situation peut rapidement s'arranger.

## Burkina Faso

C'est la seconde édition de ce projet porté par GSF grâce à François Bodin et Gérard Volte et soutenu par l'OGE très actif dans le soutien au futur Ordre burkinabé.

Cette année un géomètre-expert de Nantes a donné du matériel topographique qui sera acheminé par les étudiants qui non seulement assureront la formation de géomètres burkinabés sur ces outils mais soutiendront quelques projets humanitaires en réalisant les plans topographiques.

## Burundi

C'est un nouveau projet qui voit le jour au sein de GSF.



Le Burundi est un des premiers pays d'Afrique des Grands Lacs en terme de densité de population et c'est un pays essentiellement agricole puisque 90 % de la population vit de l'agriculture. Il



est investi dans un processus de réconciliation après la guerre qui a ravagé le pays.

Le gouvernement en place a pris conscience que le problème foncier est crucial. Sous la houlette de l'Union européenne, d'USAID et de la coopération suisse, une lettre de politique foncière a été rédigée. Elle met notamment en place un processus de gestion foncière décentralisée qui fait l'objet de deux projets pilotes à Ngozi et Gitega.

Le besoin en formation est immense et les étudiants qui partent sur ce projet vont œuvrer dans ce sens, tout en participant à des opérations de délimitation sur le terrain. ●

**Nous espérons que quelques volontaires tentés par une aventure africaine viendront rejoindre les rangs de GSF afin de transmettre leur expérience, leur foi en l'humanité et réapprendre à prendre le temps pour faire mentir le proverbe africain "Vous avez la montre nous avons le temps".**

Pour nous contacter  
GSF

[claire.galpin@wanadoo.fr](mailto:claire.galpin@wanadoo.fr)

Geotopo international  
[geotopo.internat@hotmail.fr](mailto:geotopo.internat@hotmail.fr)

# Vous reprendrez bien un peu de désert ?

■ Robert CHEVALIER

*Encore quelques souvenirs de voyage professionnel. Nous sommes cette fois en Jordanie en 1979, pour un appel d'offres international, concernant des études et travaux de construction de lignes électriques THT. La mission de reconnaissance se compose de trois personnes, dont un anglophone, chacun compétent dans son domaine, pour moi naturellement la topographie. Le voyage en direction d'Amman est ponctué d'un arrêt à Beyrouth, que nous survolons à basse altitude, permettant de voir les dégâts causés par des actes de guerre récents (déjà !). Durant l'escale, il est hors de question de sortir de la cabine, ne serait-ce que pour prendre l'air sur la passerelle ; l'avion est gardé militairement et on sent qu'il ne faut pas plaisanter.*



Relief lunaire dans l'intérieur.

**A**rrivée à Amman, capitale du royaume hachémite où nous serons logés dans de très bonnes conditions, ce qui n'est pas toujours le cas.

La ville est assez attrayante, bâtie sur plusieurs collines, ce qui donne du recul au panorama, avec des constructions très homogènes, ponctuées de nombreux vestiges de l'époque romaine. (C'était l'ancienne cité de Philadelphie) Les abords sont parsemés tristement de nombreux camps de réfugiés palestiniens.

Je ne sais par quelle filière notre direction avait déniché un correspondant local, ce qui normalement constitue toujours une aide précieuse. Il s'agissait en l'occurrence d'un cabinet d'affaires jordanien, dont le patron se présentait comme un cousin du roi, ce qui pouvait être utile. Vrai ou faux, mais nous apprendrons bien plus tard qu'il monnayait aussi ses services auprès d'une entreprise concurrente, ce qui fait qu'il n'était pas digne de confiance ; hélas, nous le saurons bien trop tard. Ce sont les pièges de ce genre de business... Il vaut mieux que les directions ne s'immiscent pas dans ce type de problèmes. Première préoccupation : nous apprenons qu'il existe des cartes au 1/50 000 qui pourraient nous faciliter grandement la tâche. En tant que spécialiste, je me mets donc en quête de ces précieux

documents. On me conseille de m'adresser au ministère des transports, où je suis, pour respecter la tradition locale, fort bien reçu avec thé à la menthe, etc. Mais cette administration ne peut délivrer les cartes qu'avec l'accord de l'armée (documents stratégiques, sans doute !).

Après avoir rencontré plusieurs interlocuteurs de grade de plus en plus élevé, j'atterris chez un colonel. Accueil toujours chaleureux, éternel thé à la menthe, mais j'apprends qu'il faut l'aval d'un autre ministère, l'aménagement du territoire, je crois, puis on me renvoie sur le tourisme, ou quelque chose comme ça, qui ne peut rien décider sans l'accord du ministère des transports. Je ne suis plus très sûr que ça se soit déroulé dans cet ordre, mais la boucle est bouclée, je reviens à la case départ et comprends que je n'aurai jamais les précieuses cartes, puisque tout le monde se renvoie la balle.

Tout ça m'a fait perdre exactement deux jours pleins, en comptant toutes les attentes interminables dans chaque service. C'est ça l'Orient, il faut de la patience, encore et toujours de la patience.

Nombreuses réunions en particulier chez notre correspondant, le tout en anglais puisque aucun de nous ne parle arabe. Mon anglais étant plutôt basique, j'arrive à peu près à suivre les conversations, en tout cas beaucoup

mieux que quand je parle avec de vrais Anglais et surtout des Américains (question de prononciation sans doute). Heureusement, quand je patauge trop, il y a mon collègue britannique et un Libanais, je devrai dire l'éternel Libanais de service, qu'on retrouve partout, soit dans le commerce, soit dans l'interprétariat. Celui-ci est parfaitement francophone comme il se doit !

Pour nos investigations sur le terrain aux abords d'Amman, le "cousin du roi" nous fait l'honneur de nous prêter son Range Rover personnel, ce qui ne nous est pas d'un grand secours, car les accès sont faciles dans cette zone péri-urbaine. Il nous aurait été autrement utile pour la reconnaissance dans l'intérieur du pays, à peu près partout désertique... faute de mieux, on se contentera d'une berline standard, louée chez Avis.

Nous faisons un ultime briefing avant la mise en route de cette opération. On nous propose de nous adjoindre un Jordanien, ce qui s'avèrera très utile, car dans le désert on ne parle que la langue nationale. Je suggère que ce soit plutôt le Libanais ce qui m'arrangerait bien ; d'autant plus qu'on avait sympathisé. Mais le "cousin" lève les yeux au ciel en disant que si nous avions des problèmes, celui-ci serait un problème en plus. Apparemment ses seules qualités sont celles de polyglotte !



Puisqu'on parle de langues, un de mes collègues, à peu près aussi doué que moi s'escrime un jour à vouloir parler anglais. Silence poli, puis un des Jordaniens dit : Sorry, we don't speak spanish ! Un peu gênant...

Entrons dans le vif du sujet : la reconnaissance sur le terrain. Nous commençons par nous acheter tous des keffiyeh, la coiffure nationale, immortalisée par Yasser Arafat, à la fois pour se fondre dans la masse, et pour se protéger du soleil, très ardent. Cette phase de la mission sera facilitée par l'existence de quelques relais touristiques assez bien répartis géographiquement, ce qui nous permettra de régler le problème de l'hébergement aux différentes étapes.

La première se fera à Kerak, avec son superbe château-fort datant des croisés, mais que nous n'aurons pas le temps de visiter. Nous ne sommes pas en voyage touristique... Puis nous couchons à Pétra, magnifique cité troglodytique datant des Nabatéens, qui se trouve sur notre itinéraire. L'hôtel-relais est lui-même creusé dans le rocher.

Là, nous ne pouvons pas rater ça ! On prend quelques heures de notre précieux temps, pour visiter cette merveille. Dans le prix du billet d'accès au site est comprise la fourniture d'un cheval, car il y a quelques kilomètres à parcourir dans le Siq, un défilé très étroit parsemé

d'éboulis. Je ne suis pas très à l'aise sur ma monture, dépourvue de selle et d'étriers, juste une couverture et des morceaux de ficelle, c'est à peu près aussi difficile pour moi que l'emploi de la langue anglaise ! A l'époque aucun touriste, ce qui accroît l'impression de dépaysement et de majesté du lieu.

Nous sommes aussi amenés à longer la Mer Morte, sur la rive jordanienne, non aménagée. J'avais fait le pari de m'y baigner, mais quand je trempai prudemment ma main dans l'eau, je découvris un liquide saumâtre, poisseux, une sorte de soupe dans laquelle je renonçai à accomplir l'enjeu de mon pari, d'autant plus qu'il n'y avait aucune possibilité de se doucher ensuite. Ça m'a coûté une tournée générale !

Comme toujours dans ce genre d'intervention nous ferons quelques rencontres étonnantes.

En voici une, représentative de la mentalité locale. Nous repérons une cabane isolée, habitée par un couple de bédouins, sédentarisés. Comme il est d'usage et par politesse, on s'approche et on engage la conversation grâce à notre collègue jordanien.

Accueil très chaleureux, comme toujours avec l'étranger, l'homme ne sait que faire pour être agréable. Il va chercher dans la cabane une cuvette ébréchée et plutôt douteuse, remplie de lait, dans lequel flottaient quelques mouches. Il nous montre que nous devons boire à tour de rôle en faisant circuler le récipient à la cantonade. Evidemment nous faisons le geste de boire, mais personne ne s'y risque, d'autant plus qu'un collègue plaisantin nous souffle que la cuvette doit servir aussi pour les ablutions intimes de la dame, peu ragoûtante au demeurant. Par chance notre ami jordanien sauve l'honneur en ingurgitant presque tout. Comme l'ambiance est détendue, je fais comprendre que j'aimerais faire une photo de nos hôtes dont l'habillement est très pittoresque. Mais le mari, un peu macho (dans ces pays le sort des femmes n'est pas très enviable) renvoie sa femme sans ménagement dans la cabane, dont il ressort, catastrophe, vêtu d'une veste à l'européenne, qu'il devait mettre dans les grandes occasions, infiniment moins typique que sa tenue de bédouin.

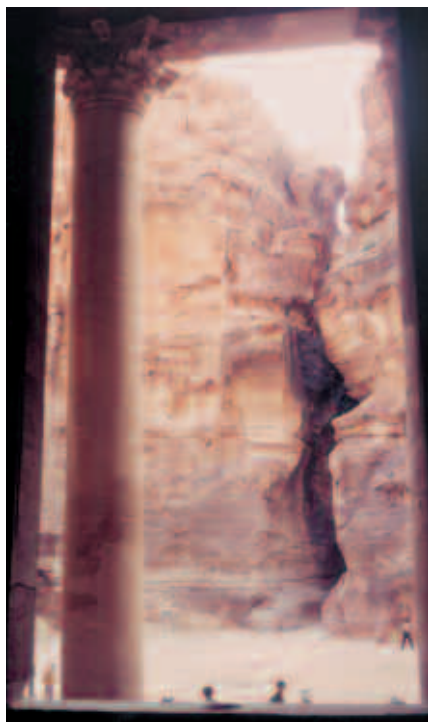
Mais ce n'est pas tout ! Lois de l'hospitalité obligent : Il nous explique qu'il va tuer un mouton en notre honneur. Il devait en posséder une demi-douzaine et c'était toute sa fortune... Quelle incroyable générosité ! On fait mentalement une rapide estimation : tuer le mouton, le dépecer, le faire cuire puis le manger... On y est pour une bonne partie de la journée ! Mais comment faire comprendre nos impératifs d'horaires à des gens qui vivent en dehors du temps et pour qui celui-ci n'a aucun sens.

Je n'oublierai jamais le regard déçu, voire désespéré de ce pauvre homme qui n'y comprenait rien et qui a dû nous prendre pour des sauvages !

On voit une fois de plus que dans ces régions, ce sont ceux qui n'ont rien qui donnent tout ! Cette aventure nous rendra prudents à l'avenir. Lorsque nous verrons de loin des tentes de nomades, nous ferons lâchement un large détour.

D'autant plus que j'avais lu dans un ouvrage très sérieux, que ceux-ci pour honorer leurs hôtes avaient pour coutume de sacrifier un chameau (de mieux en mieux) pour offrir le foie tout cru et tout chaud, le meilleur morceau paraît-il ! Non merci, franchement.

C'était peut-être une légende ou un usage passé de mode, mais qui sait ? Nous verrons surtout ces bédouins



Le siq entrée du site de Petra.



Notre "ami" bédouin.





### La mission à Petra.

dans le légendaire désert du Wadi-Rum, théâtre des exploits de Lawrence d'Arabie, magnifique par les couleurs changeantes selon les horaires, des rochers qui le parsèment.

On y croiera des hommes de la police du désert, qui se déplacent à dos de dromadaire et qui sont très impressionnants dans leurs magnifiques tenues blanches et keffiyeh rouges, la poitrine barrée de cartouchières, ce qui leur donne un air faussement farouche.

En effet et là aussi, c'est l'hospitalité traditionnelle. On s'accroupit autour d'un petit réchaud sur lequel ils préparent le thé pour tout le monde en devisant gaiement. Je n'ai encore jamais vu chez nous un gendarme m'offrant le thé sur le bord de la route. Autres pays, autres mœurs... Qui sont les plus civilisés ?

Notre périple se termine à Aqaba, sur la mer Rouge, station touristique bien modeste à l'époque, sans intérêt particulier, si ce n'est la beauté de ses fonds sous-marins, magnifiés par la transparence de l'eau, mais que nous n'aurons pas le loisir d'apprécier depuis les bateaux à fond de verre. Juste une rapide baignade en souvenir et pour se rafraîchir, car la température est très élevée.

Durant tout ce circuit, qui s'avérera entièrement désertique, c'est moi qui conduis, comme à l'accoutumée et à l'époque, c'était d'une manière, disons vigoureuse ! Là-bas les gens roulent plutôt lentement (70-80 km/h) aussi notre collègue jordanien a l'air terrorisé

quand il me voit doubler tout le monde (en fait peu de monde...) à des vitesses que loi et raison réprouvent. Ça avait quand même dû l'impressionner favorablement car j'eus droit à ce compliment à l'arrivée : *"You are a very good driver !"* Je n'en tire aucune gloire, car le temps étant toujours compté, on ne pouvait se permettre de traîner sur la route. Je pense cependant qu'il doit en parler encore !

Bizarrement les conducteurs qui vont être doublés, mettent leur clignotant du côté du dépassement, ce qu'on interprète comme une invitation à passer, mais à prendre toujours avec beaucoup de précautions ! Quand on se déplace en voiture, il faut aussi faire l'effort minimum d'apprendre à lire les chiffres en arabe, sinon il est bien difficile de comprendre les indications des pompes à essence, quantités délivrées et bien sûr prix à payer.

Retour à Amman, pour quelques ultimes contacts. Mais le lendemain est un vendredi, jour férié dans les pays islamiques, on ne peut rien entreprendre.

On décide de s'offrir un petit plaisir en envisageant un saut à Jérusalem, pas très loin. Il faut obtenir un laissez-passer provisoire à l'ambassade où l'on nous déconseille d'y aller avec notre voiture de location. On retient donc un taxi pour partir aux aurores jusqu'au fameux pont Allenby, qui enjambe le Jourdain, frontière naturelle avec Israël. Côté jorda-

nien, le poste frontière se limite à une simple cabane avec un policier débonnaire, armé de son seul pistolet. De l'autre côté ce sera une autre affaire !

Une navette venant d'Israël, surtout utilisée par les travailleurs frontaliers, nous emmène sous haute surveillance militaire jusqu'à leur poste de contrôle. Là, malgré un shalom chaleureux et sympathique, c'est une bonne heure consacrée à des fouilles et interrogatoires en tous genres, justifiés par le fait que nous venons d'un territoire arabe. On va jusqu'à me demander de prendre une photo avec mon appareil, mon seul bagage, pour s'assurer qu'il n'est pas piégé. Enfin, on pousse l'obligeance jusqu'à nous appeler un taxi avec qui nous montons un accord pour la journée, mais durant ce bref séjour, nous aurons constamment l'impression désagréable qu'on ressent dans un pays en guerre. Ça me rappelle l'ambiance qu'on ressentait en France en 1944...

Malgré l'immense intérêt de cette ville mythique, nous n'en profiterons que bien peu, car on apprend un peu tard, qu'il faut repasser la frontière avant 18 h et qu'elle est fermée tout le week-end. En outre, on aurait dû y penser, comme on est vendredi, la mosquée d'Omar, un des hauts lieux de cette ville est interdite aux non-musulmans. On la verra donc seulement de loin, mais nous pourrions visiter l'église du Saint Sépulcre et voir le mur des lamentations, c'est déjà pas mal, plus une balade dans la vieille ville et auprès des remparts.

Durant ce bref séjour, nous serons pilotés par un gamin plus ou moins francophone qui nous guidera efficacement dans la ville en nous évitant des pertes de temps et en nous abreuvant de conseils pratiques.

Retour tardif à Amman, fin de la mission.

Malgré l'énergie déployée et l'argent investi nous n'emporterons pas ce marché. L'adjudicataire sera une entreprise étatique roumaine, qui avait carrément cassé les prix, apparemment sans visite sur place, mais qui voulait absolument obtenir cette affaire pour des raisons purement politiques. Ce sont les inconvénients et les déconvenues du métier d'entrepreneur... On ne peut gagner à chaque fois ... ●

# RÉCRÉATION COSMOGRAPHIQUE N°3

## ■ Raymond D'HOLLANDER

On considère un point M situé à la latitude nord  $\varphi = 45^\circ$ . On y observe le soleil le jour du solstice d'hiver où sa déclinaison est  $\delta = -23^\circ 26'$ . On négligera l'effet de la réfraction et l'on traitera les questions ci-après :

- 1 - Calculer l'angle horaire  $-H'_L$  du soleil<sup>1</sup> par rapport au méridien de M, à son lever, le jour du solstice d'hiver, selon les méthodes ci-après :
  - a) Par la trigonométrie sphérique en résolvant le triangle de position.
  - b) Par la trigonométrie plane selon l'analemmes d'Hipparque<sup>2</sup>.
- 2 - Toujours au solstice d'hiver, en M, procéder aux déterminations ci-après :
  - a) Calculer l'heure solaire<sup>3</sup> du lever du soleil.
  - b) Calculer l'heure solaire du coucher du soleil.
  - c) Calculer la durée du jour théorique.
- 3 - Au solstice d'hiver, en M, calculer l'azimut topographique  $A'_L$  du soleil levant (compté à partir du Nord géographique), selon les deux méthodes ci-après :
  - a) par résolution du triangle de position,
  - b) par la trigonométrie plane.

4 - Au solstice d'hiver, en M, calculer l'azimut du soleil à son coucher :  $A'_C$ .

5 - Azimuts du soleil à trois instants de la journée du solstice d'hiver.

- a) Etablir la formule de trigonométrie sphérique donnant l'azimut du soleil en fonction de l'angle horaire d'un moment quelconque de la journée du solstice d'hiver (formule en cotangente). Vérifier par cette formule que pour  $-H = -H'_L$  obtenu en 1, on retrouve bien  $A'_L$  obtenu en 3.
- b) Dédurre de cette formule l'azimut du soleil 10 minutes après son lever.
- c) Dédurre ensuite l'azimut du soleil 4 heures après son lever.
- d) Dédurre l'azimut du soleil lors de sa culmination.

(1) On rappelle que pour un astre à l'est, l'angle horaire est compté négativement.

(2) Voir "Sciences géographiques dans l'Antiquité" par R. D'Hollander, pages 160 à 162.

(3) L'heure solaire vraie est celle obtenue avec un cadran solaire ou un astrolabe planisphérique.

## Solution de la récréation cosmographique n°2 (n° 117 d'XYZ)

## ■ Raymond D'HOLLANDER

### 1 - Détermination de z en fonction de $\varphi$ , $\delta$ et $-H$

Considérons le triangle de position de la figure 1 de la récréation n° 1 (n° 116 d'XYZ) et la formule fondamentale du triangle sphérique ABC :  $\cos c = \cos a \cos b + \sin a \sin b \cos C$ .

On en déduit pour le triangle de position ZPL :

$$\cos z = \cos (90^\circ - \delta) \cos (90^\circ - \varphi) + \sin (90^\circ - \delta) \sin (90^\circ - \varphi) \cos (-H), \text{ soit :}$$

$$\cos z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos (-H) \quad (1)$$

a) avec  $\delta = 23,433^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$  et  $-H = 113,185^\circ$ , on obtient :

$$\cos z = 0,02578 \text{ et } z = 88,52^\circ \quad (2)$$

$$\text{d'où la hauteur } h = 1,48^\circ$$

b) avec  $\delta = 23,433^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$  et  $-H = 55,685^\circ$ , on obtient :  $\cos z = 0,64695$  et  $z = 49,69^\circ$ ,

$$\text{d'où la hauteur } h = 40,31^\circ \quad (3)$$

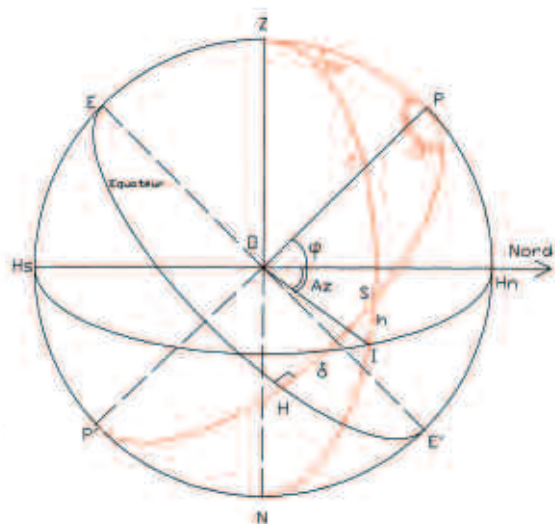
c) Dans la formule (1), faisons  $z = 45^\circ$ ,

$$\text{d'où } \cos z = \frac{\sqrt{2}}{2}, \text{ valeur commune à } \sin \varphi \text{ et } \cos \varphi.$$

Après simplification par  $\frac{\sqrt{2}}{2}$ , (1) devient alors :

$$1 = \sin \delta + \cos \delta \cos (-H)$$

$$\text{d'où : } \cos(-H) = \frac{1 - \sin \delta}{\cos \delta}$$



et avec  $\delta = 23,433^\circ$ ,  $\cos (-H) = 0,65646$  et  $-H = 48,969^\circ$ ,

$$\text{Soit } T = 180^\circ - (-H) = 131,031^\circ$$

$$\text{ou } T = 8,735^h \text{ ou encore : } T = 8^h 45^m \quad (4)$$



d) On peut calculer l'azimut A lorsque  $z = 45^\circ$  de deux manières :

- en fonction de  $z$  par la formule des sinus :

$$\frac{\sin A}{\sin \delta} = \frac{\sin \varphi}{\sin z}$$

Pour  $\delta = 23,433^\circ$ ,  $-H = 48,969^\circ$ ,  $z = 45^\circ$ , on obtient :  $\sin A = 0,97883$ , ce qui nous donne deux valeurs :  $A = 78,19^\circ$  ou  $A = 180^\circ - 78,19^\circ = 101,81^\circ$ .

La deuxième valeur est la bonne :  $A = 101,81^\circ$  (5)

- en fonction de  $-H$  seul, par la formule (6) de la solution de la récréation cosmographique précédente :

$$\tan A = \frac{\sin \delta \cos \varphi}{\cos \delta \sin \varphi}$$

Avec  $-H = 48,969^\circ$ ,  $\delta = 23,433^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ , on obtient :  $\tan A = -4,7831$ . Comme précédemment on obtient deux déterminations de A :  $-78,19^\circ$  et  $(-78,19^\circ + 180^\circ)$  qui convient  $A = 101,81^\circ$  (6)

Valeur identique à celle de (5).

## 2 - Détermination de $z$ en fonction de $\varphi$ , $\delta$ et A.

Soit la formule fondamentale de la trigonométrie sphérique :  $\cos c = \cos a \cos b + \sin a \sin b \cos C$ . Appliquée au triangle de position, elle donne :

$$\sin \delta = \sin \varphi \cos z + \cos \varphi \sin z \cos A \quad (7)$$

Formule dans laquelle l'inconnue  $z$  apparaît deux fois par son sinus et son cosinus. Mais, on peut résoudre l'équation en  $z$  en introduisant une variable auxiliaire  $\psi$ .

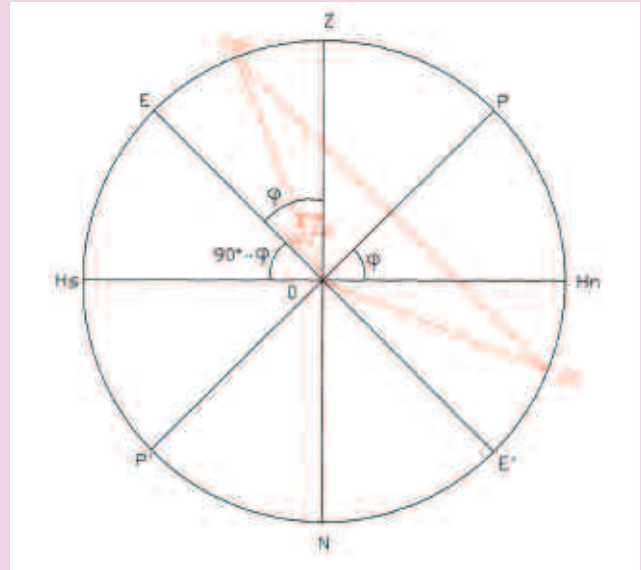
(7) peut s'écrire :  $\sin \delta = \sin \varphi (\cos z + \sin z \cot \varphi \cos A)$ , posons :  $\tan \psi = \cot \varphi \cos A$

Or  $\cot \varphi = 1$ , d'où  $\tan \psi = \cos A$  et :

$$\sin \delta = \sin \varphi (\cos z + \sin z \cos A)$$

on doit donc résoudre le système :  $\begin{cases} \sin \delta = \sin \varphi (\cos z + \sin z \cos A) \\ \tan \psi = \cos A \end{cases} \quad (8)$

a) Avec  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\delta = 23,433^\circ$  et  $A = 57,533^\circ$ , à partir de (8), on obtient :  $\psi = 28,228^\circ$  ce qui permet de calculer  $z = 88,52^\circ$  (9), identique au résultat obtenu par (2) en 1a.



b) Avec  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\delta = 23,433^\circ$  et  $A = 96,366^\circ$ , de la formule (8), on tire :  $\tan \psi = \cos 96,366^\circ$  d'où  $\psi = -6,327^\circ$ , on en déduit :  $z = 49,69^\circ$  (10), identique au résultat obtenu par (3) en 1b.

c) Considérons la formule fondamentale de la trigonométrie sphérique appliquée au triangle de position en (7). Vérifions que cette relation est satisfaite pour  $z = 45^\circ$  et A obtenu en (5) dans la question 1d), soit  $A = 101,81^\circ$ . On a :

$$\sin 23,433^\circ = \sin 45^\circ \cos 45^\circ + \cos 45^\circ \sin 45^\circ \cos 101,81^\circ$$

$$0,3977 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 101,81^\circ$$

soit  $0,3977 = 0,3977$  et il y a bien vérification.

## 3) Détermination de la distance zénithale du soleil à sa culmination, hauteur méridienne.

Représentons la section méridienne de la sphère locale. Le soleil culmine en  $S_{12}$  et il est clair que :  $z_m = \varphi - \delta$  (11), soit  $z_m = 45^\circ - 23,433^\circ = 21,57^\circ$  (12)

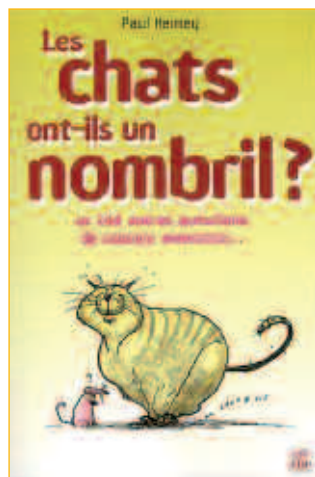
La hauteur méridienne du soleil est :

$$h_m = 90^\circ - 21,57^\circ = 68,43^\circ$$

## Récapitulation pour la matinée du solstice d'été

Heure de la matinée	Azimut	Distance zénithale	Hauteur
4 h 17 m, lever du soleil	55,78°	90°	0
4 h 27 m, (10 mn après le lever)	57,53°	88,52°	1,48°
8 h 17 m, (4 h après le lever)	96,37°	49,69°	40,31°
8 h 45 m, (4 h 28 mn après le lever)	101,81°	45°	45°
12 h (culmination, 7 h 43 m après le lever)	180°	21,57°	68,43°





## ■ Les chats ont-ils un nombril ?

Il fallait un certain courage pour aborder ce genre de question

**Paul Heiney**

*Quelle est la force des fourmis ? Pourquoi les bulles sont-elles rondes ?* Vous rêvez de devenir astronaute, mais où commence l'espace ? Oh surprise, à portée de voiture. Au fait, les arbres peuvent être frappés par la foudre, mais pas par le cancer ? En voilà une question ! Et il y en a bien d'autres dans cet ouvrage, suite du célèbre "Pourquoi les vaches ne peuvent-elles pas descendre les escaliers ?", voir xyz n° 11, p. 70. La mission reste la même : éclaircir toutes ces énigmes scientifiques qui font le quotidien. "Les chats ont-ils un nombril ?" explique de façon simple et ludique pourquoi le monde est ce qu'il est... Ce livre est donc le cadeau idéal pour les accros aux quiz, les fanas de science, les éternels curieux et pour tous ceux qui s'intéressent de près ou de loin au monde qui les entoure.

Paul Heiney est journaliste et animateur. Il a sélectionné les 244 questions essentielles parmi les milliers posées par le public.

► Editions EDP SCIENCES  
16 € - 220 pages  
ISBN : 978-2-7598-0054-4

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



## ■ Ephémérides astronomiques 2009 Connaissance des temps

IMCCE  
Bureau des longitudes  
Observatoire de Paris

Cet ouvrage d'éphémérides est destiné aux astronomes, aux professeurs et aux étudiants.

A partir de 2008, les éphémérides utilisés pour le calcul des positions des satellites des planètes Mars, Jupiter et Uranus sont désormais calculées à partir d'une nouvelle approche basée sur le modèle numérique NOE (Numerical Orbit and Ephemerides) développé à l'IMCCE. Ce nouveau modèle dynamique et les éphémérides associées font l'objet du chapitre sept de la première partie.

Des éphémérides électroniques accompagnent l'ouvrage et constituent maintenant les éphémérides de précision proprement dites. Elles permettent de calculer, d'une manière interactive, non seulement toutes les variables tabulées dans la Connaissance des Temps, mais aussi les coordonnées horizontales et les levers et couchers des astres. Elles sont donc bien adaptées à la préparation d'observations.

La Connaissance des Temps a été créée en 1679 par Joachim Dalancé. Cette édition, publiée sous la responsabilité du Bureau des longitudes depuis 1795, est la 330<sup>e</sup> d'une éphéméride qui a paru sans interruption depuis sa création.

► Editions EDP SCIENCES  
37 € - 156 pages  
ISBN : 978-2-7598-0350-7



## ■ L'Amérique dans l'œil des condors

Une vision aérienne de l'Amérique latine

**Robert B. Hass**

Somptueux, fascinant, "L'Amérique dans l'œil des condors" fait vibrer les éclatantes couleurs, les innombrables textures et les rythmes de l'Amérique latine à travers plus de cent remarquables tableaux, œuvres du photographe Robert B. Hass.

Vus du ciel, de surprenants motifs surgissent des lieux les plus simples comme des plus grandioses. Pics acérés et jungles luxuriantes, côtes envahies d'oiseaux ou déserts arides, ce recueil de photographies saisissantes présente un majestueux survol du continent sud-américain.

D'après Rony GAL "les évolutions technologiques qui se sont aujourd'hui démocratisées, ont permis à l'homme de s'élever et donc de mieux appréhender son environnement".

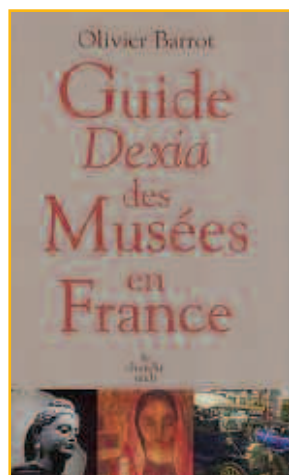
Robert B. Hass est diplômé des universités de Yale et d'Harvard et titulaire de chaires d'enseignement.

► Editions National Géographic  
37 € - 230 pages  
ISBN : 978-2-8458-2238-2

## ■ Guide Dexia des Musées en France

**Olivier Barrot**

Qui s'en douterait ? Il existe en France plus de 4 000 établissements correspondant à l'idée que l'on se fait d'un musée ! Certes, il n'est guère de commune mesure entre,



par exemple, le musée de la Bicyclette de La Bâtie-Montgascon (Isère) ou du Marron glacé de Collobrières (Var) et le Centre Pompidou ou la Fondation Maeght. Pourtant, notre pays cultive bel et bien le goût du regroupement à la fois intelligent et curieux. Et ce, dans chacun de nos départements.

Ce guide comble un vide, puisqu'il offre une recension complète des institutions françaises. Conçu comme un ouvrage pratique, extrêmement documenté, il s'imposera comme un indispensable compagnon de voyage.

**Olivier Barrot** est journaliste, producteur et présentateur de l'émission quotidienne de France 3 et de TV5 Monde "Un livre, un jour" (depuis 1991), et codirecteur de *Senso, magazine des plaisirs et des sens*.

► **Editions Dexia - Le cherche midi**  
19,50 € - 720 pages  
ISBN : 978-2-7491-1107-0

## ■ Histoire du télescope

**La contemplation de l'univers, des premiers instruments aux actuelles machines célestes**

**Yaël Nazé**

Les astronomes sont condamnés à ne jamais pouvoir toucher l'objet de leurs travaux : le ciel se laisse contempler mais demeure hors d'atteinte. Pour déchiffrer le message céleste, l'œil



ne suffit pas. Il fallut attendre la naissance de la première lunette astronomique pour ouvrir une nouvelle voie à notre insatiable désir de savoir. Ce tout premier instrument d'observation allait en effet étendre vers l'infini le pouvoir de nos yeux.

Quatre cents ans après, ce sont d'immenses machines qui scrutent pour nous l'Univers, en nous permettant même de remonter le temps.

C'est leur histoire qui nous est racontée ici mais, par deçà les engins les plus complexes, ce livre nous parle de leurs bâtisseurs. Démontant au passage certaines idées reçues, Yaël Nazé nous plonge dans les balbutiements de ces instruments avant de nous emmener côtoyer les premiers géants et découvrir les révolutions en cours.

Illustré de nombreux documents historiques et techniques, ce récit est également pourvu d'encadrés expliquant en profondeur le fonctionnement des instruments.

**Yaël Nazé** est ingénieur des télécommunications et docteur ès sciences spécialisé en astrophysique. Il déploie une intense activité scientifique dans deux grands domaines : la recherche et la diffusion des sciences. En même temps, Vuibert publie une nouvelle édition de son *Astronomie au féminin, voir xyz n° 107, p. 68*.

► **Editions Vuibert**  
19 € - 160 pages  
ISBN : 978-2-7117-2501-4



## ■ Études foncières

Il ne manque pas de dictionnaires critiques ou purement technologiques en urbanisme, architecture, immobilier, environnement, etc. Mais il en n'existe guère dans le domaine foncier qui a la double particularité d'être totalement transversal et pour autant très spécialisé.

La revue "Études foncières" a actualisé et enrichi la base terminologique publiée il y a quelques années au dos des numéros successifs de la revue.

Le n° 136 d'Études foncières de novembre-décembre 2008 consacre vingt-cinq pages à un extrait significatif du lexique de l'ADEF.

► Pour tous renseignements : [www.adef.org](http://www.adef.org)



► **Agenda astronomique 2009**  
Editions EDP SCIENCES - ESO  
14 € - 180 pages  
ISBN : 978-2-7598-0094-0

## REPERTOIRE DES ANNONCEURS - N° 118

AXIS CONSEILS	14	LEICA	2	TRIMBLE	6 - 2 et 3° de couv
ECOLE CHEZ SOI	4	MAGELLAN	1		
GÉOMEDIA	4° de couv	REIS STOLZEL	40		